ISSN 1818-1112
№ 1(139)

Научно-практический журнал
Scientific and practical journal

ВЕСТНИК

Брестского государственного технического университета

VESTNIK

of Brest State Technical University

WWW.BSTU.BY

DOI 10.36773/1818-1112-2026-139-1

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
ТУР ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ
д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов БрГТУ

Заместитель главного редактора
ШАЛОБЫТА НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ
канд. техн. наук, доцент, проректор по научной работе БрГТУ

Ответственный секретарь
КОВАЛЬЧУК ЕКАТЕРИНА НИКОЛАЕВНА
специалист БрГТУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Раздел «Строительство»
д-р техн. наук, доцент НАЙЧУК АНАТОЛИЙ ЯКОВЛЕВИЧ (ответственный редактор)
канд. техн. наук, доцент ПАВЛОВА ИНЕССА ПАВЛОВНА (зам. ответственного редактора)

д-р техн. наук, профессор ПОЙТА ПЕТР СТЕПАНОВИЧ
д-р техн. наук, профессор БАТЯНОВСКИЙ ЭДУАРД ИВАНОВИЧ
академик РААСН, д-р техн. наук, профессор КОЛЧУНОВ ВИТАЛИЙ ИВАНОВИЧ
чл.-корр. БАЦМАА, д-р арх., профессор МОРОЗОВА ЕЛЕНА БОРИСОВНА
д-р техн. наук, профессор ЛАЗОВСКИЙ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ
д-р техн. наук, профессор ЧЕРНЫХ АЛЕКСАНДР ГРИГОРЬЕВИЧ
канд. техн. наук, доцент ЮНЬ СЮЙ

Раздел «Машиностроение»
канд. техн. наук, доцент ПАРФИЕВИЧ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ (ответственный редактор)
канд. техн. наук, доцент ОНЫСЬКО СЕРГЕЙ РОМАНОВИЧ (зам. ответственного редактора)

д-р техн. наук, профессор ДЕВОЙНО ОЛЕГ ГЕОРГИЕВИЧ
д-р техн. наук, профессор ПОБОЛЬ ИГОРЬ ЛЕОНИДОВИЧ
академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор ВИТЯЗЬ ПЕТР АЛЕКСАНДРОВИЧ
чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор ШЕЛЕГ ВАЛЕРИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ
канд. техн. наук, доцент ЕСИПЧУК АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ
канд. физ.-мат. наук, доцент ДЖУМАЕВ АГАНИЯЗ ЯГШИЕВИЧ

Раздел «Геоэкология»
д-р геог. наук, профессор ВОЛЧЕК АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ (ответственный редактор)
канд. техн. наук, доцент МЕШИК ОЛЕГ ПАВЛОВИЧ (зам. ответственного редактора)

чл.-корр. НАН Беларуси, д-р геол.-минерал. наук, профессор БОГДАСАРОВ МАКСИМ АЛЬБЕРТОВИЧ
академик НАН Грузии, д-р техн. наук, профессор ГАВАРДАШВИЛИ ГИВИ ВАЛЕРИАНОВИЧ
чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор ЛИХАЦЕВИЧ АНАТОЛИЙ ПАВЛОВИЧ
академик НАН Беларуси, д-р геог. наук, профессор ЛОГИНОВ ВЛАДИМИР ФЁДОРОВИЧ
д-р с.-х. наук, профессор МАЖАЙСКИЙ ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

канд. экон. наук, доцент ЗАЗЕРСКАЯ ВИКТОРИЯ ВАСИЛЬЕВНА (ответственный редактор)
канд. техн. наук, доцент ПРОРОВСКИЙ АНДРЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ (зам. ответственного редактора)

д-р экон. наук, профессор ГАИБНАЗАРОВА ЗУМРАТ ТАЛАТОВНА
д-р экон. наук, доцент БЕЛЯЦКАЯ ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА
д-р экон. наук, профессор ПСАРЕВА НАДЕЖДА ЮРЬЕВНА
д-р экон. наук, профессор ХАЦКЕВИЧ ГЕННАДИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ
д-р экон. наук, профессор ТАРАСЕНОК АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

Регистрационный № 144

Решением коллегии Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь научно-практический журнал «Вестник Брестского государственного технического университета» включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертаций по техническим (строительство, машиностроение, геоэкология) и экономическим отраслям науки.

Журнал представлен в Научной электронной библиотеке eLibrary.ru и включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Подписные индексы в каталоге РУП «Белпочта»: 00551 (индивидуальная), 005512 (ведомственная).

© Брестский государственный технический университет, 2026

ВЕСТНИК

Брестского государственного технического университета

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ (СТРОИТЕЛЬСТВО, МАШИНОСТРОЕНИЕ, ГЕОЭКОЛОГИЯ), ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научно-практический журнал
Издается с января 2000 г.
Периодичность — 3 раза в год

1(139)'2026

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТРОИТЕЛЬСТВО

KHROUSTALEV B. M., AFANASENKA A. A., YATSEVICH P. P., TINGGUO LIU, ZHONGYU LI. Regulation of structure formation in cold-recycled mixtures via optimization of the dispersed phase and aggregate skeleton ***3***

БОРОВКОВА Е. С. Оценка прочности бетона в процессе его твердения с использованием метода акустической эмиссии ***13***

ВЛАСЮК Н. Н. Полицентричные сети городов и населенных мест как инструмент сбалансированного регионального развития Беларуси (на примере Брестской области) ***20***

ГЛУШКО К. К., ГЛУШКО К. А. Устойчивость центрально сжатых стержней прямоугольного сечения постоянной ширины и переменной высоты ***35***

ЗАБЕЛА Р. А. Будынак беларускай геафізічнай абсерваторыі ў Мінску: будаўнічая гісторыя ад аўтарскай задумы да навуковай рэстаўрацыі (1929–2025 гг.) ***43***

ИСАЕВ Ш. М., ШИНДИНА П. Д., ЗАНИНА А. Д. Методология интеграции искусственного интеллекта и технологий информационного моделирования в проектировании деревянных мемориальных комплексов ***50***

МАТЯС П. И., ДЕРКАЧ В. Н., ГАЛАЛЮК А. В. Анизотропия прочности на сжатие керамического кирпича ***59***

МОЛОШ В. В., ЖЕЛТКОВИЧ А. Е., ПАРХОЦ К. Г., ТОМАШЕВ И. Г. Анализ нейросетевых моделей с полносвязной архитектурой, использованных в расчётах сопротивления продавливанию в железобетонных плитах ***64***

НИКИТИН В. И., НИКИТИН С. К. Эмпирический и теоретический подходы к построению зависимостей для расчета коэффициента сопротивления диффузии пористых материалов ***79***

ТУР В. В., НАДОЛЬСКИЙ В. В. Методологические основы верификации и валидации численных моделей строительных конструкций ***88***

ТУР Э. А., РУСАК Е. Ю. Комплексные научные исследования здания бывшего иезуитского коллегиума XVII века в городе Пинске как объекта историко-культурного наследия Республики Беларусь ***94***

ЦВЕТКОВ С. В., ЦВЕТКОВ С. С. К вопросу прочности бетонов нормального веса при двухосном сжатии ***103***

МАШИНОСТРОЕНИЕ

АНТОНОВИЧ Д. А., СКОВОРОДКО М. А., ШИДЛОВСКАЯ Д. В. Основные положения физико-математической модели источника заряженных частиц с плазменным эмиттером ***109***

ЖУК А. И., ЗАЩУК Е. Н., ЯРМОЛИК Л. А., ШЕИНА В. А. Моделирование теории графов при решении задач оптимизации обработки информации ***115***

МАКСИМУК В. А., МАКСИМУК Р. А. Функции активации нейронных сетей, их визуализация и применение в программировании на примере библиотеки TensorFlow ***123***

ОВЧИННИКОВ Е. В., ФАЛЁСА В. Ю., ВЕРЕМЕЙЧИК А. И., ЛИННИК Д. А., АМИРХАНОВ Е. И., ХВИСЕВИЧ В. М., АДАМЧИК А. И. Физико-механические характеристики композиционных фторсодержащих покрытий ***131***

САВИЦКИЙ Ю. В., МУРАВЬЕВ Г. Л. Основные тенденции аппаратной и программной организации современных компьютерных сетей: от специализированных аппаратных платформ к программно-композируемым средам ***138***

ЦАРЕНКО И. В., КУДРИЦКИЙ В. Г., ГУЦЕВ Д. М. Особенности морфологии поверхности стали 45 после лазерной закалки ***145***

ЯРОШЕВИЧ А. В. Технологическая информационная модель управления городским пассажирским транспортом ***153***

ГЕОЭКОЛОГИЯ

АХМАДИЕВА Ю. И., БАСАЛАЙ Е. Н. Геоэкологические и технические особенности эксплуатации городских очистных сооружений сточных вод населенных пунктов Республики Беларусь ……..……***157***

ВОЛЧЕК А. А., БОРУШКО В. В. Температурный режим почв Белорусского Полесья: современное состояние и прогноз ……..……***166***

КУХАРИК А. М. Изученность вопроса нитратного загрязнения подземных вод ……..……***174***

КУЦОБИНА Е. В. Отходы как ресурс: влияние РОП на формирование рынка ВМР в Беларуси и России (сравнительный анализ в контексте экономики замкнутого цикла) ……..……***184***

МЕШИК О. П., ВОЛЧЕК А. А., ПАРФОМУК С. И., СИДАК С. В., БОРУШКО М. В., ПРОТАСЕВИЧ А. С., КОЛЯДА Ю. П. Резкие переходы в системе «весеннее половодье – засуха – дождевой паводок» ……..……***190***

МОРОЗ В. В., ИВАШЕЧКИН В. В., УРЕЦКИЙ Е. А. Исследование, разработка и внедрение оборудования для обработки сточных вод гальванического производства ……..……***207***

МОРОЗ В. В., ИВАШЕЧКИН В. В., УРЕЦКИЙ Е. А. К вопросу совершенствования технологии очистки сточных вод предприятий приборо- и машиностроения ……..……***216***

ТЕРЛЕЦКАЯ Н. Ф., АНТОНЮК А. С., ГАПОНЮК А. Н. Влияние почвогрунта с использованием осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов на качество газонов ……***224***

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

CHETYRBOCK N. P. Innovation, entrepreneurship, and economic growth – a theory of synergism and dynamism in the case of Belarus ……***231***

ВАЙЛУНОВА Ю. Г., ШЕРСТНЕВА О. М. Теоретические основы горизонтальной цифровизации в контексте Индустрии 4.0 как направление экономического развития Республики Беларусь ….***238***

ГАРЧУК И. М., КАЗБЕРОВИЧ А. А. Анкета управляемости: новый вспомогательный инструмент для менеджеров и HR-специалистов. Создание эффективной команды ……***244***

ЕРМАКОВА Э. Э., МИШКОВА М. П. Перспективные направления развития технологий искусственного интеллекта в сфере создания и использования объектов интеллектуальной собственности ……***253***

ЗАЗЕРСКАЯ В. В., ТАРАСЁНОК А. И. Трансграничный туризм в современных условиях ……***258***

КУГАН С. Ф., ОСТАШКО О. Ю. Концепция территориального брендинга в системе социально-экономического управления и развития региона ……***265***

КРИСТИНЕВИЧ С. А. Беларусь на африканском континенте: потенциал и диверсификация экспорта товаров ……***270***

НЕМОГАЙ Н. В., БОНЦЕВИЧ Н. В. К вопросу формирования инновационной модели логистики управления цепочками поставок ….***283***

НОВИКОВ А. С. Методика оценки состояния научно-технологической безопасности ……***290***

НОВИКОВ А. С. Совершенствование механизмов государственной программы инновационного развития Республики Беларусь как инструмента обеспечения научно-технологической безопасности Республики Беларусь ……***298***

НОРМИРЗАЕВ А. Р. Состояние транспортно-логистического обслуживания в Республике Узбекистан ……***305***

ШАРОВА К. И. Искусственный интеллект и трансформация рынка труда ……***311***

ЯЩУК А. И. Технологическая трансформация рынка труда в условиях демографического дефицита: роль автоматизации и искусственного интеллекта ……..……***315***

СТРОИТЕЛЬСТВО

UDC 625.855.52:691.16:620.1

REGULATION OF STRUCTURE FORMATION IN COLD-RECYCLED MIXTURES VIA OPTIMIZATION OF THE DISPERSED PHASE AND AGGREGATE SKELETON

B. M. Khroustalev[1], A. A. Afanasenka[2], P. P. Yatsevich[3], Liu Tingguo[4], Li Zhongyu[5]

[1] Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University, Branch of the BNTU "Research Polytechnic Institute", Minsk, Belarus, e-mail: tgv_fes@bntu.by

[2] Researcher, Belarusian National Technical University, Branch of the BNTU "Research Polytechnic Institute", Center for Scientific Research and Testing of Road Building and Waterproofing Materials, Minsk, Belarus, e-mail: alexxxela@mail.ru

[3] Researcher, Belarusian National Technical University, Branch of the BNTU "Research Polytechnic Institute", Center for Scientific Research and Testing of Road Building and Waterproofing Materials, Minsk, Belarus, e-mail: cniidsgm@bntu.by

[4] Head of Gaoyuan Company, Henan Highway Maintenance Technology Company, Xinxiang, Henan Province, People's Republic of China, e-mail: liutingguo@chngaoyuan.com

[5] Director, Henan Key Laboratory of High-Grade Highway Detection and Maintenance Technology, Xinxiang, Henan Province, People's Republic of China, e-mail: lizhongyu@chngaoyuan.com

Abstract

In the context of increasing resource conservation and environmental efficiency in road construction, cold recycling is becoming a priority method for pavement rehabilitation. However, the widespread use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is limited by its high heterogeneity and the lack of unified approaches to mix design that would consider the structural role of each component. The aim of this work is to develop principles for regulating structure formation processes in cold mixtures by optimizing the aggregate skeleton and the composition of the dispersed phase.

Within the framework of the study, the physico-mechanical properties of four groups of organic-hydraulic mixtures with a high RAP content were investigated. A combined system based on cationic bitumen emulsion and Portland cement was used as a binder, while activated mineral powder was used as an inert filler.

It was established that the partial replacement of cement with mineral powder leads to a significant improvement in performance characteristics: the indirect tensile strength increases, and the efficiency of hydraulic binder utilization increases by more than two times. The developed mathematical model revealed the non-linear nature of the dependence of the elastic modulus on the filler content and allowed determining the point of structural optimum. It is proven that a mechanical increase in the RAP proportion with an excess of binder mastic leads to a particle push-apart effect and a critical reduction in strength due to the disruption of contacts in the mineral skeleton. This justifies the necessity of applying a comprehensive approach to mix design that considers the volumetric parameters of the skeleton.

The introduced criteria for evaluating deformability and homogeneity allowed identifying a contradiction between the strength, elasticity, and technological reliability of the mixtures. The results justify the necessity of transitioning to a multi-criteria mix design approach to ensure a balance between the stiffness of the mineral skeleton and the relaxation capacity of the binder matrix.

Keywords: cold recycling, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), bitumen emulsion, Portland cement, mineral filler, structure formation, elastic modulus, deformability, mixture homogeneity.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ХОЛОДНЫХ РЕГЕНЕРИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ И ЗЕРНОВОГО КАРКАСА

Б. М. Хрусталев, А. А. Афанасенко, П. П. Яцевич, Лю Тингоу, Ли Чжунюй

Реферат

В контексте повышения ресурсосбережения и экологической эффективности дорожного строительства холодная регенерация становится приоритетным методом восстановления дорожных одежд. Однако широкое применение асфальтогранулята ограничивается его высокой неоднородностью и отсутствием единых подходов к проектированию состава, которые учитывали бы структурную роль каждого компонента. Целью данной работы является разработка принципов регулирования процессов структурообразования холодных смесей путем оптимизации зернового каркаса и состава дисперсной фазы.

В рамках исследования были изучены физико-механические свойства четырех групп органо-гидравлических смесей с высоким содержанием асфальтогранулята. В качестве вяжущего использовалась комбинированная система на основе катионной битумной эмульсии и портландцемента, а в качестве инертного наполнителя применялся активированный минеральный порошок.

Установлено, что частичная замена цемента на минеральный порошок приводит к существенному улучшению эксплуатационных характеристик, предел прочности на раскол возрастает, а эффективность использования гидравлического вяжущего увеличивается более чем в два раза. Разработанная математическая модель выявила нелинейный характер зависимости модуля упругости от содержания наполнителя и позволила определить точку структурного оптимума. Доказано, что механическое увеличение доли асфальтогранулята при избытке вяжущей мастики приводит к эффекту раздвижки зерен и критическому снижению прочности из-за нарушения контактов в минеральном каркасе, что обосновывает необходимость применения комплексного подхода к проектированию, учитывающего объемные параметры скелета.

Введенные критерии оценки деформативности и однородности позволили выявить противоречие между прочностью, эластичностью и технологической надежностью смесей. Сделан вывод о необходимости перехода к многокритериальному проектированию, обеспечивающему баланс между жесткостью минерального каркаса и релаксационной способностью вяжущей матрицы.

Ключевые слова: холодная регенерация, асфальтогранулят, битумная эмульсия, портландцемент, минеральный порошок, структурообразование, модуль упругости, деформативность, однородность смеси.

Introduction

Given the global focus of the road industry on reducing the carbon footprint and the rational use of natural resources, the transition from traditional Hot Mix Asphalt (HMA) technologies to energy-efficient cold pavement rehabilitation methods is becoming particularly relevant [1–3]. Cold recycling allows for a significant reduction in energy consumption and greenhouse gas emissions, as well as a decreased demand for virgin mineral aggregates through the reuse of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). In this context, Cold Recycled Mixtures (CRM) are considered not only a technologically viable but also an environmentally sound solution for modern road construction. At the same time, the durability and operational reliability of recycled layers are decisively determined by the structure formation processes occurring in the material at various curing stages [4, 5].

Modern CRM represent complex multicomponent systems in which mechanisms characteristic of both asphalt mixtures and hydraulically stabilized materials are simultaneously realized. The structure of such mixtures is formed through the interaction of the aggregate skeleton consisting of RAP and virgin aggregates, the dispersed phase in the form of bitumen emulsion or foamed bitumen, and active fillers, primarily cement or its analogues [4, 6–10]. As a result, a hybrid cement-bitumen matrix is formed, the properties of which significantly depend on the ratio and distribution of phases within the material volume.

Early approaches to CRM mix design were largely based on methodologies borrowed from HMA practice, with a dominance of strength criteria [1, 6, 10, 11]. However, accumulated field experience has shown that focusing exclusively on achieving high strength values, especially with increased cement content, often leads to the formation of an excessively stiff and brittle structure prone to reflective and thermal cracking [6, 12].

In recent years, the concept of mix design based on performance indicators (performance-based design, balanced mix design) has become increasingly widespread in international practice [13, 14]. Within this approach, the cold recycled mixture is viewed as a multiphase composite system in which a balanced combination of strength, cracking resistance, deformability, and moisture resistance must be ensured. The key factor here becomes not so much the absolute content of binder components, but rather the nature of structure formation and the quality of the formed aggregate skeleton.

Studies show that optimizing the gradation of RAP and virgin aggregates allows for the formation of a stable spatial skeleton capable of effectively withstanding external loads and limiting the development of permanent deformation [15]. Simultaneously, the dispersed phase (bitumen emulsion combined with hydraulic components) determines the structural cohesion, its viscoelastic properties, and resistance to cracking [7, 16, 17]. Changes in the fineness, content, and distribution of fine particles significantly affect the curing kinetics, pore structure, and durability of the material [18, 19].

Despite a significant number of studies, the issues of targeted regulation of CRM structure formation processes through the coordinated optimization of the dispersed phase and the aggregate skeleton remain insufficiently systematized. In most regulatory and practical guidelines, these aspects are considered in isolation, without accounting for their mutual influence on the formation of the performance properties of the recycled layer. As a result, existing mix design approaches rarely quantify the interaction between aggregate skeleton volumetrics and dispersed phase saturation, which significantly limits the predictability of cold recycled mixture performance.

In this regard, a relevant scientific and technical challenge is the development of approaches allowing for the control of the structure of cold recycled mixtures at micro- and macro-levels to enhance their cracking resistance, resistance to deformation, and overall durability.

This work is aimed at investigating and substantiating methods for regulating the structure formation processes of cold recycled mixtures by optimizing the parameters of the dispersed phase and the aggregate skeleton, which aligns with modern trends in the development of pavement materials science and road construction technologies.

Theoretical Foundations of Structure Formation in Organic-Hydraulic Composites

The development of effective mix design methods for CRM requires a fundamental rethinking of the role of components in the formation of the material structure. Unlike traditional HMA, where the mineral skeleton is viewed as an aggregate of inert particles, in cold recycling technologies, the primary structure-forming element is RAP. From the perspective of physicochemical mechanics [20], RAP represents not a monolithic stone material but a particulate composite in which mineral grains are coated with a film of aged, oxidized bitumen. Under cold mixing conditions, which occur without thermal activation, the aged binder does not transition into a viscous-flow state, and the diffusion of oils from the new bitumen emulsion into the depth of the old bitumen film is significantly limited by kinetic and temperature factors. Consequently, RAP granules retain their internal defects and microcracks formed during the service life and milling of the old pavement.

This feature dictates the necessity of abandoning traditional design methods oriented exclusively toward achieving maximum packing density (e. g., according to Fuller-type gradation curves [21]). The striving to minimize porosity by filling the intergranular space with fine fractions and binder often leads to the formation of structures lacking a rigid skeleton, in which coarse RAP grains are separated by the mortar phase. In such systems, the external load is transferred not through the contacts of strong stone grains but through the weaker and more compliant mastic, leading to reduced shear stability and the accumulation of permanent deformation [22]. In this case, the objective function of the design becomes the creation of a packing arrangement that ensures the direct interlocking of coarse particles, forming a rigid load-bearing skeleton capable of withstanding traffic loads and compensating for the internal defects of the RAP granules.

The space within the formed mineral skeleton is filled by a secondary structure–asphalt–mineral mastic–formed as a result of the interaction between bitumen emulsion, water, and dispersed phase components. According to the theory of structure formation of road composites [4, 5], the introduction of fine particles into an organic binder initiates a clustering process, the formation of aggregates consisting of filler particles surrounded by oriented solvation shells of bitumen. The properties of this microstructure critically depend on the nature and fineness of the fillers.

Of particular scientific and practical interest is the effect of the combined use of inert (mineral filler) and active (Portland cement) fillers [4]. Possessing a high specific surface area, the mineral filler performs the function of a physical densifier, filling micropores and increasing the viscosity of the mastic. Portland cement acts as an active modifier; its hydration products form new crystalline formations that reinforce the bitumen film at the micro-level. In such a system, a "cluster-in-cluster" strengthening mechanism is realized, where cement particles create rigid micro-reinforcement within a viscoelastic medium [4]. This theoretical premise allows for the hypothesis that optimizing the composition of the dispersed phase by partially replacing cement with mineral filler can ensure the necessary material strength while maintaining its deformability, thereby reducing the risk of brittle failure characteristic of purely cementitious systems.

Materials

The experimental verification of the theoretical premises was conducted within the framework of an international scientific and technical cooperation program supported by the National Key R&D Program of China (Project No. 2025YFE0199500). The studies were carried out at the laboratory facilities of the Gaoyuan Company, located in Xinxiang (Henan Province, PRC). Access to the high-tech testing equipment at this site allowed for the implementation of the research program in compliance with strict metrological requirements and in full accordance with the regulatory framework of the PRC in the field of road construction.

Reclaimed Asphalt Pavement, obtained by cold milling of an existing asphalt concrete pavement, was used as the main component of the organic-hydraulic mixture. Given the high variability of the properties of the recycled material, sampling was performed using the quartering method to ensure the representativeness of the sample.

The gradation of the RAP was determined by dry sieving in accordance with the T 0302 method of the JTG E42 standard [23]. To assess the homogeneity of the material, three parallel samples were tested. The results of the sieve analysis are presented in Table 1.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-3-12

Table 1 – RAP Gradation

Sieve size, mm	Sample 1, % passing	Sample 2, % passing	Sample 3, % passing	Average value, % passing
16,0	100,0	100,0	100,0	100,0
13,2	96,7	98,1	97.3	97,4
9,5	87,5	89,8	80,2	85,8
4,75	49,0	56,8	33,8	46,5
2,36	30,5	34,5	16,5	27,2
1,18	21,3	21,9	10,2	17,8
0,6	12,7	11,7	5,5	10,0
0,3	6,6	5,6	3,0	5,1
0,15	3,3	3,0	1,6	2,6
0,075	1,4	1,4	0,8	1,2

To determine the residual binder content in the RAP, the ignition method in a muffle furnace was used according to T 0735 [24]. Based on the test results, the aged bitumen content was 4,46 % (oil-aggregate ratio of 4,66 %).

To optimize the particle size distribution and form a rigid load-bearing skeleton, virgin mineral aggregates from basalt rocks were introduced into the mixture: cubical crushed stone of fractions 10–15 mm, 5–10 mm, and 3–5 mm, and crushed stone screenings of 0–3 mm. The physico-mechanical characteristics of the aggregate, including crushing value, abrasion resistance, and the content of flat and elongated particles, fully complied with the requirements of the JTG F40 standard [25] for asphalt mixtures. The gradation of the virgin aggregates is presented in Table 2.

The mix design of the cold recycled mixture was carried out using a calculation-experimental method. The objective function was the formation of a particle size distribution oriented towards the standard range for dense-graded asphalt concrete of type AC-13 (according to JTG F40 [25]), which in this study was used as a structural benchmark rather than a regulatory requirement to ensure a stable aggregate skeleton. This approach allowed for a comparison of structure formation processes in cold recycled mixtures with the classical principles of mineral skeleton formation in asphalt concrete while preserving the specifics of the organic-hydraulic system. The calculation of component proportions was performed based on the material balance equation

$$P_i = a \cdot A_i + b \cdot B_i + c \cdot C_i + ..., \quad (1)$$

where P_i is the passing percentage on sieve i for the designed mixture;

A_i, B_i, C_i are the passing percentages on sieve i for each component (RAP, crushed stone, screenings);

a, b, c are the proportions of the components.

Figure 1 presents the results of the gradation design.

Table 2 – Gradation of Mineral Aggregates

Sieve size, mm	Crushed stone 10–15 mm, % passing	Crushed stone 5–10 mm, % passing	Crushed stone 3–5 mm, % passing	Screenings 0–3 mm, % passing	Mineral filler, % passing
16,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
13,2	72,4	100,0	100,0	100,0	100,0
9,5	8,1	100,0	100,0	100,0	100,0
4,75	0,1	11,1	98,7	99.4	100,0
2,36	0,0	0,1	8,5	73,7	100,0
1,18	0,0	0,1	1,5	46,7	99,5
0,6	0,0	0,1	0,5	27,3	95,2
0,3	0,0	0,1	0,4	17,3	88,4
0,15	0,0	0,1	0,4	12,4	76,0
0,075	0,0	0,0	0,3	9,3	65,5

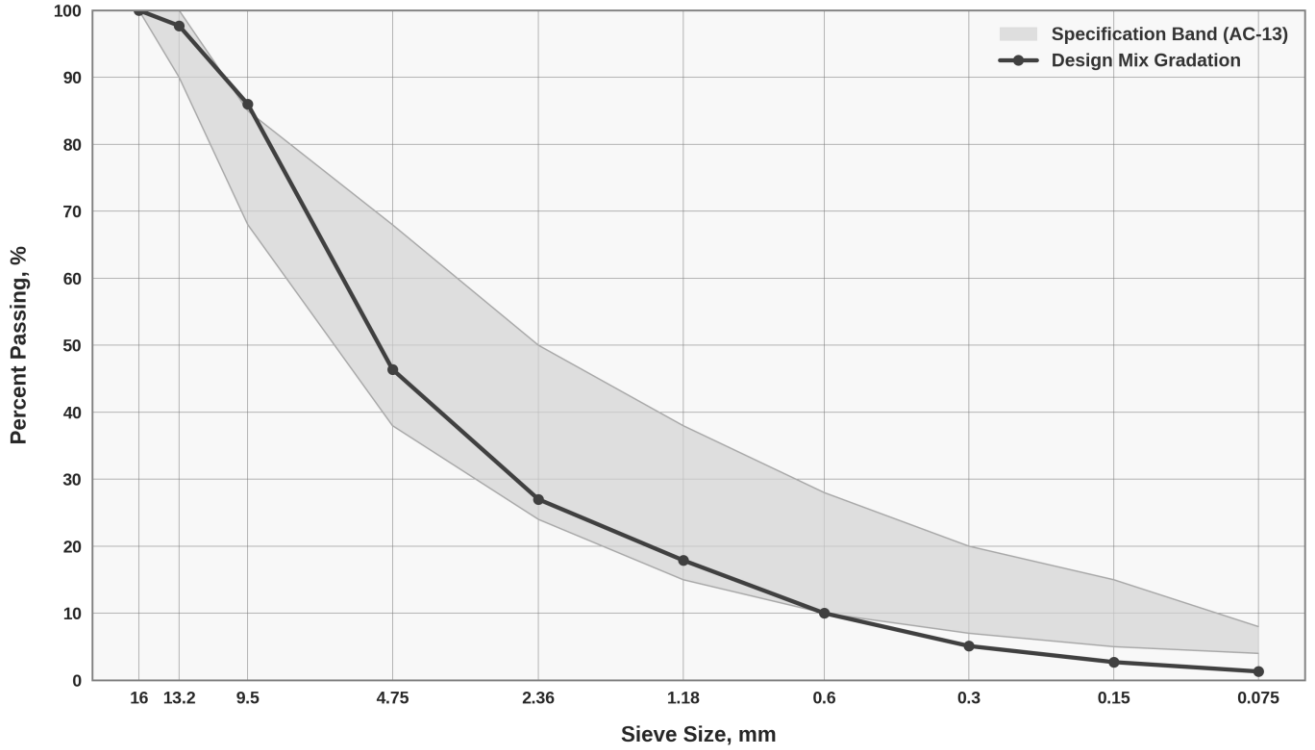


Figure 1 – Gradation curve of the designed organic-hydraulic mixture relative to the standard limits for AC-13 asphalt concrete

To fill micropores and densify the mastic part of the recycled mixture, activated mineral powder obtained by grinding limestone rocks ($CaCO_3$) was used as a dispersed filler. The gradation of the mineral powder, presented in Table 2, was characterized by a high degree of fineness, which ensured a developed specific surface area for interaction with the binder.

The formation of the binder matrix was ensured by a combined system consisting of organic and hydraulic components. A cationic slow-setting bitumen emulsion of the BCR (Bitumen Cold Recycling) grade, modified with a polymer (SBR latex), was used as the organic binder. This type of emulsion, specially developed for cold recycling technologies, is characterized by high adhesion to mineral materials and a controlled breaking time, which meets the requirements of the JTG F40 standard [25]. The role of the active hydraulic binder, ensuring early strength gain and the formation of secondary crystallization bonds, was performed by Portland cement of grade P.O 42.5, the physico-mechanical properties of which met the requirements of the PRC national standard GB 175 [26].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-3-12

Research Methodology

The experimental research program was developed to separately evaluate the influence of the mineral skeleton structure and the binder mastic composition on the material's performance properties. The experiment involved the design and testing of four groups of mixtures (Table 3).

In the first three groups (mixtures A, B, C), the macrostructure parameters remained constant: RAP content (50 %) and the gradation of the mineral skeleton (crushed stone of 10–15 mm fraction at 10 % and screenings of 0–3 mm at 40 % were used). The bitumen emulsion content also remained constant (7,0 %). The variable factor was the ratio of the dispersed phase components: active (cement) and inert (mineral filler) fillers.

The fourth group (mixture D) was aimed at studying the possibility of maximizing the use of the recycled resource. The RAP proportion was increased to 60 %. To compensate for the change in gradation and prevent segregation, the structure of the virgin aggregate was changed; instead of 0–3 mm screenings, a narrow fraction of crushed stone (3–5 mm) was used. To fill the increased Voids in Mineral Aggregate (VMA), the mineral filler content was raised to 8,0 %, and the emulsion content was increased to 10,5 % to ensure complete coating of the increased specific surface area of the mixture.

Comprehensive evaluation of physico-mechanical characteristics and operational reliability of the developed organic-hydraulic mixtures was conducted in strict accordance with the regulations of the PRC industry standard JTG E20 [24]. The testing program included the fabrication of laboratory specimens, simulation of the curing process, and determination of key indicators: bulk density, water absorption, splitting tensile strength, and elastic modulus.

Specimen compaction was carried out in accordance with method T 0702 [24]. Pre-prepared mineral components (RAP and crushed stone) and fillers were mixed with the calculated amount of water and bitumen emulsion in a laboratory forced-action mixer until complete homogenization of the mixture was achieved. Compaction was performed using an automatic Marshall compactor. To simulate pavement performance under heavy traffic loads, a compaction regime providing 75 blows of the compaction hammer on each side of the specimen was applied. As a result, standard-sized cylindrical specimens (diameter 101,6 ± 0,2 mm, height 63,5 ± 1,3 mm) were obtained.

Table 3 – Matrix of experimental compositions of organic-hydraulic mixtures

Mixture components	Unit	Mixture A (Control)	Mixture B (Hybrid)	Mixture C (Saturated)	Mixture D (High RAP)
1. Mineral skeleton (100 %)					
Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	%	50,0	50,0	50,0	60,0
Crushed stone 10–15 mm	%	10,0	10,0	10,0	10,0
Crushed stone 3–5 mm	%	–	–	–	22,0
Crushed stone screenings 0–3 mm	%	40,0	40,0	40,0	–
Mineral filler ($CaCO_3$)*	%	–	–	–	8,0
2. Additives (over 100% of skeleton)					
Portland cement (P.O 42.5)	%	2,0	1,0	2,0	2,0
Mineral filler ($CaCO_3$)*	%	–	1,0	2,0	–
Bitumen emulsion (BCR)	%	7,0	7,0	7,0	10,5
Added water	%	3,0	3,0	3,0	3,0

Note: In Mixture D, the mineral filler (8 %) is included in the mineral skeleton composition for gradation correction, whereas in Mixtures B and C, it was introduced as an additive over 100 % to modify the mastic.

A critically important stage of preparation was the simulation of the curing process. Since cold mixtures gain strength gradually due to moisture evaporation and bitumen coalescence, freshly compacted specimens (in molds) were placed in a forced-draft oven. Curing was conducted at a temperature of 60 ± 1 °C for 48 hours. This accelerated curing regime allows simulating the physico-mechanical properties of the material corresponding to a long service period in real road conditions. After removal from the oven, specimens were cooled at room temperature for at least 12 hours before testing.

Evaluation of volumetric properties, bulk density, and water absorption of specimens was conducted using the hydrostatic weighing method in accordance with method T 0705 (saturated surface-dry method) [24]. Before weighing in water, specimens were conditioned in a water bath at 25 ± 0,5 °C for 5 minutes to equalize temperature. Based on the obtained data, the bulk density of the skeleton and Voids in Mineral Aggregate (VMA) were calculated, which allowed evaluating the quality of grain packing in the designed mixtures.

The indirect tensile test (splitting test), specified by method T 0716 [24], was used as the main criterion for strength and deformability. This method most accurately models the stress state of the pavement under traffic loads causing tensile stresses in the bottom zone of the layer.

Tests were conducted on a universal electromechanical testing machine equipped with a load frame with force and displacement sensors. Before testing, specimens were conditioned in an environmental chamber at a temperature of 15 ± 0,5 °C for 4 hours. The choice of 15 °C is due to the need to evaluate material behavior under conditions characteristic of the spring-autumn period, when the risk of cracking is highest.

Specimen loading was applied through steel loading strips 12,7 mm wide located along the cylinder generators. The displacement rate of the loading head was 50 mm/min. During loading, the "load-deformation" curve was continuously recorded. Based on the data obtained, two key parameters were determined: Splitting Tensile Strength (R_t), the maximum stress the specimen withstands before failure; and Indirect Tensile Stiffness Modulus (S_t), a material stiffness characteristic calculated from the linear portion of the deformation diagram.

Research Results

During laboratory testing, datasets on physico-mechanical indicators were obtained for each series of specimens. To assess material homogeneity and the reliability of results, values for each individual specimen were recorded. A complete summary of the experimental data is presented in Table 4.

As seen in Table 4, the specificity of materials based on RAP lies in their high inherent heterogeneity. Unlike mixtures based entirely on virgin aggregates, the properties of RAP can vary even within a single batch. Therefore, for an objective assessment of the quality of organic-hydraulic mixtures, it is insufficient to operate only with average strength values. The stability of properties, characterizing the technological reliability of the material, becomes a critically important parameter.

To quantitatively assess homogeneity, the coefficient of variation (C_v) was used, calculated by the formula

$$C_v = \frac{S}{\overline{X}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

where S is the sample standard deviation;

$\overline{X}$ is the arithmetic mean of the indicator in the sample.

Mixture C (2 % cement + 2 % mineral filler) demonstrates high homogeneity; the coefficient of variation for the elastic modulus is only 3,0 %. This indicates that the increased content of the dispersed phase and binder creates a saturated matrix capable of leveling (smoothing out) local defects and the variability of the RAP properties itself. Such a system possesses a high margin of technological reliability.

At the same time, Mixture B (1 % cement + 1 % mineral filler), which showed high average results for strength and elasticity but insufficient

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-3-12

technological reliability, is characterized by an exceptionally high coefficient of variation – 34,3 %. A detailed analysis of the sample set reveals the presence of a specimen with a sharply reduced modulus (1824 MPa), which is almost two times lower than the group average. From a physicochemical perspective, this is explained by a deficit of free mastic. In Mixture B, the amount of binder and filler is optimized "at the limit." In those local zones where the RAP turned out to be more porous or "dry" (with a high degree of oxidation of the aged bitumen), the amount of new emulsion and cement paste was insufficient to create strong contacts. This led to the formation of "dry friction" zones or weak bonds, which became sites of premature failure.

When investigating volumetric properties, it was established that mixtures (A, B, C) with a fixed RAP content (50 %) demonstrate close average density values, varying in a narrow range from 2,327 to 2,339 g/cm^3. The highest packing density was achieved in Mixture B, where a combined dispersed phase system was used. At the same time, the transition to Mixture D with an increased RAP content (60 %) led to a noticeable decrease in average density to 2,284 g/cm^3, which is explained by the lower specific gravity of RAP particles compared to natural aggregate, as well as a change in the skeleton gradation.

Water absorption indicators, characterizing the pore structure of the material, revealed a significant influence of the filler type. Control Mixture A, containing only cement, demonstrated the highest water absorption in its group (2.31 %). The partial replacement of cement with mineral filler in Mixture B led to a decrease in this indicator to 1.77 %, which indicates more effective colmatation of micropores by the inert filler. However, a further increase in the total volume of the dispersed phase in Mixture C (2 % cement and 2 % filler) caused a reverse effect–an increase in water absorption to 2.26 %, comparable to the control mixture. The lowest water absorption value (1.53 %) was recorded for Mixture D, which is likely due to the high content of bitumen emulsion (10,5 %) and mineral filler (8 %), creating a dense, binder-saturated mastic structure filling the intergranular space.

Analysis of mechanical characteristics determined by the indirect tensile test at 15 °C demonstrates a clear dependence of strength on the composition of the dispersed phase. The introduction of mineral filler into mixtures with 50 % RAP ensured a stable increase in splitting tensile strength (R_{15}). Thus, Hybrid Mixture B showed a strength increase of 8,5 % relative to Control Mixture A (from 1,344 to 1,459 MPa), and Mixture C reached the maximum value in the series – 1,495 MPa. Meanwhile, increasing the RAP proportion to 60 % in Mixture D led to a sharp drop in strength to 1,087 MPa, which is the lowest indicator among all investigated variants.

Table 4 – Complete results of physico-mechanical tests

Group / Mixture	Specimen No.	Water absorption, %	Bulk density, g/cm^3	Splitting Tensile Strength (R_{15}), MPa	Stiffness Modulus (S_{15}), MPa
A	1	2,23	2,336	1,425	3286
	2	2,33	2,331	1,263	3263
	3	2,37	2,330	1,344	**4421**
Average value		2,31	2,332	1,344	3657
Coefficient of variation (C_V)		3,1%	0,1 %	6,0 %	**16,8 %**
B	1	1,73	2,342	1,410	3689
	2	1,82	2,338	1,464	**1824**
	3	1,75	2,336	1,504	3519
Average value		1,77	2,339	1,459	**3011** (3604)*
Coefficient of variation (C_V)		2,6 %	0,1 %	3,2 %	**34,3 %**
C	1	2,16	2,324	1,535	4561
	2	2,26	2,320	1,496	4300
	3	2,35	2,337	1,453	4390
Average value		2,26	2,327	1,495	4417
Coefficient of variation (C_V)		4,2 %	0,4 %	2,7 %	3,0 %
D	1	1,55	2,285	1,065	2621
	2	1,50	2,287	1,071	2680
	3	1,53	2,281	1,126	2464
Average value		1,53	2,284	1,087	2588
Coefficient of variation (C_V)		1,6 %	0,1 %	3,1 %	4,3 %

Note: The average value for Mixture B is calculated considering all specimens for a correct assessment of dispersion.

The dynamics of the elastic modulus (S_{15}) have a different character. Mixtures A and B showed comparable stiffness levels; however, Mixture C demonstrated a sharp jump in modulus to 4417 MPa, which is more than 20 % higher than the control group indicators. This indicates the formation of a rigid crystallization skeleton with an increased content of active and inert fillers. Conversely, Mixture D is characterized by a critical reduction in stiffness (2588 MPa), which correlates with the drop in strength and confirms the degradation of structural bonds upon oversaturation of the mixture with binder and an increase in the proportion of recycled material. A visual comparison of the mechanical characteristics of the investigated mixtures is presented in Figure 2.

Analysis of the experimental data allows identifying an important technological pattern regarding the role of active and inert fillers. A comparison of Control Mixture A (2 % cement) and Hybrid Mixture B (1 % cement + 1 % mineral filler) demonstrates that the partial replacement of the hydraulic binder with an inert filler does not lead to a reduction in strength characteristics. On the contrary, the splitting tensile strength for Mixture B (1,459 MPa) was 8.5 % higher than that of Mixture A (1,344 MPa).

To quantitatively assess this effect, the specific cement efficiency indicator (A_f) was introduced, defined as the ratio of the tensile strength to the percentage of cement in the mixture

$$A_f = \frac{R_{15}}{C_{cem}}. \quad (3)$$

Calculation shows that for Mixture A, the A_f indicator is 0,67 MPa/%, while for Mixture B it increases to 1,46 MPa/%. This indicates that in the presence of mineral filler, the efficiency of cement performance increases by more than two times. The mechanism of this phenomenon can be explained by the fact that the mineral filler densifies the mastic, allowing a smaller amount of cement to form higher-quality crystallization bonds in a smaller pore volume.

However, the increase in strength should not be achieved at the expense of cracking resistance. It is known that an excess of rigid bonds makes the material brittle, especially at low temperatures. To evaluate the balance between strength and elasticity, the deformability coefficient (K_d) was introduced

$$K_d = \frac{R_{15}}{S_{15}} \cdot 1000. \quad (4)$$

The higher the K_d value, the higher the material's ability to relax stresses without failure (greater strain at break). The calculation of coefficients is summarized in Table 5.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-3-12

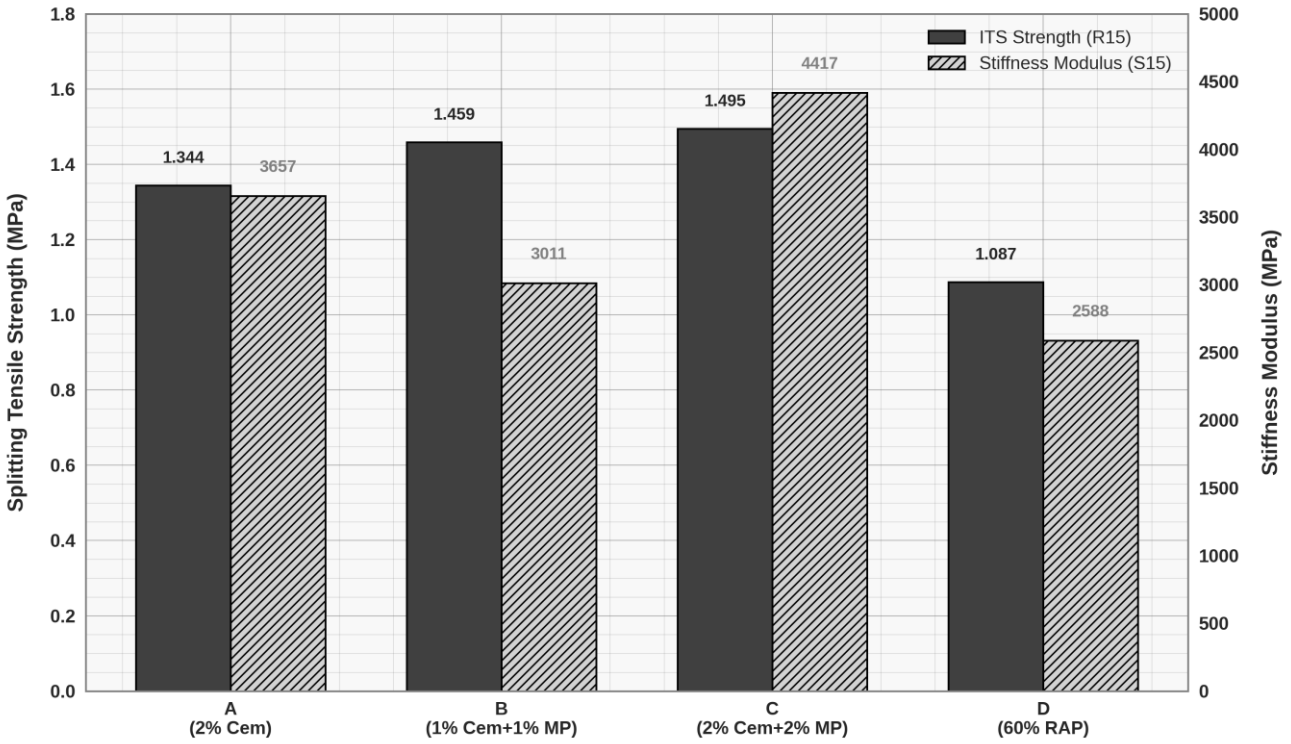


Figure 2 – Comparative diagram of splitting tensile strength (R_{15}) and stiffness modulus (S_{15}) for different mixture compositions

Table 5 – Calculated indicators of efficiency and deformability

Mixture	Cement, %	R_{15}, MPa	S_{15}, MPa	Cement Efficiency, A_f	Deformability Coeff, K_d
A	2,0	1,344	3657	0,67	0,367
B	1,0	1,459	3011	1,46	**0,484**
C	2,0	1,495	4417	0,75	0,338
D	2,0	1,087	2588	**0,54**	0,420

Mixture C possesses maximum strength but the lowest deformability coefficient (K_d = 0,338). This indicates high stiffness and potential brittleness of the material, which increases the risk of thermal and reflective cracking. Mixture B demonstrates the best balance. With high strength, it possesses the maximum deformability coefficient (K_d = 0,484) among the compliant mixtures. Thus, the strategy of replacing part of the cement with mineral filler is not only economically viable (reducing the consumption of expensive binder by 50 %) but also technically justified, as it allows obtaining a material with enhanced cracking resistance and durability.

For a comprehensive visualization of the identified property contradictions, a multi-criteria map of the operational potential of the investigated mixtures was constructed (Figure 3). On the diagram, the abscissa represents the stiffness modulus (S_{15}), characterizing the load-bearing capacity, and the ordinate represents the deformability coefficient (K_d), reflecting cracking resistance. The size of the marker (bubble) is proportional to the coefficient of variation (C_v); that is, the larger the marker, the lower the technological reliability of the mixture.

The graphical interpretation of the data clearly demonstrates a structural dilemma: Mixture C is localized in the region of high stiffness and stability (minimum marker size) but is characterized by insufficient elasticity (lower zone of the graph). In contrast, Mixture B occupies the leading position in deformability but possesses critically low technological reliability, as indicated by the maximum marker diameter.

To identify quantitative patterns of changes in material stiffness depending on the dispersed phase composition, a regression analysis of the obtained experimental data was conducted. Comparison of the test results of all four groups of specimens, including the mixture with high filler content, allowed establishing that the dependence of the stiffness modulus (S_{15}) on the mass fraction of mineral filler has a pronounced non-linear character. The simple linear assumption that increasing the amount of fine particles invariably leads to an increase in stiffness is refuted by the sharp drop in indicators in Series D.

At the first stage, to describe the established pattern, a second-order polynomial model approximating the average values for each group was selected. This model reflects the physics of structure formation processes in filled systems, where the positive effect of densification is replaced by the negative effect of particle "separation" (push-apart effect) with an excess of the dispersed phase. Using the least squares method, the empirical coefficients of the regression equation were determined

$$S_{15} = 3365 + 684.4 \cdot x - 103.4 \cdot x^2. \quad (5)$$

Analysis of the obtained model shows that the coefficient of the highest-order term of the equation has a negative value (−103,4), which geometrically corresponds to a parabola opening downwards and indicates the existence of a global maximum point. Differentiation of Equation (5) allows determining the theoretical optimum of the mineral filler content, which is 3,31 %. According to this model, it is at this point that the ultimate structural density of the mastic is achieved (Figure 4).

As seen from the analysis of the primary data, for Mixture B, a significant deviation of individual measurements from the theoretical curve is observed. To increase the reliability of the analysis and account for the material heterogeneity factor, mathematical modeling was performed again using the full dataset (N = 16), including individual values for each specimen. The refined regression equation, taking data dispersion into account, takes the form

$$S_{15} = 3382 + 478.2 \cdot x - 72 \cdot x^2. \quad (6)$$

The graphical interpretation of this dependence is presented in Figure 5. Visual analysis of the scatter plot demonstrates significant data dispersion, characteristic of RAP-based materials; however, the general non-linear trend remains clearly preserved.

The coefficient of determination of the refined model was R^2 = 0,45. Such a value is an important scientific result; it indicates that the variation in the mix design (filler content) explains 45 % of the variability in the stiffness modulus. The remaining 55 % of the variance is due to the stochastic nature of the RAP and the internal heterogeneity of the structure, which confirms the necessity of considering the reliability factor during design.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-3-12

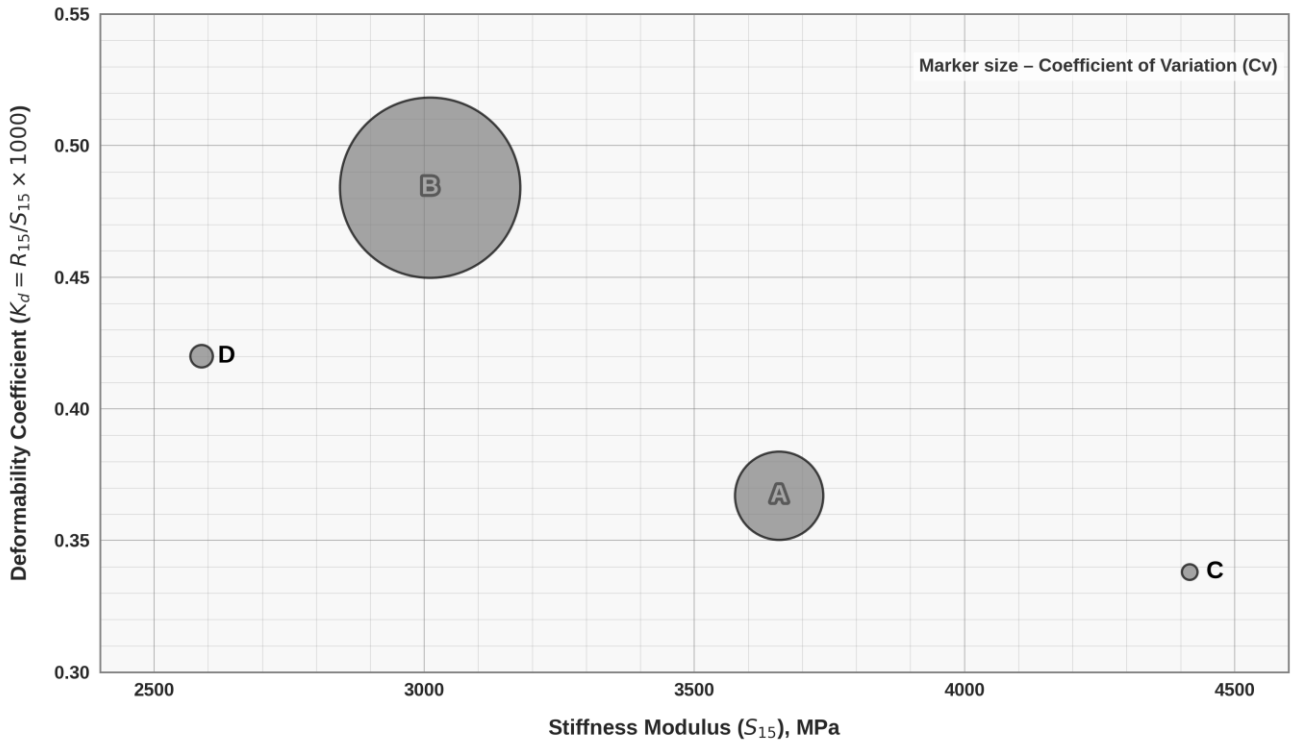


Figure 3 – Multi-criteria map of the operational potential of mixtures: relationship between stiffness (S_{15}), deformability (K_d), and technological reliability (marker size is proportional to C_v)

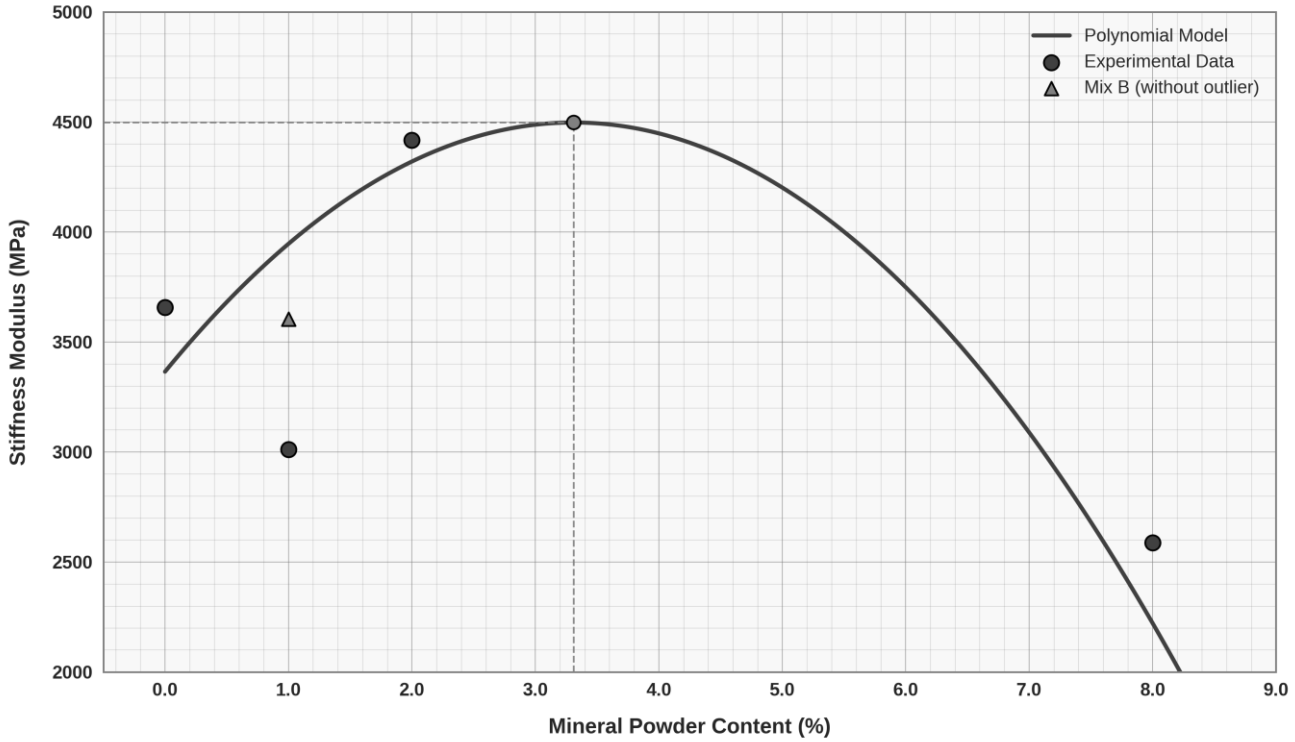


Figure 4 – Approximation of the dependence of stiffness modulus on mineral filler content using a polynomial model (based on average values)

Nevertheless, the refined model also allows for the precise determination of the point of structural optimum. Differentiation of Equation (6) yields

$$\frac{dS}{dx} = 478{,}2 - 144 \cdot x = 0 \Rightarrow x_{opt} \approx 3{,}32\,\% \ . \qquad (7)$$

Calculation shows that the maximum material stiffness is achieved at a mineral filler content of 3,32 %, which practically coincides with the result of the primary modeling. A further increase in the amount of filler (up to 8 % in Mixture D) shifts the system to the descending branch of the parabola.

Both mathematical models (Figure 4 and Figure 5) provide a theoretical justification for the observed decline in the physico-mechanical characteristics

of Mixture D. The filler content in this mixture (8 %) significantly exceeds the calculated optimum, shifting the system into the region of "structural oversaturation." In this state, the excess volume of the dispersed phase and binder begins to act as a separator, pushing apart the coarse aggregate particles and preventing the formation of rigid contacts within the mineral skeleton, which leads to the reduction in stiffness modulus recorded in the experiment.

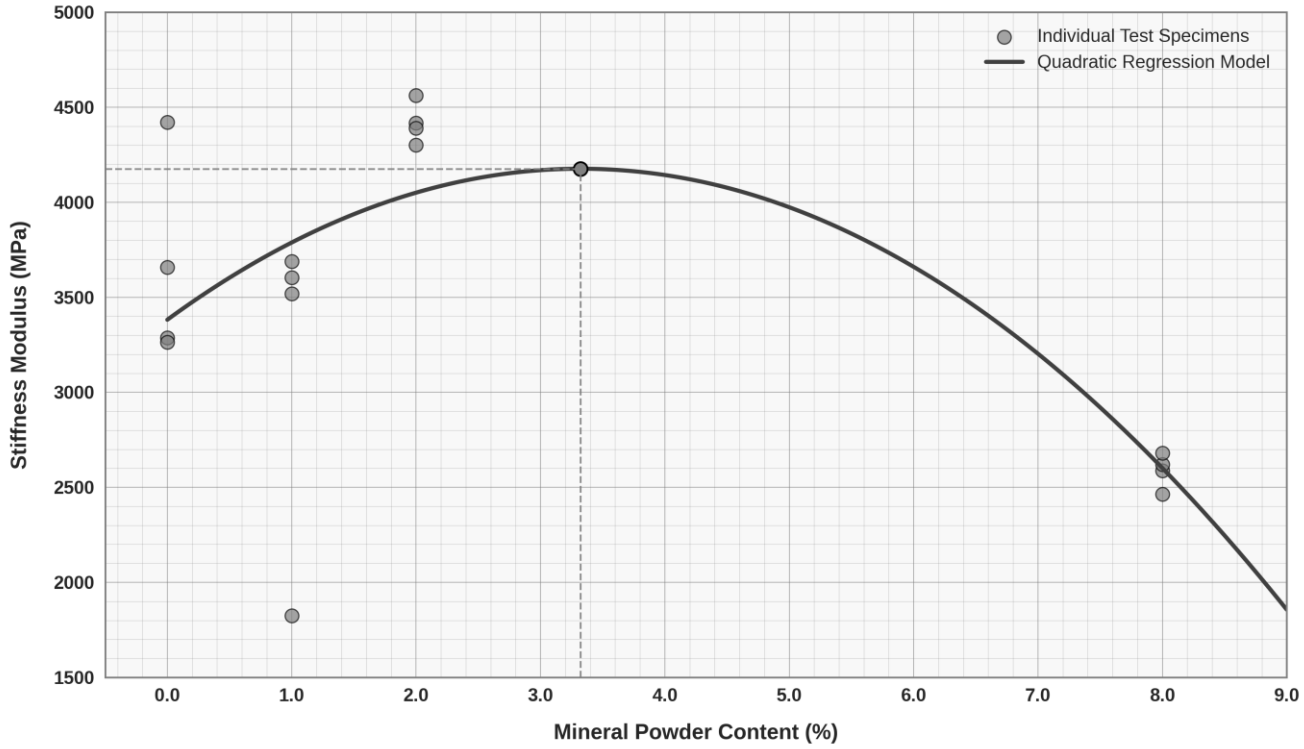


Figure 5 – Statistical model of the dependence of stiffness modulus on mineral filler content (based on the full dataset)

Discussion

Analysis of the obtained experimental data indicates that the partial replacement of Portland cement with inert mineral filler is an effective method for optimizing the composition of cold recycled mixtures. A comparison of Control Mixture A and Hybrid Mixture B shows that reducing the cement content from 2 % to 1 % with the simultaneous introduction of 1 % mineral filler not only did not lead to a loss of strength but also ensured its increase. This confirms the theoretical premises regarding the synergistic interaction of the dispersed phase components, where the mineral filler ensures dense packing of the mastic, and cement hydration products form a reinforcing skeleton within it.

At the same time, a detailed analysis of statistical indicators, particularly the coefficient of variation (C_v), reveals significant differences in the technological reliability of the investigated systems. Mixture B, despite high average indicators, demonstrated significant property heterogeneity (C_v), indicating the high sensitivity of this mix design to mixing quality and local variations in RAP properties. The presence of specimens with reduced characteristics in this series indicates the risk of forming zones with a binder deficit. Conversely, Mixture C, with an increased content of the dispersed phase, showed a minimal coefficient of variation (C_v = 3,0 %), which speaks to the high stability of the structure and the ability of the saturated mastic to level out defects in the raw material.

An integral assessment of physico-mechanical properties through calculated coefficients allows for a deeper understanding of the nature of material behavior. Calculation of the specific cement efficiency (A_f) showed that in Hybrid Mixture B, the binder works more than twice as effectively as in the purely cementitious system A. Furthermore, analysis of the deformability coefficient (K_d) revealed that Mixture C, possessing maximum strength, is characterized by the lowest elasticity, creating risks of brittle failure at low temperatures. Mixture B, on the contrary, demonstrates the most balanced combination of strength and deformability, which is critically important for ensuring pavement cracking resistance.

Particular attention should be paid to the role of the mineral skeleton, which was clearly manifested in the analysis of the results for Mixture D. The critical reduction in physico-mechanical characteristics upon increasing the RAP proportion to 60 % and raising the filler content is explained by the effect of structural oversaturation. The excess volume of mastic led to the separation of coarse aggregate particles, disruption of "stone-on-stone" contacts, and loss of the internal stability of the skeleton. This confirms the necessity of mix design based not only on the principle of dense packing but also taking into account the volumetric parameters of the aggregate skeleton.

Summarizing the research results, it can be concluded that the traditional design approach oriented exclusively toward maximizing strength is not optimal for cold recycled mixtures. A transition to a new mix design concept is necessary, based on finding a balance between three factors: the structural strength of the skeleton; the elasticity of the binder mastic; and the technological reliability (homogeneity) of the material. The development of a comprehensive design methodology that considers these criteria and allows predicting the operational behavior of the mixture at the selection stage will be the subject of further research by the authors.

Conclusion

Based on the conducted experimental studies, mathematical modeling, and theoretical analysis of structure formation processes in cold recycled mixtures, the following conclusions have been formulated:

It has been experimentally confirmed that the partial replacement of Portland cement with inert mineral filler is an effective way to optimize material properties. The mixture with a combined filler (1 % cement + 1 % mineral filler) demonstrated an 8,5 % increase in strength compared to the control mixture with pure cement (2 %), while the specific binder efficiency (A_f) increased by more than two times. This proves that the dense packing of the mastic plays a role no less significant than hydration hardening.

It was established that the dependence of the stiffness modulus on the dispersed filler content is non-linear and is described by a second-order polynomial model. The optimal filler content was calculated to be 3,32 %, corresponding to the maximum material stiffness. Exceeding this threshold leads to an "oversaturation" effect and a reduction in physico-mechanical characteristics, which was confirmed by the decline in properties of the mixture with 8 % filler.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-3-12

It is proven that a mechanical increase in the proportion of Reclaimed Asphalt Pavement (up to 60 %) without considering the volumetric parameters of the skeleton leads to a critical degradation of material properties. The excess volume of mastic causes the separation of coarse aggregate particles, disrupting "stone-on-stone" contacts, which confirms the necessity of applying gradation design methods to ensure shear stability.

Comparative analysis revealed a contradiction between strength and operational reliability. Mixtures with high binder content (Type C) possess high homogeneity (C_v = 3,0 %) but low deformability (K_d = 0,338), creating a risk of brittle failure. Optimized economical mixtures (Type B) possess high elasticity (K_d=0,484) but low technological reliability (C_v=34,3 %) due to sensitivity to RAP heterogeneity.

The results of the work justify the necessity of transitioning from simple strength-based design criteria to a comprehensive methodology that considers the balance of three factors: the structural strength of the skeleton, the elasticity of the mastic, and technological homogeneity.

References

1. Sustainable Cold Mix Asphalt: A Comprehensive Review of Mechanical Innovations, Circular Economy Integration, Field Performance, and Decarbonization Pathways / M. D. Malik, Y. Chen, J. Mu, R. Dong // Materials. – 2025. – Vol. 18, № 23. – P. 5452. – DOI: 10.3390/ma18235452.
2. A Comprehensive Overview of the Utilization of Recycled Waste Materials and Technologies in Asphalt Pavements: Towards Environmental and Sustainable Low-Carbon Roads / N. S. A. Yaro, M. H. Sutanto, L. Baloo [et al.] // Processes. – 2023. – Vol. 11, № 7. – P. 2095. – DOI: 10.3390/pr11072095.
3. Optimizing decarbonation and sustainability of concrete pavement: A case study / B. Lei, L. Kong, Y. Guo [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2024. – Vol. 21, № 7. – P. e03574. – DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03574.
4. Veren'ko, V. A. Dorozhnye kompozitnye materialy: Struktura i mekhanicheskie svojstva / V. A. Veren'ko. – Minsk : Nauka i tekhnika, 1993. – 245 s.
5. Structure Formation and Properties of Concrete Based on Organic Hydraulic Binders / B. M. Khroustalev, U. A. Veranko, V. V. Zankavich [et al.] // Science and Technique. – 2020. – Vol. 19, № 3. – P. 181–194. – DOI: 10.21122/2227-1031-2020-19-3-181-194.
6. Dołżycki, B. Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements / B. Dołżycki, P. Jaskula // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2019. – Vol. 6, № 4. – DOI: 10.1016/j.jtte.2019.02.002.
7. Yang, Y. Performance and Microstructure of Cold Recycled Mixes Using Asphalt Emulsion with Different Contents of Cement / Y. Yang, Y. Yang, B. Qian // Materials. – 2019. – Vol. 12, № 16. – P. 2548. – DOI: 10.3390/ma12162548.
8. Strength Mechanism and Influence Factors for Cold Recycled Asphalt Mixture / T. Ma, H. Wang, Y. Zhao [et al.] // Advances in Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 2015. – Article ID 181853. – 10 p. – DOI: 10.1155/2015/181853.
9. Lin, J. T. Microstructure and performance characteristics of cold recycled asphalt mixtures / J. T. Lin, Y. Xiao // Eco-Efficient Pavement Construction Materials / Woodhead Publishing. – 2020. – P. 51–76. – DOI: 10.1016/B978-0-12-818981-8.00004-7.
10. Iwański, M. Laboratory Study on Mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology / M. Iwański, A. Chomicz-Kowalska // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 57. – P. 433–442. – DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.056.
11. Xu, W. Mechanical Behavior Investigation of Reclaimed Asphalt Aggregate Concrete in a Cold Region / W. Xu, W. Li, Y. Ji // Materials. – 2021. – Vol. 14, № 15. – P. 4101. – DOI: 10.3390/ma14154101.
12. Dolzycki, B. The influence of combination of binding agents on fatigue properties of deep cold in-place recycled mixtures in Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT) / B. Dolzycki, C. Szydlowski, M. Jaczewski // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 239. – Article 117825. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117825.
13. A Balanced Mix Design Method for Selecting the Optimum Binder Content of Cold In-Place Recycling Asphalt Mixtures / A. Saidi, A. Ali, W. Lein, Y. Mehta // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2019. – Vol. 2673, № 3. – DOI: 10.1177/0361198119835806.
14. Influence of different aged RAPs on the long-term performance of emulsified asphalt cold recycled mixture / C. Zhu, H. Zhang, Q. Li [et al.] // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 458. – Article 139680. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139680.
15. Gradation and Performance Research of Cold Recycled Mixture / H. Yao, L. Li, H. Xie [et al.] // Road Pavement and Material Characterization, Modeling, and Maintenance. – 2012. – P. 148. – DOI: 10.1061/47624(403)1.
16. Jaczewski, M. Preliminary study of linear viscoelasticity limits of cold recycled mixtures determined in Simple Performance Tester (SPT) / M. Jaczewski, C. Szydlowski, B. Dolzycki // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 357. – Article 129432. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129432.
17. Behera, A. Linear viscoelastic response of emulsified-asphalt cold recycled mixtures / A. Behera, V. T. Thushara, J. M. Krishnan // Mechanics of Time-Dependent Materials. – 2024. – Vol. 28. – P. 3157–3181. – DOI: 10.1007/s11043-024-09724-1.
18. Long-term performance and microstructure of asphalt emulsion cold recycled mixture with different gradations / C. Zhu, H. Zhang, L. Huang, C. Wei // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 215. – P. 944–951. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.103.
19. Study on the strength composition mechanism and interface microscopic characteristics of cold recycling asphalt mixture / Z. Dong, G. Xu, S. Xu [et al.] // Frontiers in Materials. – 2024. – Vol. 11. – Article 1397335. – DOI: 10.3389/fmats.2024.1397335.
20. Rebinder, P. A. Fiziko-himicheskaya mekhanika / P. A. Rebinder. – M. : Znanie, 1958. – 64 s.
21. Afanasenko, A. A. Optimizaciya zernovogo sostava asfal'tobetonnyh smesej s cel'yu obespecheniya maksimal'noj plotnosti / A. A. Afanasenko // Nauka i tekhnika. – 2024. – T. 23, № 3. – S. 235–241. – DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241.
22. Dolgovechnye asfal'tobetonnye pokrytiya avtomobil'nyh dorog, mostov i ulic / V. A. Veren'ko, V. V. Zankovich, A. V. Ladyshev [i dr.]. – Mn. : Art Dizajn, 2015. – 296 s.
23. JTG E42-2005. Test Methods of Aggregate for Highway Engineering = **公路工程集料**试验规程. – Introduced 2005-06-01. – Beijing : China Communications Press, 2005. – 285 p.
24. JTG E20-2011. Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering = **公路工程**沥青及沥青混合料试验规程. – Introduced 2011- 12-01. – Beijing : China Communications Press, 2011. – 369 p.
25. JTG F40-2004. Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements = **公路**沥青路面施工技术规范. – Introduced 2004-10-01. – Beijing : China Communications Press, 2004. – 168 p.
26. GB 175-2023. Common Portland Cement = **通用硅酸**盐水泥: National Standard of the People's Republic of China. – Introduced 2024-06-01. – Beijing : State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2023. – 16 p.

Список цитированных источников

1. Sustainable Cold Mix Asphalt: A Comprehensive Review of Mechanical Innovations, Circular Economy Integration, Field Performance, and Decarbonization Pathways / M. D. Malik, Y. Chen, J. Mu, R. Dong // Materials. – 2025. – Vol. 18, № 23. – P. 5452. – DOI: 10.3390/ma18235452.
2. A Comprehensive Overview of the Utilization of Recycled Waste Materials and Technologies in Asphalt Pavements: Towards Environmental and Sustainable Low-Carbon Roads / N. S. A. Yaro, M. H. Sutanto, L. Baloo [et al.] // Processes. – 2023. – Vol. 11, № 7. – P. 2095. – DOI: 10.3390/pr11072095.
3. Optimizing decarbonation and sustainability of concrete pavement: A case study / B. Lei, L. Kong, Y. Guo [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2024. – Vol. 21, № 7. – P. e03574. – DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03574.

4. Веренько, В. А. Дорожные композитные материалы: Структура и механические свойства / В. А. Веренько. – Минск : Наука и техника, 1993. – 245 с.
5. Structure Formation and Properties of Concrete Based on Organic Hydraulic Binders / B. M. Khroustalev, U. A. Veranko, V. V. Zankavich [et al.] // Science and Technique. – 2020. – Vol. 19, № 3. – P. 181–194. – DOI: 10.21122/2227-1031-2020-19-3-181-194.
6. Dołżycki, B. Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements / B. Dołżycki, P. Jaskula // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2019. – Vol. 6, № 4. – DOI: 10.1016/j.jtte.2019.02.002.
7. Yang, Y. Performance and Microstructure of Cold Recycled Mixes Using Asphalt Emulsion with Different Contents of Cement / Y. Yang, Y. Yang, B. Qian // Materials. – 2019. – Vol. 12, № 16. – P. 2548. – DOI: 10.3390/ma12162548.
8. Strength Mechanism and Influence Factors for Cold Recycled Asphalt Mixture / T. Ma, H. Wang, Y. Zhao [et al.] // Advances in Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 2015. – Article ID 181853. – 10 p. – DOI: 10.1155/2015/181853.
9. Lin, J. T. Microstructure and performance characteristics of cold recycled asphalt mixtures / J. T. Lin, Y. Xiao // Eco-Efficient Pavement Construction Materials / Woodhead Publishing. – 2020. – P. 51–76. – DOI: 10.1016/B978-0-12-818981-8.00004-7.
10. Iwański, M. Laboratory Study on Mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology / M. Iwański, A. Chomicz-Kowalska // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 57. – P. 433–442. – DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.056.
11. Xu, W. Mechanical Behavior Investigation of Reclaimed Asphalt Aggregate Concrete in a Cold Region / W. Xu, W. Li, Y. Ji // Materials. – 2021. – Vol. 14, № 15. – P. 4101. – DOI: 10.3390/ma14154101.
12. Dolzycki, B. The influence of combination of binding agents on fatigue properties of deep cold in-place recycled mixtures in Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT) / B. Dolzycki, C. Szydlowski, M. Jaczewski // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 239. – Article 117825. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117825.
13. A Balanced Mix Design Method for Selecting the Optimum Binder Content of Cold In-Place Recycling Asphalt Mixtures / A. Saidi, A. Ali, W. Lein, Y. Mehta // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2019. – Vol. 2673, № 3. – DOI: 10.1177/0361198119835806.
14. Influence of different aged RAPs on the long-term performance of emulsified asphalt cold recycled mixture / C. Zhu, H. Zhang, Q. Li [et al.] // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 458. – Article 139680. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139680.
15. Gradation and Performance Research of Cold Recycled Mixture / H. Yao, L. Li, H. Xie [et al.] // Road Pavement and Material Characterization, Modeling, and Maintenance. – 2012. – P. 148. – DOI: 10.1061/47624(403)1.
16. Jaczewski, M. Preliminary study of linear viscoelasticity limits of cold recycled mixtures determined in Simple Performance Tester (SPT) / M. Jaczewski, C. Szydlowski, B. Dolzycki // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 357. – Article 129432. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129432.
17. Behera, A. Linear viscoelastic response of emulsified-asphalt cold recycled mixtures / A. Behera, V. T. Thushara, J. M. Krishnan // Mechanics of Time-Dependent Materials. – 2024. – Vol. 28. – P. 3157–3181. – DOI: 10.1007/s11043-024-09724-1.
18. Long-term performance and microstructure of asphalt emulsion cold recycled mixture with different gradations / C. Zhu, H. Zhang, L. Huang, C. Wei // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 215. – P. 944–951. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.103.
19. Study on the strength composition mechanism and interface microscopic characteristics of cold recycling asphalt mixture / Z. Dong, G. Xu, S. Xu [et al.] // Frontiers in Materials. – 2024. – Vol. 11. – Article 1397335. – DOI: 10.3389/fmats.2024.1397335.
20. Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика / П. А. Ребиндер. – М. : Знание, 1958. – 64 с.
21. Афанасенко, А. А. Оптимизация зернового состава асфальтобетонных смесей с целью обеспечения максимальной плотности / А. А. Афанасенко // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 3. – С. 235–241. – DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241.
22. Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / В. А. Веренько, В. В. Занкович, А. В. Ладышев [и др.]. – Мн. : Арт Дизайн, 2015. – 296 с.
23. JTG E42-2005. Test Methods of Aggregate for Highway Engineering = 公路工程集料试验规程. – Introduced 2005-06-01. – Beijing : China Communications Press, 2005. – 285 p.
24. JTG E20-2011. Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering = 公路工程沥青及沥青混合料试验规程. – Introduced 2011- 12-01. – Beijing : China Communications Press, 2011. – 369 p.
25. JTG F40-2004. Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements = 公路沥青路面施工技术规范. – Introduced 2004-10-01. – Beijing : China Communications Press, 2004. – 168 p.
26. GB 175-2023. Common Portland Cement = 通用硅酸盐水泥: National Standard of the People's Republic of China. – Introduced 2024-06-01. – Beijing : State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2023. – 16 p.

Материал поступил 09.01.2026, одобрен 08.02.2026, принят к публикации 09.02.2026

УДК 620.179.17

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ БЕТОНА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ТВЕРДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Е. С. Боровкова

Старший преподаватель кафедры физики, УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: e.borovkova@psu.by

Реферат

Контроль за структурообразованием бетона на стадии твердения важен, так как эта стадия в значительной степени определяет его конечные свойства. В этой области исследований все более широко используют метод акустической эмиссии, который позволяет регистрировать внутреннюю структурную активность бетона в процессе его твердения [1]. В материале данной статьи приведены экспериментально выявленные закономерности взаимосвязи кинетики структурообразования и роста прочности твердеющего бетона с изменениями сигналов акустической эмиссии: числа импульсов акустической эмиссии, а также длительности периода формирования коагуляционной структуры цементного теста в бетоне и производной величины – тангенса угла наклона числа импульсов в начальный период интенсивного упрочнения структуры твердеющего бетона.

Экспериментальные исследования проводились с использованием бетонных смесей, традиционного тяжелого и мелкозернистого бетона, а также содержащего минеральные и химические добавки, и стальную фибру. В процессе твердения бетона непрерывно регистрировали изменения сигналов акустической эмиссии. По результатам проведенного исследования были выявлены информативные параметры импульсов акустико-эмиссионных данных, которые коррелируют с прочностью бетона. С практических позиций применения результатов этих исследований обеспечивается возможность прогнозной оценки прочности твердеющего бетона в произвольном промежуточном возрасте, например, для распалубки сборных изделий или съема опалубки монолитных конструкций.

По результатам исследований, приведенных в материале статьи, предложена методика контроля прочности на сжатие бетона в раннем возрасте с использованием метода акустической эмиссии. Это дает возможность использовать в практике строительства неразрушающий метод контроля, который позволяет проводить мониторинг перманентно, дистанционно, без присутствия оператора, включая применение в труднодоступных местах разнообразных строительных конструкций.

Ключевые слова: бетон, твердение, акустическая эмиссия, контроль, структурообразование, структура, прочность.

ASSESSMENT OF CONCRETE STRENGTH DURING ITS HARDENING USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

E. S. Borovkova

Abstract

Control over the structure formation of concrete in the hardening stage is important, since this stage largely determines its final properties. In this area of research, the method of acoustic emission is increasingly used, which makes it possible to record the internal structural activity of concrete during its hardening [1]. In the material of this article, experimentally identified patterns of the relationship between the kinetics of structure formation and the growth of the hardening concrete strength with changes in the acoustic emission signals: acoustic emission burst count, as well as the duration of the period of formation of the coagulation structure of the cement dough in concrete and the derivative value - the tangent of the angle of inclination of the number of pulses in the initial period of intensive strengthening of the hardening concrete structure.

Experimental studies were carried out using concrete mixtures, traditional heavy and fine-grained concrete, as well as containing mineral and chemical additives, and steel fiber. Changes in acoustic emission signals were continuously recorded during concrete hardening. The results of the study revealed informative parameters of acoustic emission data pulses that correlate with concrete strength. From the practical point of view of applying the results of these studies, it is possible to predict the strength of hardening concrete at an arbitrary intermediate age, for example, for stripping prefabricated products or removing the formwork of monolithic structures.

Based on the results of the studies presented in the article, a method for monitoring the compressive strength of concrete at an early age using the acoustic emission method was proposed. This makes it possible to use a non-destructive control method in construction practice, which allows monitoring permanently, remotely, without the presence of an operator, including the use of various building structures in hard-to-reach places.

Keywords: concrete, hardening, acoustic emission, control, structure formation, structure, strength.

Введение

Одной из важнейших задач строительной отрасли является обеспечение эксплуатационной надежности строительных конструкций, в том числе за счет постоянного совершенствования технологии бетона и его использовании в строительном производстве. Бетон, являясь базовым строительным материалом, характеризуется тем, что претерпевает структурные изменения на протяжении всего «срока службы». В этой связи мониторинг ранней стадии его твердения очень важен, так как этот период в значительной степени предопределяет конечные свойства бетона [2]. В области мониторинга стадии твердения бетона все шире используется метод акустической эмиссии, который позволяет регистрировать при этом его внутреннюю структурную активность.

Кроме этого, данный метод позволяет фиксировать различные виды акустической эмиссии, с учетом внешних воздействий [3]:

– вызванных приложенными механическими нагрузками к материалу;

– вызванных протеканием химических реакций и разнообразных коррозионных процессов;

– вызванных движением звуковых волн при перемагничивании материалов;

– вызванных утечкой при протекании газа и жидкости через отверстие в объекте испытаний;

– возникающих из-за трения поверхностей различных тел;

– связанных с фазовыми превращениями в различных материалах и веществах;

– возникающих в результате нелинейного взаимодействия излучения с веществами и материалами.

Особый интерес исследователей вызывает то, что метод акустической эмиссии позволяет регистрировать акустические сигналы, излучаемые самим твердеющим бетоном при формировании его структуры [4–7]. Считается, что данный метод является «пассивным

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-13-19

методом» неразрушающего контроля и позволяет контролировать прочность бетона в любом месте конструкции, на любой глубине и в труднодоступных местах [8].

В материале настоящей статьи приведены результаты авторских экспериментальных исследований, отражающие изменения сигналов акустической эмиссии, которые возникают и фиксируются при структурировании твердеющего цементного бетона. Каждый эксперимент включал испытания образцов двух – трех серий (серия из 3–4 образцов). Регистрация сигналов акустической эмиссии для каждого эксперимента проводилась непрерывно в течение от двух до семи суток.

В результате выполненных исследований обоснованы к применению информативные параметры акустико-эмиссионных данных, позволяющие прогнозировать прочность бетона как в процессе твердения, так и к проектному (28 суток) возрасту.

Материалы и методы исследования

При контроле за процессом твердения бетона методом акустической эмиссии использовали образцы-кубы (с ребром 100 мм и с ребром 200 мм), изготовленные вибрированием на лабораторной виброплощадке со стандартными характеристиками: амплитуда колебаний A ~ 0,5 мм и частота f ~ 50 Гц. Твердение первые 24 часа проходило в условиях гидроизоляции поверхности образцов, а после распалубки – в помещении лаборатории при температуре окружающей среды t ~ 20 ± 5 °С и влажности $\phi \geq 70$ %.

Для определения акустических параметров при структурировании бетона, были исследованы различные опытные образцы, характеристики и состав которых представлены в таблице 1. В состав всех образцов входили пластифицирующие добавки 1-ой группы (по СТБ 1112 – 98) в количестве 0,4 % от массы цемента. С целью установления возможного влияния «наличия – отсутствия» крупного заполнителя в бетоне на уровень сигналов акустической эмиссии в процессе реакций цемента с водой затворения, становления структуры и твердения (роста прочности) бетона были выполнены эксперименты с мелкозернистым (цементнопесчаным) бетоном составом (номер серии 5). С этой же целью исследовали составы бетона, приготовленные с наличием в них в составе ~ 11 % по массе цемента минеральной добавки в виде доменного гранулированного шлака молотого до удельной поверхности $S_{уд}$ ~ 450 м^2/кг (серии 3, 4) и стальной фибры (серия 6).

Таблица 1 – Характеристики и состав бетона опытных образцов

Номер серии	Количество Испытываемых образцов	Номинальный состав бетона, кг/м^3						Водоцементное отношение	Фактическая средняя плотность бетона, кг/м^3
		Цемент	Песок	Щебень	Вода	Шлак	Фибра, кг		
1	8	350	770	1100	175			0,50	2399
2	8	500	530	1200	190			0,38	2458
3	6	315	770	1100	175	35		0,50	2407
4	6	450	530	1200	190	50		0,39	2446
5	12	500	1500	–	225	–		0,45	2124
6	12	350	840	950	172		40	0,49	2374

Примечание – Во всех случаях бетонная смесь характеризовалась подвижностью марки П4. Для состава № 6 – до введения стальной фибры.

Для проведения измерений по регистрации сигналов акустической эмиссии в процессе твердения бетонных составов использовалась система A-Line DDM–1, производства компании ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ». Данная система представляет собой многоканальную модульную систему сбора и обработки акустико-эмиссионной информации распределенного типа с последовательным высокоскоростным цифровым каналом передачи данных. Акустико-эмиссионные комплексы данной серии состоят из центрального компьютера (блок сбора и обработки данных) и нескольких измерительных линий, объединяющих последовательно соединенные модули сбора и обработки акустико-эмиссионной информации [8]. Используемая система позволяет измерять:

- амплитуду сигнала акустической эмиссии;
- энергию акустической эмиссии (акустическая энергия, выделяемая в месте локальной перестройки структуры материала, переносимая волнами, возникающими в объекте [9]);
- время нарастания сигнала акустической эмиссии (временной интервал между началом регистрации импульса акустической эмиссии и моментом, при котором импульс достигает максимальной величины [9]);
- длительность сигнала акустической эмиссии;
- число выбросов акустической эмиссии;
- активность импульсов акустической эмиссии (число зарегистрированных событий акустической эмиссии за единицу времени [9]);
- время регистрации.

Акустико-эмиссионная система обеспечивает обработку, и отображение информации в режиме реального времени и сохраняет информацию для последующего анализа в цифровой форме. Ввиду того, что акустико-эмиссионная аппаратура работает только с электрическими сигналами, для трансформации колебаний электрического напряжения в акустические колебания и обратно используют пьезоэлектрические преобразователи. В экспериментальных исследованиях использовались полосовые преобразователи DIS 30-300 с полосой пропускания 30–300 кГц, производства компании ООО «Донские Измерительные Системы».

В ходе проведения экспериментов для создания акустического контакта между пьезоэлектрическим преобразователем и свежеприготовленной бетонной смесью, преобразователи через слой контактной жидкости устанавливали на стальной волновод и фиксировали магнитным держателем. В качестве контактной жидкости использовался литол. Волновод, представляющий собой стальную пластинку размером 90 × 50 × 2 мм сваренную сплошным круговым сварным швом со стальным стержнем диаметром 12 мм и длиной 100 мм, погружался в бетон до момента касания пластинкой состава [10]. При проведения экспериментальных исследований процесса твердения бетона (кубических образцов) использовался один пьезоэлектрический преобразователь и, следовательно, один волновод, который устанавливался в центре образца.

Для корреляции акустико-эмиссионных данных и прочности бетонных образцов, а также для дальнейшего анализа и определения прочностных характеристик свежеприготовленного бетона параллельно испытывали образцы на прочность при сжатии в возрасте: 1, 3, 7, 14 и на 28 сутки твердения. В таблице 2 приведены результаты экспериментальных исследований кинетики роста прочности бетона исследуемых составов.

Таблица 2 – Прочность исследуемого бетона

Номер серии по таблице 1	Прочность бетона (МПа) в возрасте, сут.:				
	1	3	7	14	28
1	12,5	23,0	30,6	34,2	41,9
2	21,2	43,6	48,8	52,7	61,5
3	11,6	21,0	29,1	32,2	40,9
4	17,1	31,3	40,5	44,9	56,9
5	11,6	34,1	38,0	40,6	47,4
6	15,9	40,1	46,2	47,5	52,5

Результаты экспериментов и их обобщение

Как показали исследования процесса твердения бетона приведенных составов, можно выделить временные интервалы, характеризующиеся изменениями параметров акустической эмиссии в соответствии с различными периодами структурообразования бетона [8]. Выделяют [11] три периода структурообразования: I-й период – индукционный период, т. е. начальный период гидролизно-гидратационного

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-13-19

взаимодействия цемента с водой затворения; II-й период – период схватывания, т. е. формирования коагуляционной структуры цементного теста; III-й период – период твердения, т. е. формирования кристаллогидратной структуры цементного камня в бетоне.

Сигналы акустической эмиссии в пределах первого периода (I) в основном связаны с активным развитием процесса массопереноса воды и составляющих деформаций в реагирующем цементном тесте, включая развитие конструкционной усадки [6, 12, 13]. Этому периоду характерно наличие значительного количества химически несвязанной воды.

Высокий коэффициентом затухания, низкая скорость акустического импульса приводят к снижению количества зарегистрированных импульсов либо к их полному отсутствию во втором (II) периоде [8], что отражает развитие процесса гидратации и полное отсутствие свободной воды к окончанию второго периода [11].

Переход от второго периода к третьему (III) характеризуется увеличением числа импульсов акустической эмиссии, и чем больше было зарегистрированных импульсов в этот период, тем выше конечная прочность бетона [2], т. к. это явление отражает процесс формирования кристаллогидратной структуры цементного камня в бетоне и, собственно, структуры бетона.

В таблице 3 приведены экспериментально установленные зависимости изменений параметров импульсов акустической эмиссии от времени твердения.

Из экспериментальных данных таблицы 3 следует, что общие закономерности изменений сигналов акустической эмиссии, характерные для бетона с крупным заполнителем, сохраняются и применительно к мелкозернистому бетону, а также с содержанием в составах минеральной добавки и стальной фибры.

Из графического отображения данных таблицы 3 видно, что для первой, третьей и шестой серии образцов характерно увеличение временных интервалов для первого индукционного периода и второго периода схватывания, что связано с большим водоцементным соотношением по сравнению с другими составами. Также для шестой серии образцов из фибробетона на третьем этапе (периоде твердения) активность импульсов акустической эмиссии выше, чем в образцах с отсутствием дисперсного армирования.

При анализе представленных в таблице 3 данных прослеживается общность тенденций взаимосвязи изменений сигналов акустической эмиссии твердеющего бетона всех исследуемых составов и уровнем прочности бетона. Также выявлена общая закономерность, заключающаяся в том, что чем короче время формирования коагуляционной структуры цементного теста в бетоне (второй этап на графических зависимостях), т. е. чем интенсивнее развивается процесс схватывания и чем плотнее коагуляционная структура к окончанию II-го периода твердения, тем выше прочность бетона к проектному возрасту.

На гистограммном рисунке 1 отражена выявленная тенденция взаимосвязи прочности на сжатие бетонных образцов в возрасте 28 суток от длительности второго периода структурообразования, установленной в процессе исследований.

Обработка всей совокупности результатов экспериментов позволила выявить непосредственную взаимозависимость между накоплением импульсов сигналов акустической эмиссии и ростом прочности бетона в процессе твердения, так как метод акустической эмиссии регистрирует активность, которая непосредственно связана с химико-физическими процессами, протекающими при взаимодействии цемента с водой затворения, структурообразовании и твердении бетона. По экспериментально полученным данным, приведенным, в таблице 3 в графической интерпретации, выявлена закономерная связь между числом импульсов акустической эмиссии и прочностью бетона, которой достигли образцы указанных составов за время наблюдения до испытаний. На вторые сутки зависимость числа импульсов акустической эмиссии от времени стала иметь «стабильный характер» и коррелировать с прочностью.

Экспериментами также выявлена закономерность взаимосвязи интенсивности изменений сигналов акустической эмиссии с переходом от II-го к III-му периоду взаимодействия цемента с водой, т. е. к переходу от сформировавшейся коагуляционной структуры цементного теста к формированию на ее фоне кристаллогидратной структуры твердеющего цементного камня. Этот период времени и развивающийся процесс твердения цемента адекватно характеризуются изменением угла наклона графической зависимости фиксируемых изменений сигналов акустической эмиссии. Установлена закономерность прямой взаимосвязи тангенса угла наклона данных графической зависимости и последующего роста прочности бетона: чем больше тангенс угла наклона, тем выше его прочность. Выявленная закономерность позволяет использовать ее для прогнозной оценки прочности бетона к проектному возрасту.

На основании вышеизложенного в качестве информативных параметров, коррелирующих с прочностью бетона в возрасте 28 суток выделены [8]:

– Δt – длительность второго периода;

– $tg(\alpha_{III})$ – тангенс угла наклона зависимости число импульсов акустической эмиссии в начальной стадии перехода от процесса схватывания к процессу твердения цементного теста, т. е. для третьего периода, отражающего процесс формирования кристаллогидратной структуры цементного камня в бетоне.

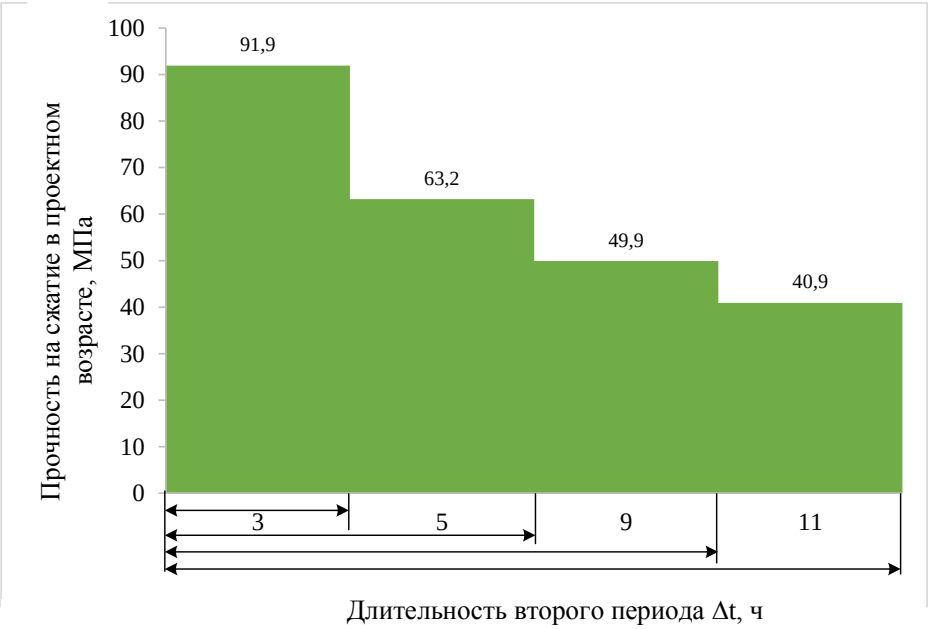
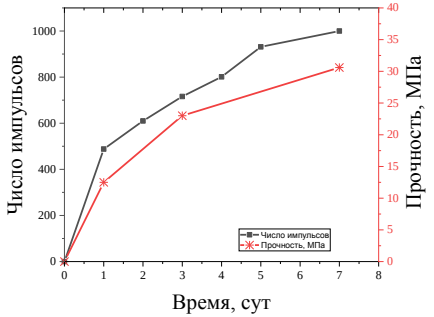
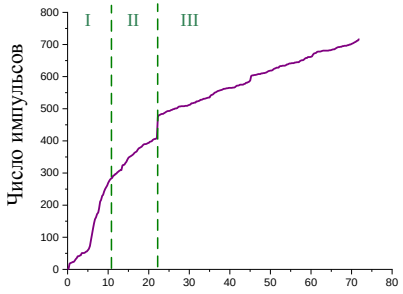
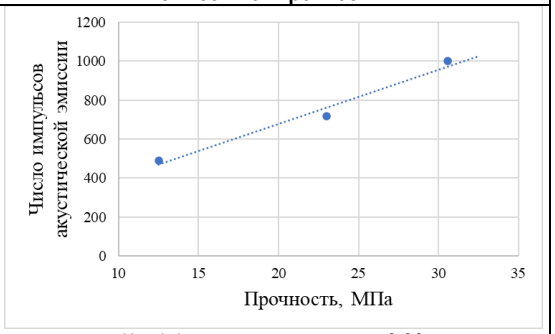
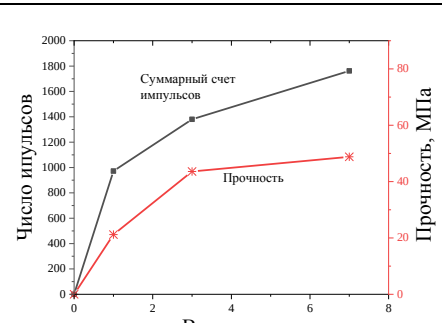
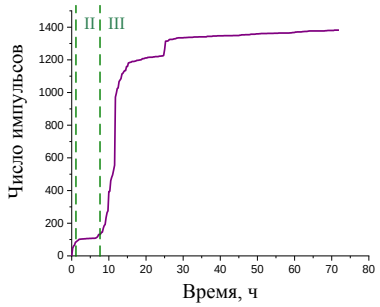
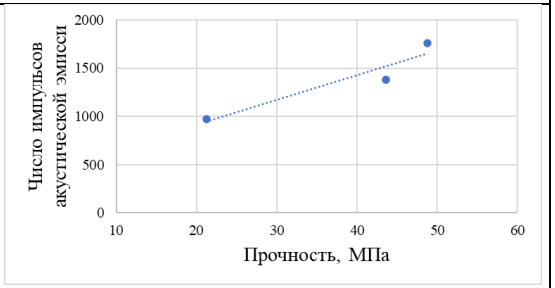
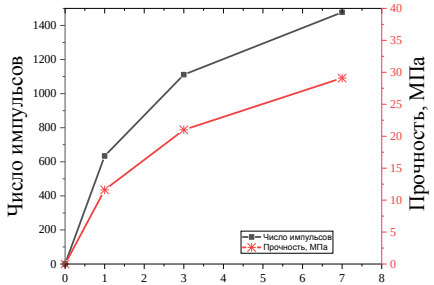
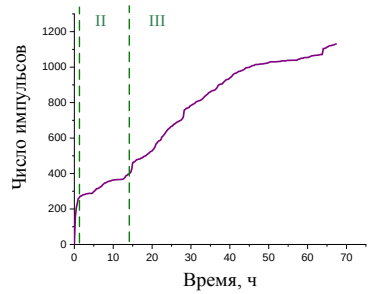
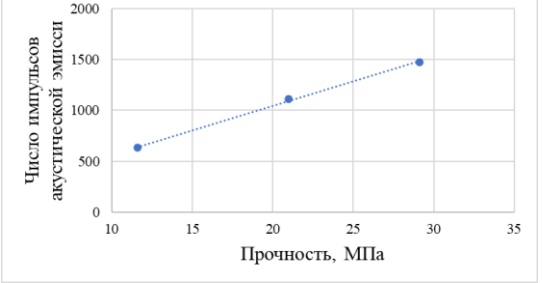


Рисунок 1 – Экспериментально выявленная тенденция взаимосвязи прочности бетона от длительности второго периода структурообразования в процессе твердения

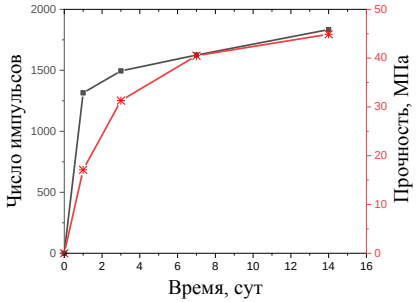
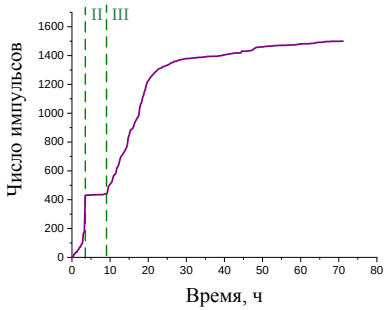
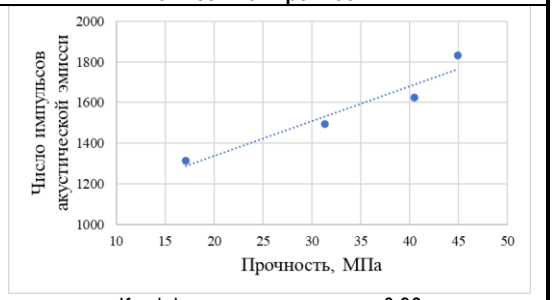
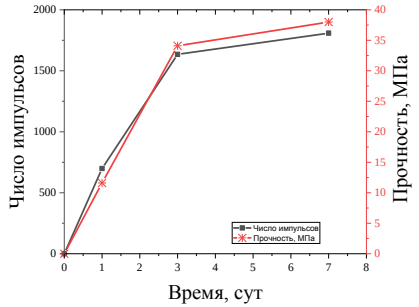
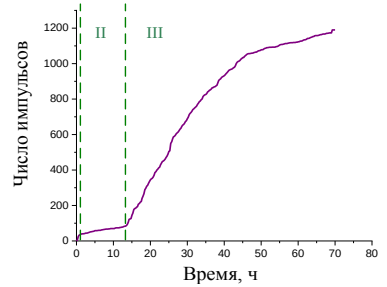
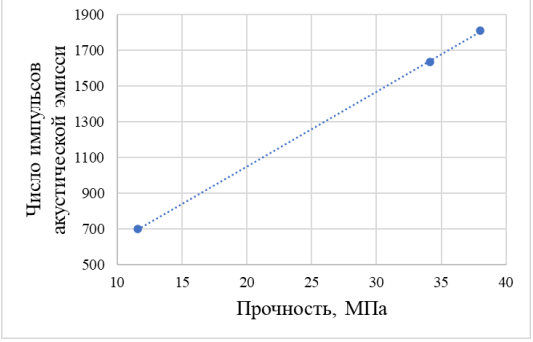
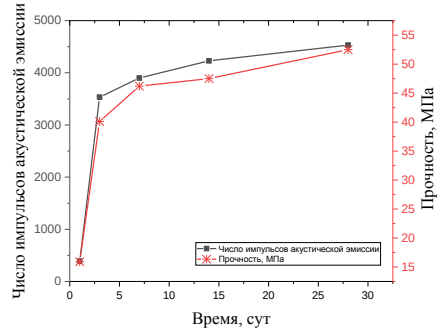
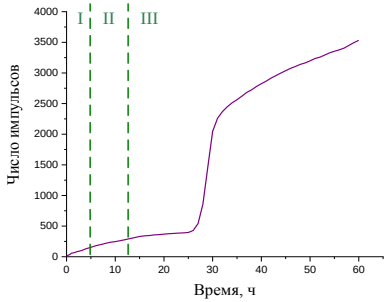
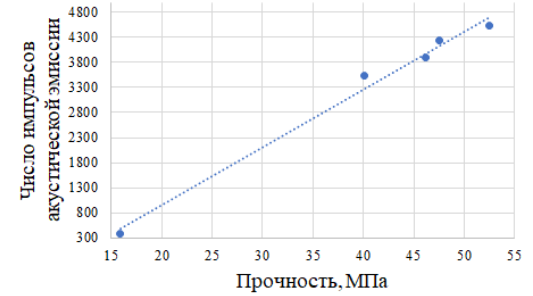
https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-13-19

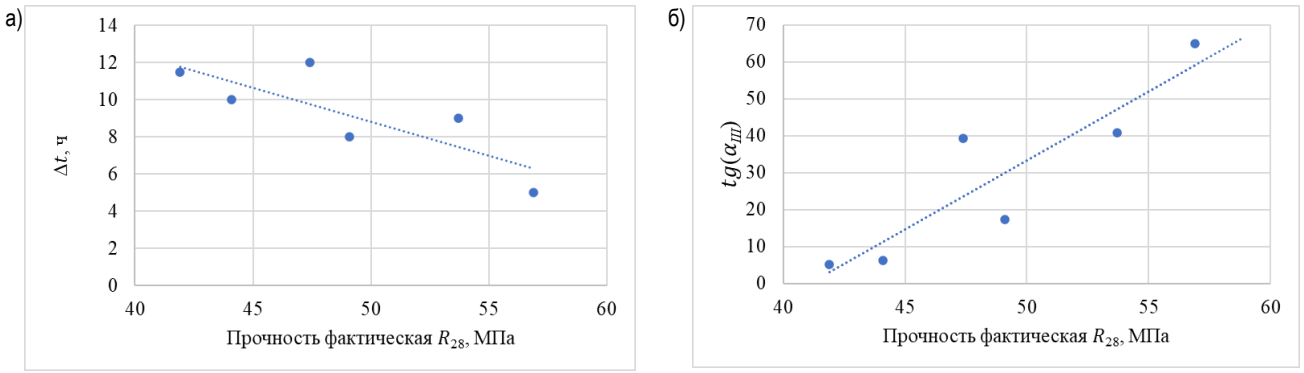
Строительство https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-13-19

Таблица 3 – Акустико-эмиссионный мониторинг твердения бетона

Номер серии	Число импульсов, прочность	Число импульсов в первые трое суток твердения	Взаимозависимость числа импульсов акустической эмиссии от прочности
1		 Тангенс угла наклона $tg(\alpha_{III})$ = 5,17 (имп/ч). Длительность второго периода Δt = 11,5 ч	 Коэффициент корреляции – 0,99
2		 Тангенс угла наклона $tg(\alpha_{III})$ = 81(имп/ч). Длительность второго периода Δt = 5 ч	 Коэффициент корреляции – 0,95
3		 Тангенс угла наклона $tg(\alpha_{III})$ = 20,5 (имп/ч). Длительность второго периода Δt = 11 ч	 Коэффициент корреляции – 0,97

Продолжение таблицы 3

Номер серии	Число импульсов, прочность	Число импульсов в первые трое суток твердения	Взаимозависимость числа импульсов акустической эмиссии от прочности
4		 Тангенс угла наклона tg(α$_{III}$) = 65 (имп/ч). Длительность второго периода Δt = 5 ч	 Коэффициент корреляции – 0,96
5		 Тангенс угла наклона tg(α$_{III}$) = 39,3 (имп/ч). Длительность второго периода Δt = 12 ч	 Коэффициент корреляции – 0,99
6		 Тангенс угла наклона tg(α$_{III}$) = 16,3 (имп/ч). Длительность второго периода Δt = 7,5 ч	 Коэффициент корреляции – 0,99



(а) длительности второго периода и (б) тангенса угла наклона для третьего периода его твердения

Рисунок 2 – Зависимость прочности бетона в возрасте 28 суток

На рисунке 2 приведена графическая интерпретация зависимости прочности бетона от величин параметров (Δt, $tg(\alpha_{III})$) для бетона исследуемых составов.

Анализ всей совокупности экспериментальных данных свидетельствует о возможности достоверной оценки методом акустической эмиссии прочности на сжатие бетона различных составов в процессе его твердения и ее уровня к проектному возрасту. Начиная с третьих суток, представленные зависимости имеют однозначную взаимосвязь. Этот вывод подтверждают высокие значения коэффициента корреляции между соотношением «число импульсов – прочность бетона» в достаточно широком диапазоне составов бетона и его прочности как в процессе твердения, так и к проектному (28 суток) возрасту. Коэффициент корреляции для зависимости числа импульсов акустической эмиссии от прочности варьируется от 0,96 до 0,99. Подобного рода зависимости, могут быть использованы в качестве градуировочных в процессе мониторинга бетонных и железобетонных конструкций с целью определения прочности бетона.

Установленная закономерность взаимосвязи между развитием процесса взаимодействия цемента с водой затворения и интенсивностью изменений импульсов акустической эмиссии позволяет выделить период времени, характеризующий становление коагуляционной структуры цементного теста, т. е. период его схватывания или продолжительность «II–го периода». При этом чем интенсивнее (что отражается в росте количества импульсов акустической эмиссии) развивается этот процесс, тем короче данный период времени.

Чем более упорядочена первичная (коагуляционная) структура цементного теста на стадии активного развития процесса гидратации цемента, тем плотнее (а в итоге – прочнее) будет структура затвердевшего цементного камня и бетона, что подтверждают результаты выполненных экспериментов. В частности, очевидна установленная закономерность: сокращение времени II-го периода при росте количества импульсов акустической эмиссии закономерно отражается в росте прочности бетона, что является одним из факторов, позволяющих оперативно прогнозировать ее величину к проектному возрасту бетона.

Заключение

В структурно неоднородных материалах, таких как бетон, при распространении акустических волн возникают сложные процессы дисперсии, дифракции, отражения и преломления. Поэтому любые изменения в структуре, а, как следствие, энергетических и силовых характеристик, повлекут за собой изменения акустического сигнала [2]. На всех трех периодах структурирования цементного камня в бетоне и собственно бетона (гидролизно-индукционного, схватывания, твердения) наблюдаются изменения акустических характеристик (амплитуд, числа импульсов акустической эмиссии), по которым, как установлено экспериментально, можно проследить поэтапный переход в развитии процесса твердения цементного бетона. А на этом основании контролировать как кинетику роста прочности, так и прочность бетона в проектном (28 суток) возрасте.

При этом акустико-эмиссионный метод контроля позволяет прогнозировать и наблюдать за приращением прочности бетона в монолитных, включая массивные и густоармированные конструкции. В результате исследований установлено, что метод акустической эмиссии позволяет в режиме реального времени наблюдать за процессом набора прочности бетона, что обеспечивается за счет присущей ему высокой чувствительности. Поэтому его можно использовать в условиях строительных площадок, включая труднодоступные места, где контроль традиционными методами затруднителен или невозможен.

Список цитированных источников

1. Continuous AE monitoring of fresh concrete / S. N. Iliopoulos, E. Dzaye, Y. El Khattabi [et al.] // Progress in Acoustic Emission XVIII: proc. of 8th International Conf. on Acoustic Emission – IIIAE 2016, Tokyo, Japan, 5-9 December 2016. – Tokyo, 2016. – P. 293–298.
2. Сагайдак, А. И. Определение прочностных характеристик бетона при его твердении с помощью метода акустической эмиссии / А. И. Сагайдак, Е. С. Боровкова // Современные вопросы механики сплошных сред. – 2021. – С. 98–108.
3. Кузнецов, Н.С. Теория и практика неразрушающего контроля изделий с помощью акустической эмиссии / Н. С. Кузнецов. – М. : Машиностроение, 1998. – 96 с.
4. Сагайдак, А. И. Прогнозирование прочности бетона в процессе его твердения при помощи метода акустической эмиссии / А. И. Сагайдак, В. В. Бардаков // Дефектоскопия. – 2017. – № 6. – С. 40–43.
5. Hodulášková, M. The application of acoustic emission technique to monitor the early setting process of cement pastes / M. Hodulášková, L. Topolář, B. Kucharczyková // MATEC Web of Conferences. – 2019. – 4 p.
6. Wave-based sensor to monitor the setting of fresh concrete / P. Rizzo, J. M. Vandenbossche, S. Nassiri, X. Ni A Solitary // Sensors. – 2014. – No. 14. – P. 12568–12584.
7. Shen, G. Advances in Acoustic Emission Technology / G. Shen, J. Zhang, Zh Wu // Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission. – 2019. – P. 41–53.
8. Сагайдак, А. И. Разработка методики контроля и прогноза прочности бетона в раннем возрасте методом акустической эмиссии / А. И. Сагайдак, В. В. Бардаков, Е. С. Боровкова // Бетон и железобетон. Строительные материалы и изделия. – 2023. – № 1 (615). – С. 33–42. – DOI: 10.37538/0005-9889-2023-1(615)-33-42.
9. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения : ГОСТ Р 55045—2012 ; переиздан 12.20218. – М. : Стандартинформ, 2019. – 12 с.
10. Borovkova, E. Monitoring of fibroblast at an early age by the method of acoustic emission / E. Borovkova, D. Shabanov // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2024. – № 1 (36). – С. 34–38. – DOI: 10.52928/2070-1683-2024-36-1-34-38.
11. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.
12. Acoustic emission characterisation of calcium aluminate cement hydration at an early stage / T. Chotard, J. Smith, A. Rotureau [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2003. – No. 23. – P. 387–398.
13. Early-age acoustic emission measurements in hydrating cement paste: Evidence for cavitation during solidification due to self-desiccation / P. Lura, J. Couch, M. O. Jensen, J. Weiss // Cement and Concrete Research. – Vol. 39, № 10. – 2009. – P. 861–867.
14. Муравин, Г. Б. Исследование акустической эмиссии твердеющего бетона / Г. Б. Муравин, Г. С. Павловская, А. Ф. Щуров // Дефектоскопия. – 1984. – № 10. – С. 77–81.
15. Evin, D. D. Study on mechanical acoustic emission sources in fresh concrete / D. D. Evin, Geert De Schutter, G. Dimitrios // Arhives of civiland mechanic alengineering. – 2018. – № 18. – P. 742–754.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-13-19

16. Ohtsu, M. Advanced Testing of Cement-Based Materials during Setting and Hardening / M. Ohtsu // Final Report of RILEM TC 185-ATC / ed.: H. W. Reinhardt, C. U. Grosse. – Bagneux : RILEM Publications SARL, 2005. – 21 p.
17. Van Den Abeele, K. Non destructive online evalution of concrete hardening using acoustic emission and harmonic wave spectroscopy / K. Van Den Abeele, G. De Schutter, M. Wevers // ECNDT: proc. of 9th European Conference on NDT, Berlin (Germany), September 2006. – Berlin, 2006. – 9 p.
18. Aggelis, D. G. Wave dispersion and attenuation in fresh mortar: theoretical predictions vs. experimental results / D. G. Aggelis, D. Polyzos, T. P. Philippidis // Journal of the Mechanics and Physics of solids. – 2005. – Vol. 53, № 4. – P. 857–883.
19. Dzaye, E. D. Study on mechanical acoustic emission sources in fresh concrete / E. D. Dzaye, G. D. Schutter, D. G. Aggelis // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2018. – No. 18 – P. 242–254. – DOI: 10.1016/j.acme.2017.12.004.
20. Active and passive monitoring of the early hydration process in concrete using linear and nonlinear acoustics / Van Den Abeele, K. Desadeleer, W. De Schutter, G. & Wevers // Cement and Concrete. Research. – 2009. – No. 39. – P. 426–432.
21. Cement and concrete research early-age elastic properties of cement-based materials as a function of decreasing moisture content / C. Di Bella, M. Griffa, T. J. Ulrich, P. Lura // Cement and Concrete Research. – 2016. – No. 89. – P. 87–96. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.08.001.
22. Slowik, V. Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value / V. Slowik, M. Schmidt, R. Fritzsch // Cement and Concrete Composites. – 2008. – No. 30. – P. 557–565.
23. Advanced Analysis of Acoustic Emission Parameters during the Concrete Hardening for Long Time / L. Pazdera, L. Topolar, V. Bilek [et al.] // e-Journal of Nondestructive Testing: proc. of 11th European Conference on Non-Destructive Testing, Prague, Czech Republic, 6–10 Oct. 2014. – Prague, 2014. – Vol. 19 (12). – P. 3255–3263. – URL: https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=16640 (дата обращения: 17.03.2026).
24. Мониторинг структурного состояния цементных систем по параметрам сигналов акустической эмиссии и тензометрии / Д. Н. Шабанов, А. Н. Ягубкин, Е. С. Боровкова, Е. А. Трамбицкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. Строительные материалы. – 2019. – № 16. – С. 30–34.
25. Боровкова, Е. С. Физические свойства структурных изменений в бетоне / Е. С. Боровкова, Д. Н. Шабанов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. Строительство и архитектура. – 2021. – № 8. – С. 39–42.

References

1. Continuous AE monitoring of fresh concrete / S. N. Iliopoulos, E. Dzaye, Y. El Khattabi [et al.] // Progress in Acoustic Emission XVIII: proc. of 8th International Conf. on Acoustic Emission – IIIAE 2016, Tokyo, Japan, 5-9 December 2016. – Tokyo, 2016. – P. 293–298.
2. Sagajdak, A. I. Opredelenie prochnostnyh harakteristik betona pri ego tverdenii s pomoshch'yu metoda akusticheskoj emissii / A. I. Sagajdak, E. S. Borovkova // Sovremennye voprosy mekhaniki sploshnyh sred. – 2021. – S. 98–108.
3. Kuznecov, N.S. Teoriya i praktika nerazrushayushchego kontrolya izdelij s pomoshch'yu akusticheskoj emissii / N. S. Kuznecov. – M. : Mashinostroenie, 1998. – 96 s.
4. Sagajdak, A. I. Prognozirovanie prochnosti betona v processe ego tverdeniya pri pomoshchi metoda akusticheskoj emissii / A. I. Sagajdak, V. V. Bardakov // Defektoskopiya. – 2017. – № 6. – S. 40–43.
5. Hodulláková, M. The application of acoustic emission technique to monitor the early setting process of cement pastes / M. Hodulláková, L. Topolář, B. Kucharczyková // MATEC Web of Conferences. – 2019. – 4 r.
6. Wave-based sensor to monitor the setting of fresh concrete / P. Rizzo, J. M. Vandenbossche, S. Nassiri, X. Ni A Solitary // Sensors. – 2014. – No. 14. – R. 12568–12584.
7. Shen, G. Advances in Acoustic Emission Technology / G. Shen, J. Zhang, Zh Wu // Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission. – 2019. – R. 41–53.
8. Sagajdak, A. I. Razrabotka metodiki kontrolya i prognoza prochnosti betona v rannem vozraste metodom akusticheskoj emissii / A. I. Sagajdak, V. V. Bardakov, E. S. Borovkova // Beton i zhelezobeton. Stroitel'nye materialy i izdeliya. – 2023. – № 1 (615). – S. 33–42. – DOI: 10.37538/0005-9889-2023-1(615)-33-42.
9. Tekhnicheskaya diagnostika. Akustiko-emissionnaya diagnostika. Terminy, opredeleniya i oboznacheniya : GOST R 55045—2012 ; pereizdan 12.20218. – M. : Standartinform, 2019. – 12 s.
10. Borovkova, E. Monitoring of fibroblast at an early age by the method of acoustic emission / E. Borovkova, D. Shabanov // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2024. – № 1 (36). – S. 34–38. – DOI: 10.52928/2070-1683-2024-36-1-34-38.
11. Ahverdov, I. N. Osnovy fiziki betona / I. N. Ahverdov. – M. : Strojizdat, 1981. – 464 s.
12. Acoustic emission characterisation of calcium aluminate cement hydration at an early stage / T. Chotard, J. Smith, A. Rotureau [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2003. – No. 23. – P. 387–398.
13. Early-age acoustic emission measurements in hydrating cement paste: Evidence for cavitation during solidification due to self-desiccation / P. Lura, J. Couch, M. O. Jensen, J. Weiss // Cement and Concrete Research. – Vol. 39, № 10. – 2009. – P. 861–867.
14. Muravin, G. B. Issledovanie akusticheskoj emissii tverdeyushchego betona / G. B. Muravin, G. S. Pavlovskaya, A. F. SHCHurov // Defektoskopiya. – 1984. – № 10. – C. 77–81.
15. Evin, D. D. Study on mechanical acoustic emission sources in fresh concrete / D. D. Evin, Geert De Schutter, G. Dimitrios // Arhives of civiland mechanic alengineering. – 2018. – № 18. – P. 742–754.
16. Ohtsu, M. Advanced Testing of Cement-Based Materials during Setting and Hardening / M. Ohtsu // Final Report of RILEM TC 185-ATC / ed.: H. W. Reinhardt, C. U. Grosse. – Bagneux : RILEM Publications SARL, 2005. – 21 p.
17. Van Den Abeele, K. Non destructive online evalution of concrete hardening using acoustic emission and harmonic wave spectroscopy / K. Van Den Abeele, G. De Schutter, M. Wevers // ECNDT: proc. of 9th European Conference on NDT, Berlin (Germany), September 2006. – Berlin, 2006. – 9 p.
18. Aggelis, D. G. Wave dispersion and attenuation in fresh mortar: theoretical predictions vs. experimental results / D. G. Aggelis, D. Polyzos, T. P. Philippidis // Journal of the Mechanics and Physics of solids. – 2005. – Vol. 53, № 4. – P. 857–883.
19. Dzaye, E. D. Study on mechanical acoustic emission sources in fresh concrete / E. D. Dzaye, G. D. Schutter, D. G. Aggelis // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2018. – No. 18 – R. 242–254. – DOI: 10.1016/j.acme.2017.12.004.
20. Active and passive monitoring of the early hydration process in concrete using linear and nonlinear acoustics / Van Den Abeele, K. Desadeleer, W. De Schutter, G. & Wevers // Cement and Concrete. Research. – 2009. – No. 39. – P. 426–432.
21. Cement and concrete research early-age elastic properties of cement-based materials as a function of decreasing moisture content / C. Di Bella, M. Griffa, T. J. Ulrich, P. Lura // Cement and Concrete Research. – 2016. – No. 89. – P. 87–96. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.08.001.
22. Slowik, V. Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value / V. Slowik, M. Schmidt, R. Fritzsch // Cement and Concrete Composites. – 2008. – No. 30. – P. 557–565.
23. Advanced Analysis of Acoustic Emission Parameters during the Concrete Hardening for Long Time / L. Pazdera, L. Topolar, V. Bilek [et al.] // e-Journal of Nondestructive Testing: proc. of 11th European Conference on Non-Destructive Testing, Prague, Czech Republic, 6–10 Oct. 2014. – Prague, 2014. – Vol. 19 (12). – P. 3255–3263. – URL: https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=16640 (data obrashcheniya: 17.03.2026).
24. Monitoring strukturnogo sostoyaniya cementnyh sistem po parametram signalov akusticheskoj emissii i tenzometrii / D. N. SHabanov, A. N. YAgubkin, E. S. Borovkova, E. A. Trambickij // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. Stroitel'nye materialy. – 2019. – № 16. – S. 30–34.
25. Borovkova, E. S. Fizicheskie svojstva strukturnyh izmenenij v betone / E. S. Borovkova, D. N. SHabanov // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2021. – № 8. – S. 39–42.

Материал поступил 11.03.2026, одобрен 18.03.2026, принят к публикации 20.03.2026

УДК 711.4

ПОЛИЦЕНТРИЧНЫЕ СЕТИ ГОРОДОВ И НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ КАК ИНСТРУМЕНТ СБАЛАНСИРОВАННОГО РЕГИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ БЕЛАРУСИ (НА ПРИМЕРЕ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ)

Н. Н. Власюк

Кандидат архитектуры, доцент, начальник управления архитектуры и территориального развития, Брестский областной исполнительный комитет, профессор кафедры архитектуры, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ulasiuk@list.ru

Реферат

В статье рассматривается решение научной проблемы преодоления пространственных дисбалансов в региональном развитии Республики Беларусь через призму архитектурно-градостроительного планирования. Предлагается усилить существующую моноцентрическую модель организации территории полицентрической, через формирование полицентричных сетей городов и населенных пунктов. На примере Брестской области разрабатывается и апробируется принципы, методология проектирования полицентричной сети населенных мест. Автором предложена иерархически-сетевая модель – полицентрический каркас республики, включающий три уровня опорных центров с дифференцированной функционально-планировочной специализацией, предложены модели-схемы полицентричных регионов. Описаны пилотные проекты, активизирующие потенциал регионов, определены модели полицентричных регионов, функциональная специализация узлов и реализация концепции полицентричных сетей (на примере Брестской области), обозначены подходы по совершенствованию системы сельского расселения, механизмы реализации. Результаты работы представляют собой направления для теоретического и практического переосмысления сложившихся градостроительных и планировочных подходов при корректировке схем территориальной организации (СКТО), разработке стратегий пространственного развития городов и регионов, генеральных планов городов и формирования государственной политики сбалансированного пространственного развития.

Ключевые слова: сетевой урбанизм, полицентризм, пространственное развитие, система расселения, региональное планирование.

POLYCENTRIC NETWORKS OF CITIES AND SETTLEMENTS AS A TOOL FOR BALANCED REGIONAL DEVELOPMENT OF BELARUS (ON THE EXAMPLE OF THE BREST REGION)

N. N. Vlasiuk

Abstract

The article considers the solution of the scientific problem of overcoming spatial imbalances in the regional development of the Republic of Belarus through the prism of architectural and urban planning. It is proposed to strengthen the existing monocentric model of the territory organization with a polycentric one, through the formation of polycentric networks of cities and settlements. On the example of the Brest region, the methodology of designing a polycentric network of settlements as a whole spatial structure is developed and tested. The author proposes a hierarchical network model – a polycentric framework of the republic, which includes three levels of reference centers with differentiated functional and planning specialization (macro level). The paper describes pilot projects that activate the potential of regions, the functional specialization of nodes, and the implementation of the concept of polycentric networks (using the example of the Brest region). The paper also outlines approaches to improving the rural settlement system and the mechanisms for implementing them. The results of the work represent directions for the theoretical and practical rethinking of urban planning and design approaches in the adjustment of schemes of territorial organization, the development of strategies for the spatial development of cities and regions, master plans for cities, and the formation of state policy for balanced spatial development.

Keywords: network urbanism, polycentrism, spatial development, settlement system, regional planning.

Введение

Современные вызовы пространственного развития Республики Беларусь требуют переосмысления сложившихся подходов к территориальной организации. Доминирование моноцентрической модели с концентрацией экономического и человеческого потенциала в столице и в Минской агломерации не в полной мере соответствует принципам сбалансированного регионального развития, закрепленным в основополагающих стратегических документах страны. В условиях глобализации, цифровой трансформации, необходимости усиления регионов, городов внутриобластного подчинения (80+), малых городов, территорий, совершенствования системы расселения. Становится очевидной необходимость перехода к новой парадигме пространственного развития, основанной *на принципах полицентризма и сетевого взаимодействия.*

Государственная схема комплексной территориальной организации Республики Беларусь и Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2035 года [11] предусматривают формирование сбалансированной системы расселения, определяющей в качестве одного из приоритетов сокращение межрегиональных диспропорций. При этом существующая централизованная структура "столица – областные центры – райцентры" демонстрирует свою ограниченность в условиях современных вызовов, требуя более гибких и адаптивных моделей территориальной организации.

В данном контексте предлагаемая *концепция полицентричных сетей* представляет собой ответ на вызовы пространственного развития Беларуси. Концепция интегрирует принципы сетевого урбанизма и полицентризма, предлагая *переход от иерархической к сетевой модели организации территории*, где города рассматриваются как взаимодополняющие узлы в единой системе расселения.

Практическая значимость исследования заключается в разработке инструментов и механизмов, которые могут быть интегрированы в систему государственного территориального планирования для достижения стратегических целей сбалансированного регионального развития страны.

Теоретические основы концепции

Терминологический аппарат для пояснения основных используемых в статье терминов и понятий:

Сетевой урбанизм – представляет собой современный подход пространственного развития, где города рассматриваются как узлы

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-20-34

в глобальной системе потоков – информации, финансов, товаров и людей. Ценность города определяется не его административным статусом, а интенсивностью и значимостью его связей с другими узлами сети, ценностью является собственная айдентика [27].

Полицентризм как планировочная концепция – предполагает наличие нескольких взаимодополняющих центров развития в рамках единой территориальной системы. В отличие от моноцентрической модели, полицентризм способствует: снижению региональных диспропорций, более равномерному распределению экономической активности, повышению устойчивости системы расселения.

Полицентричная сеть – пространственная структура расселения, характеризующаяся наличием нескольких узлов разного ранга, связанных интенсивными взаимодействиями и дополняющих друг друга функционально.

Базовый узел или опорный сельский населенный пункт (далее БНП) – сельское поселение, в котором сосредоточены административные, хозяйственные, производственные и социально-культурные функции, обеспечивающие организацию сельскохозяйственного производства на прилегающей территории, обслуживание проживающего в нем населения, а также населения прилегающих населенных пунктов, расположенных в зоне его влияния.

От иерархии к сетям

Традиционная централизованная модель "столица – областные центры – райцентры" демонстрирует свою неэффективность в условиях глобализации и цифровизации. Сетевой урбанизм рассматривает города как узлы в сложной системе потоков, где ценность определяется не административным рангом, а интенсивностью и значимостью связей.

Можно привести некоторые примеры проблемных моментов иерархической модели – "эффект воронки" или магнита, при котором концентрация ресурсов, инвестиций, практически половина ВВП страны сосредоточены в Минской агломерации. В целом по стране прогнозируется уменьшение численности населенных пунктов – в первую очередь наблюдается депопуляция периферии и малых городов, также ослабление экономических и социальных связей между городами одного ранга.

Предлагаемая комплексная методология, последовательно реализует принципы сетевого урбанизма на трех уровнях:

– *на макроуровне* (система расселения) – за счет целенаправленного формирования полицентричной сетевой структуры, где узлы специализированы на основе их объективного транзитного, экономического культурного и природного потенциала. Сюда же входит совершенствование системы расселения;

– *на мезоуровне* (отдельный город) – через внедрение методики выявления и активации «архитектурно-пространственного кода индивидуальности», определяющего уникальное планировочное и функциональное развитие каждого узла сети;

– *на микроуровне* (городская среда) – путем применения типологии адресных проектных решений по ревитализации, основанных на диагностике конкретных потребностей и ресурсов территории.

В данной статье рассматривается возможность интеграции новых подходов в реальные процессы территориального планирования на макроуровне.

Сетевой подход рассматривает города как узлы в сложной системе потоков, где ценность определяется не административным рангом, а интенсивностью экономических связей, торговых и производственных цепочек, способностью генерировать и транслировать инновации, градостроительным потенциалом.

Особую значимость предлагаемый подход приобретает в контексте развития приграничных регионов (города-партнеры, логистические кластеры), развития территорий вдоль транспортных коридоров (точки роста). Города Брестской области обладают значительным транзитным, экономическим и культурным потенциалом.

Примерами успешного сетевого взаимодействия можно назвать, по сути, уже функционирующий в Брестской области кластер "Брест – Жабинка – Кобрин" (рисунок 1), где сформирован логистический коридор вдоль трассы М1 (Е30) – вне административных границ, естественная кооперация предприятий трех городов, создание распределенной производственной цепочки.

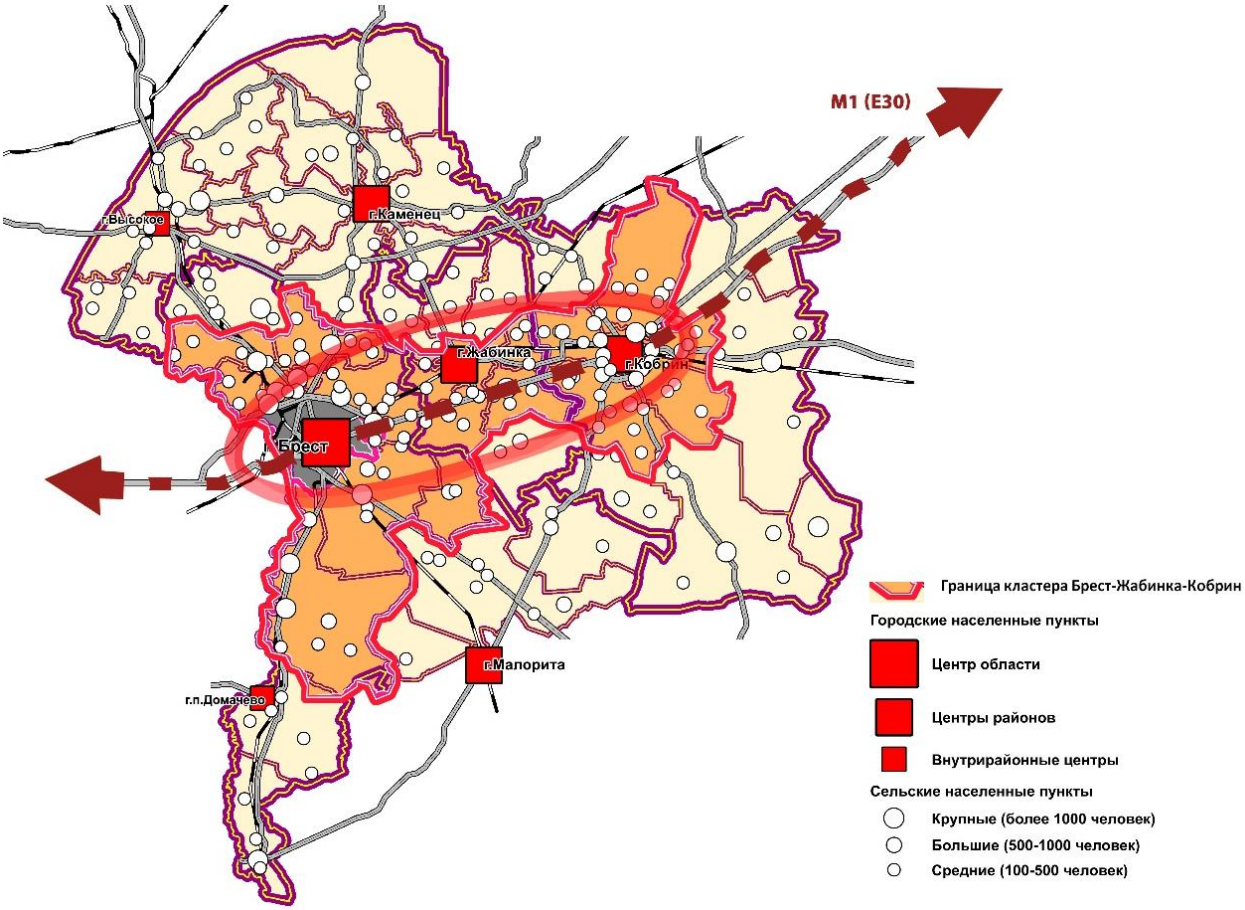


Рисунок 1 – Сетевое взаимодействие кластера "Брест – Жабинка – Кобрин" вдоль транспортного коридора М1 (Е30), предложение автора

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-20-34

Создание устойчивой системы расселения

Полицентрическая система обладает повышенной устойчивостью к кризисам: моноцентрическая модель при кризисе центра парализует всю систему, в то время как в полицентрической модели кризис в одном узле компенсируется другими элементами сети. В мире накоплен достаточный опыт подтверждения данного тезиса. В качестве примера устойчивости могут служить Нидерланды, где в полицентрической агломерации Рандстад (Амстердам – Роттердам – Гаага –Утрехт) во время пандемии 2020 года смогли перераспределить экономическую активность и снизить падение ВВП на 3,5 % по сравнению с моноцентрическими агломерациями. «Полицентрическая агломерация Рандстад» объединяет четыре крупных города (Амстердам, Роттердам, Гаагу, Утрехт), каждый из которых выполняет специализированные функции, создавая единую, но рассредоточенную метрополию: Амстердам – финансовый и культурный центр, Роттердам – транспортный и логистический хаб, Гаага – политический и административный центр, Утрехт – образовательный и научный центр [31].

Интересен европейский опыт в части реализации инициатив по формированию кластеров средних и малых городов, дополняющих друг друга, реализации модели городских сетей. В частности, концепция ЕС "Полицентричное развитие Европы". В рамках Европейской пространственной перспективы полицентризм признан важным принципом пространственного развития. Реализуется через создание транснациональных сетей городов (например, сеть городов Балтийского моря), развитие интермодальных транспортных коридоров, стимулирование межрегиональной кооперации.

Французская практика создания "полюсов равновесия" или "полюсов конкурентоспособности" направлена на развитие региональных центров как противовесов Парижу через целевое финансирование инфраструктурных проектов. Создание специализированных кластеров, объединяющих предприятия, научные учреждения и органы власти вокруг конкретных отраслей специализации [23].

Одним из примеров может служить создание "региональных сетей" на территории Северный Рейн – Вестфалия в Германии. Специализация городов в рамках сети (Ахен – научный центр, Кельн – медиа-хаб и др.) в целом привело к значительному снижению дифференциации в доходах между городами. Специализация этих городов создает синергетическую сеть, где уникальные сильные стороны каждого города вносят вклад в общую экономическую и инновационную мощь государства. Эту сеть поддерживает концентрация университетов и научно-исследовательских институтов, которые выпускают высококвалифицированных специалистов и выступают в качестве двигателей инноваций [9, 32].

Для условий Беларуси преимущества могут быть в экономической устойчивости (диверсификация экономики по территории, снижение рисков концентрации); социальной стабильности (создание рабочих мест в регионах, снижение миграционного давления на Минск); инфраструктурной эффективности (оптимальное использование существующей инфраструктуры, снижение затрат на развитие транспортной сети).

Полицентрическая стратегия развития позволяет преобразовать пространственную организацию Беларуси, создавая более сбалансированную, устойчивую и конкурентоспособную систему расселения, соответствующую вызовам XXI века.

Концепция "Созвездие полицентричных сетей" для Беларуси

В качестве ***основных принципов формирования полицентриричных сетей*** в Беларуси предлагаются:

– *принцип специализации узлов* – распределение различной функциональной направленности городов исходя из их потенциала, и дополнение существующих функций для создания кластеров городов;

– *принцип связности* – обеспечение интенсивного взаимодействия между узлами;

– *принцип иерархичн*ости – формирование многоуровневой системы узлов;

– *принцип устойчивости* – создание сбалансированной и адаптивной системы.

Выделение структурных элементов, узлов макроуровня

К городам – узлам первого порядка предлагается отнести:

– Минск как столичный регион, национальный центр управления, финансов и инноваций;

– Брест – «западные ворота» страны на трансъевропейском коридоре, с трансграничным логистическим парком.

К городам – узлам второго порядка относятся:

– Гродно – историко-культурный туристский центр;

– Гомель – юго-восточный промышленно-транспортный узел;

– Витебск – северный культурно-логистический центр;

– Могилев – восточный промышленно-инновационный центр-парк.

К городам – узлам третьего порядка относятся:

– региональные центры;

– города внутриобластного подчинения 80+ (Барановичи, Борисов, Орша, Пинск и др.);

– специализированные узлы: научно-образовательные центры, логистические, туристические кластеры, промышленные площадки.

Для реализации предложенной концепции необходимы: разработка совместных программ развития городов, создание межмуниципальных координационных советов, формирование механизмов межбюджетного выравнивания. Важно развитие кластерных инициатив. Экономическое стимулирование межрегиональной кооперации предприятий, создание специализированных инвестиционных фондов.

В части инфраструктурного развития приоритет развития высокоскоростных транспортных связей, создание телекоммуникационных хабов, модернизация логистической инфраструктуры.

Ожидаемые результаты реализации концепции развития полицентричных сетей значительно повлияют на увеличение межрегиональной торговли, сокращение миграционного оттока из регионов. Позволят сформировать 5–7 межрегиональных кластеров специализации. Данный подход к пространственному развитию Беларуси позволяет максимально использовать потенциал регионов страны и создать устойчивую, сбалансированную систему расселения.

Полицентризм как стратегия развития, апробация, пилотные проекты

Полицентрическое развитие позволяет: преодолеть региональные диспропорции (перераспределить экономический потенциал по территории страны), активнее использовать потенциал периферийных регионов, создать более устойчивую систему расселения.

Предложенная автором методология полицентричных сетей, в сотрудничестве с ведущими градостроительными институтами: РУП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА», УП «Минскградо» была применена в градостроительных и территориальных проектах, разрабатываемых в Республике Беларусь и в Брестской области, где апробированы теоретические концепции полицентризма в реальной градостроительной практике. Принципы и положения, обозначенные в проектах, реализуются на практике, однако не все предложения и подходы остались востребованными по ряду причин. Это связано с необходимостью изменения парадигмы планирования: от "обслуживания центра" к "созданию сети комплементарных центров" с делегированием им более значимых экономических и социальных функций. В частности, можно рассмотреть это на конкретных проектах.

Проект Пригородной зоны г. Бреста (далее ППЗБ) (рисунок 2), утвержден в 2022 г. – по сути, проект Брестской агломерации, где отображено влияние и взаимодействие города-центра с населенными пунктами районов, СЭЗ «Брест» в радиусе 20–30 километров (*Модель а).*

Планируемый полицентризм, см. далее – Модели полицентричных регионов). В ППЗБ были реализованы предложенные инструменты и принципы полицентричного развития:

– *выделение локальных центров* – перспективных населенных мест (далее – ПНМ), города-спутника Жабинки, наиболее крупных и развитых городских поселков, агрогородков (Чернавчицы, Мухавец, Большие Мотыкалы, Ленинский, Страдечь, Знаменка, Черни);

– *сдерживание "расползания" города и сохранение зеленого пояса* – четкое зонирование и установление границ между собственно

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-20-34

городской застройкой и пригородной зоной. Создание рекреационного и природного каркасов (зеленый пояс) для предотвращения слияния пригородных центров с ядром агломерации в единое пятно, помогая им сохранить идентичность и потенциал для самостоятельного развития, создание внешнего экологического пояса, интегрированного в зеленый каркас города;

– *сетевая транспортная инфраструктура*, (кольцевая, обходы вокруг Бреста – строительство Западного и проект Южного обходов, которые связывают пригородные поселения, минуя перегруженный центр города, развитие транспортных связей между перспективными населенными местами, планирование развития пригородного железнодорожного сообщения (городской электрички) с транспортно-пересадочными узлами Пригородной зоны и развитие высокоскоростного транспорта Брест – Минск – Москва;

– *функциональное зонирование*: *рекреационная зона* – развитие вокруг водоемов и лесных массивов с акцентом на базы отдыха, агроэкоусадьбы, кемпинги; *культурно-туристская* – развитие как взаимоувязанный так и самостоятельных маршрутов по историческим местам, памятникам архитектуры; *производственно-логистические зоны* – размещение объектов в ключевых транспортных узлах, СЭЗ (возле аэропорта Брест-1, железнодорожных станций, кольцевой дороги); *агропромышленные зоны* – концентрация перерабатывающих предприятий рядом с сельхозугодьями.

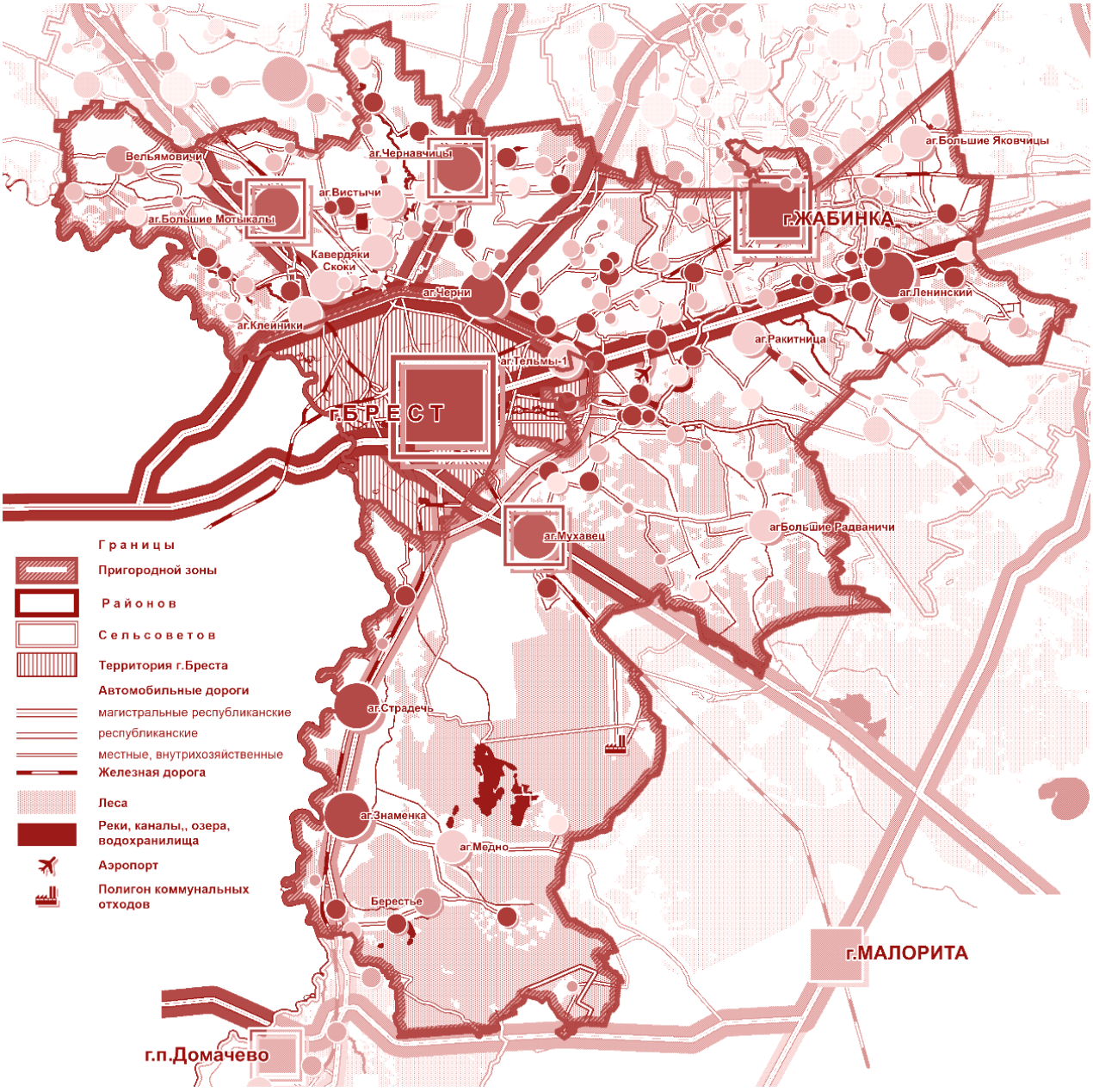


Рисунок 2 – Модель территориальной организации пригородной зоны Бреста, Модель «планируемый полицентризм» (см. далее – модели полицентричных регионов). РУП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА», 2022

К недостаткам с позиций реализации подходов полицентризма можно отнести:

– сохранение доминирование центра: все планы ППЗБ рассматривали зону в основном как зависимую территорию для Бреста (место для рекреации, логистики, резерв под застройку). Заказчиком не ставилась цель создать здесь самостоятельные, конкурентоспособные малые города (например, город-спутник Жабинка или «деревни-спутники»);

– слабость горизонтальных связей – каждый центр взаимодействует напрямую с Брестом, а не друг с другом;

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-20-34

– отсутствие иерархической системы – не была четко выстроена модель: Брест (центр 1-го уровня) – Крупные ПНМ (центры 2-го уровня, например, потенциальный аг. Чернавчицы с развитой логистикой) – Малые ПНМ (центры 3-го уровня). Все пригородные пункты находились в одной "весовой категории";

– отсутствие институциональных механизмов управления развитием пригородной зоны (агломерации) как единой полицентричной системы (например, ассоциация муниципалитетов и сельсоветов ПЗБ). Планирование осталось за Брестским облисполкомом и горисполкомом, что усиливает централизованный взгляд.

ППЗБ в целом не привел к формированию полноценной полицентричной сети городов и населенных пунктов. Пригородная зона осталась полупериферией моноцентрической агломерации, где отдельные "точки роста" зависят от областного центра. Для перехода к полноценной полицентричной модели необходимо изменение парадигмы планирования: от "обслуживания центра" к "созданию сети комплементарных центров" с делегированием им более значимых экономических и социальных функций.

Генеральный план города-спутника Жабинки, утвержден в 2025 г., позволяет рассмотреть, как концепция полицентризма реализуется на уровне населенного пункта с особым статусом. Однако анализ его реального развития показывает классический пример нереализованного потенциала в контексте полицентричной сети. Подходы, декларируемые или частично применявшиеся к Жабинке, можно оценить следующим образом:

– *транспортно-географический подход – интеграция в сеть*. Это, в основном, сложившийся, и наиболее реализованный аспект. Жабинка исторически и в современных проектах рассматривается как важный транспортный узел. Здесь пересекаются железные дороги (магистраль Брест – Минск и линия на Кобрин), проходят ключевые автодороги (М1/Е30 Брест – Минск). С точки зрения полицентризма, позиционирование Жабинки не просто как населенный пункт, а как инфраструктурный кластер в сети агломерации, берущий на себя часть логистических функций. В реальности данный подход реализован частично. Инфраструктура проходит через город, но не стала катализатором его комплексного развития как центра. Транспортный узел существует, но не превратился в драйвер для создания высокоэффективной логистической или производственной зоны европейского уровня;

– *функциональная (производственно-аграрная) специализация*. Основной экономический профиль Жабинки – промышленность, переработка ресурсов. Градообразующее предприятие – Жабинковский сахарный завод. Также существуют другие предприятия (комбикормовый комбинат, асфальтобетонный завод). В планах развития всегда делался акцент на усиление промышленной базы. Согласно новому генеральному плану, в Жабинке, помимо основной стратегии развития города, планируется создать лечебно-оздоровительный кластер. На базе центральной районной больницы прорабатывается возможность открытия специализированных отделений совместно с Брестской областной клинической больницей, внедрение высокотехнологичных операций. Данное направление призвано усилить позиции города-спутника и перераспределить часть компетенции областной больницы, расположенной в Бресте. Важнейшим стимулом развития города-спутника и драйвером развития экономики региона в будущем также может стать формирование логистическо-индустриального парка напротив аэропорта «Брест». В этом узле пересекаются водный, авиа, ж/д, автомобильный виды транспорта, вблизи границы между областным центром и городом-спутником (рисунок 3). С точки зрения полицентризма важно создание специализированного производственного полюса вблизи Бреста, который комплементарен областному центру (акцент смещается в сторону услуг, торговли, культуры). В данном случае подход реализован частично и по устаревшей модели. Специализация есть, но она остается моноотраслевой и уязвимой (зависимость от одного крупного завода), не создает сильных синергетических связей с Брестом, кроме поставок сырья, продукции, не генерирует достаточно высококвалифицированных рабочих мест, чтобы стать магнитом для населения и снять миграционное давление с Бреста;

– *развитие города-спутника (деконцентрация населения).* Жабинке отводится роль места для размещения части населения, которая не может или не хочет жить в Бресте, но нуждается в близости к нему. Предполагалось развитие жилищного строительства (особенно индивидуального). С точки зрения полицентризма цель – снять демографическое и градостроительное давление с ядра агломерации, создав альтернативу для проживания. В реальности пока в степени реализации (запроектированы и строятся два современных квартала индивидуальной и блокированной застройки). Жабинка не стала массовым направлением для переселения брестчан. Причиной являются: слабость социальной инфраструктуры (качество досуга заметно уступает брестскому); недостаточное количество скоростного и удобного общественного транспорта (электричка используется недостаточно, наличие регулярного экспресс-автобусного сообщения с большими интервалами). В ментальном плане Жабинка воспринимается как отдельный, менее престижный город, а не как органичный район Бреста;

– *подход "резервной территории"*. Близость к Бресту и наличие свободных земель делают Жабинку потенциальной резервной площадкой для размещения крупных объектов областного значения, для которых в Бресте нет места (складские комплексы, некоторые виды производств). В реальности данный подход реализуется стихийно. Крупные объекты (например, логистические центры) чаще размещаются еще ближе к Бресту, в СЭЗ или его кольцевой дороге. Жабинка не имеет четкого, утвержденного и продвигаемого плана по освоению таких резервов.

К недостаткам с позиций реализации подходов полицентризма можно отнести:

– доминирование "точечного" подхода над "сетевым": развитие Жабинки виделось как развитие отдельного города, а не как проектирование взаимосвязей в системе "Брест – Жабинка» или «Брест – Жабинка – Кобрин». Не создавались совместные проекты, общие зоны экономического развития;

– недостаточную интеграцию в социально-бытовую сферу Бреста. К реализованным мероприятиям относится единый проездной билет. Однако не были созданы общие системы (например, общая система записи к врачу, филиалы брестских колледжей или учреждений дополнительного образования в Жабинке). Жабинка осталась в своей административной "капсуле";

– слабость общественных пространств и идентичности: город-спутник в полицентричной модели должен иметь привлекательное ядро, свою качественную среду. В настоящее время этому уделяется много внимания (реконструкция парка, реконструкция привокзальной площади), но Жабинка пока не стала "магнитом" для жителей Бреста в плане досуга, культуры, рекреации;

– институциональный барьер: административная граница между Брестом и Жабинковским районом – главное препятствие. Нет единого органа управления развитием пары "центр-спутник". Брест не заинтересован инвестировать в чужой район, а возможности района ограничены.

В случае Жабинки были реализованы в большей степени подходы использования выгодного географического положения в интересах моноцентричной системы. Город получил специализацию как периферийный промышленный и транспортный придаток Бреста, а не как самостоятельный, сильный и взаимодополняющий узел в сети.

Для становления Жабинки в настоящий элемент полицентричной сети необходимы: программа глубокой интеграции (транспорт, социальная сфера, коммуникации); переход от моноспециализации к диверсифицированной экономике с акцентом на услуги и логистику; совместное градостроительное планирование Бреста и Жабинковского района с созданием общих приграничных зон развития; инвестиции в качество городской среды Жабинки, чтобы она могла конкурировать за жителей не только ценой, но и комфортом. Без целенаправленной политики по построению сетевых связей даже выгодно расположенный спутник остается в тени доминирующего центра.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-20-34

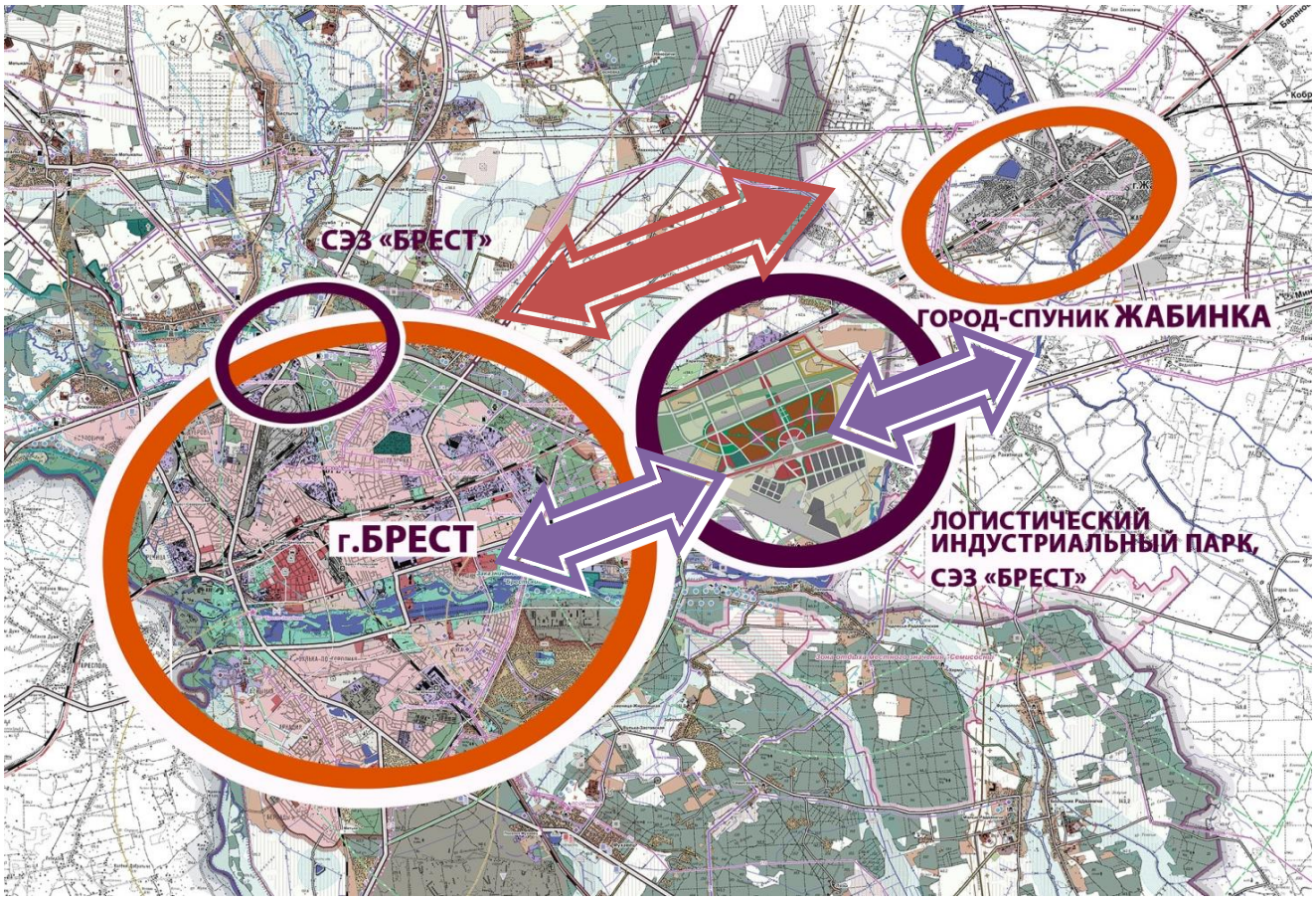
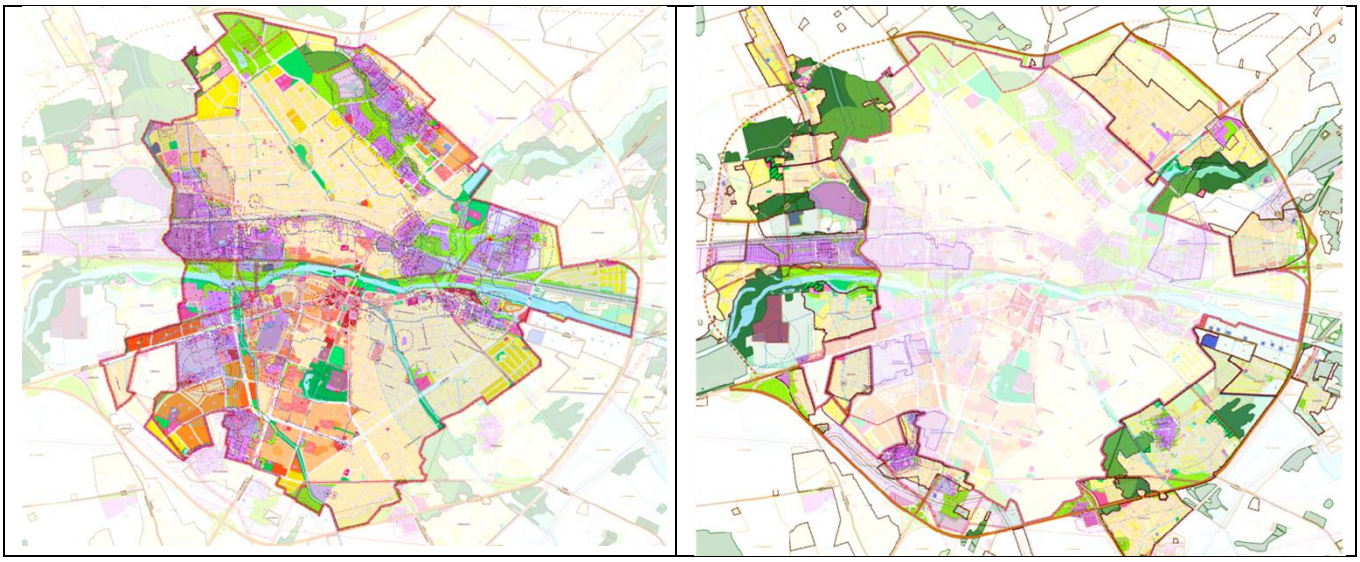


Рисунок 3 – Модель «сращивания», Брестский трансграничный кластер с "Логистико-индустриальным парком", предложение автора (см. далее – модели полицентричных регионов)

Генеральный план г. Кобрина со стратегией пространственного развития утвержден в 2024 году, где впервые районный центр – г. Кобрин – рассматривается совместно во взаимодействии с прилегающими (более десятка) населенными пунктами за пределами административной границы городской черты как единое территориальное образование, организм (*модель «планируемый полицентризм»,* рисунок 4). Это наиболее прогрессивный пилотный пример сетевого планирования. Стратегия пространственного планирования Кобрина представляет собой уникальную для белорусской практики попытку применить принципы полицентризма и сетевого взаимодействия на локальном уровне – в масштабе районного центра и его окружающей территории.



Рисунки 4 – Генеральный план г. Кобрина со стратегией пространственного развития, город рассматривается совместно во взаимодействии с прилегающими населенными пунктами за пределами административной границы городской черты как единое территориальное образование. Модель «планируемый полицентризм» (см. далее – модели полицентричных регионов), РУП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА», 2024

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-20-34

Здесь были реализованы предложенные автором следующие ключевые подходы:

– *системный подход к территории*: от города к "Кобринскому системному образованию" (далее КСО). Это качественное изменение к существующим подходам. Территорией планирования стали не административные границы г. Кобрина, а функционально связанное пространство, включающее сам город, прилегающие сельсоветы (агрогородки и населенные пункты: Андроново, Легаты, Именин, Большие и Малые Лепесы, Быстрица, Магдалин, Островляны и др.) и ключевые инфраструктурные, рекреационные и природные объекты. Это пространство было определено как "Кобринское системное образование". Цель с точки зрения полицентризма – уйти от планирования изолированного "пятна" города и признать, что его функционирование и развитие неразрывно связано с ближней периферией. Это модель микрополицентризма, где Кобрин – главный центр, а агрогородки и крупные деревни – локальные узлы сети;

– *выявление и укрепление локальных центров в окружении* (построение иерархической сети). Для потенциальных центров притяжения предложены меры по усилению их функций – не только как мест проживания, но и как узлов предоставления базовых и периодических услуг, малого бизнеса, рекреации. Такой подход позволяет сократить поездки жителей села в город, закрепив часть функций в агрогородках, населенных пунктах;

– *функционально-планировочная специализация всей территории* КСО с целью рационального распределения функций по территории, где каждый элемент (город, деревня, природный объект) выполняет свою роль в общей системе, повышая ее эффективность и устойчивость. Было выделено ядра КСО (г. Кобрин) с функциями администрирования, культуры, образования, межрайонного здравоохранения, торговли. Агропромышленных зон с привязкой перерабатывающих мощностей к местам производства сырья. Рекреационно-туристических кластеров (на основе исторических мест, водоемов, ландшафтов), вовлекающих в оборот объекты как в городе, так и в сельской местности (например, создание единого туристического маршрута). Природно-экологического каркаса, объединяющего реки, каналы, леса и парки в единую систему;

– *интеграция транспортных и инженерных систем*. Планирование развития транспортной и инженерной инфраструктуры (дороги, общественный транспорт, водоснабжение, водоотведение) велось с учетом потребностей всего КСО, а не только города. Например, маршруты общественного транспорта проектировались для связи агрогородков друг с другом и с Кобрином по сетевому, а не только радиальному принципу. Цель с точки зрения полицентризма: физическое и функциональное объединение узлов сети – "сшивание" пространства;

– *балансировка расселения и создание "многоцентричной" системы обслуживания*. Обеспечение территориальной справедливости и повышение качества жизни на всей территории, что является одной из главных целей полицентричного развития. Стратегией предложена модель расселения, при которой житель деревни в пределах КСО имеет доступ: к повседневным услугам – в своем агрогородке (локальный центр), к услугам периодического спроса – в Кобрине (главный центр). Это снижает необходимость в тотальной урбанизации и позволяет сохранить сельскую сеть, но на новом, более качественном уровне;

– *преодоление административных барьеров*: наличие единого органа управления развитием КСО – Кобринского райсполкома.

Несмотря на новую для Беларуси методологию, в реализации были ограничения:

– преобладание пространственного планирования над экономическим: стратегия описывает "где и что разместить", но слабо прорабатывает экономические драйверы сетевого взаимодействия. Как заставить предприятия в Кобрине создавать филиалы в агрогородках и в прилегающих населенных пунктах? Как стимулировать совместные бизнес-проекты?

– зависимость от вышестоящих решений: развитие ключевой инфраструктуры (крупные дороги, инженерные магистрали) зависит от республиканских и областных программ, в которых КСО как единый объект не существует;

– энерционность мышления: на практике местные власти часто продолжают мыслить административными категориями ("наш город", "их деревня"), что тормозит реализацию интеграционных проектов.

Стратегия пространственного планирования Кобрина является уникальным и наиболее состоятельным примером применения принципов полицентризма на субрегиональном уровне в Беларуси. В ней были реализованы ключевые подходы: системное определение территории планирования, построение иерархии центров (город – агрогородки), функциональная специализация частей системы, интеграция инфраструктурного каркаса. Это пилотная модель "мягкого" полицентризма, направленная на внутреннюю сбалансированность и интеграцию городской и сельской местности. Однако ее реализация упирается в институциональные и финансовые барьеры имеющейся системы управления. Данный опыт важен для разработки нормативных актов, которые могли бы придать подобным "системным образованиям" официальный статус и дать инструменты для их комплексного развития.

Схема комплексного развития туристской инфраструктуры региона «Беловежская пуща» – разработанный и утвержденный в 2025 году межобластной градостроительный проект специального планирования (рисунок 5), где независимо от административного деления Брестской и Гродненской областей рассмотрена туристская инфраструктура и потенциал населенных пунктов (Каменец, Высокое, Пружаны, Волковыск, Свислочь, Ружаны, Порозово, агрогородки Шерешево, Беловежский, Лысково) в зоне влияния Национального парка для создания туристско-экологического кластера. Схема представляет собой пример применения новых подходов к формированию полицентричной сети в Беларуси. Здесь полицентризм строится не вокруг промышленного или административного ядра, а вокруг уникального природного объекта – национального парка. Реализованные подходы носят инновационный и комплексный характер.

Подход «природно-ядерный полицентризм» (*модель г), см. далее – Модели полицентричных регионов*. Это модель, где главным структурообразующим элементом сети выступает не город, а заповедная территория. Беловежская пуща рассматривается не как изолированный туристический объект («музей под открытым небом»), а как активное экологическое и экономическое ядро для целой сети населенных пунктов вокруг нее. Развитие инфраструктуры и услуг концентрируется не в самой заповедной зоне, а в узлах-буферах вокруг нее. Проектом запланировано создать сбалансированную систему, где Пуща получает щадящий, регулируемый режим посещения, создаются и обновляются объекты инфраструктуры, уточняются регламенты развития населенных пунктов, и дополнительное развитие от туризма получают прилегающие территории, снижая антропогенную нагрузку и создавая стимулы для местных сообществ охранять природу.

Функционально-кластерное зонирование и специализация узлов сети. Была реализована детальная специализация населенных пунктов в зависимости от их локации, наследия и потенциала. Каменец позиционируется как «Ворота в Беловежскую пущу» и историко-культурный центр. Здесь концентрируются основные сервисы для туристов (инфоцентры, гостиницы среднего класса, музеи, рестораны), а также делается акцент на исторический потенциал (Каменецкая Вежа, старинные усадьбы, храмы, каплицы – архитектурное наследие). Агрогородок Каменюки (административный центр национального парка, въездная зона). Здесь сосредоточены научно-образовательный и административный кластер, а также семейный туризм, развитие агроусадеб. Пружаны развиваются как транзитно-логистический и сервисный узел для потока с востока, с акцентом на культурно-историческое наследие (музей-усадьба «Пружанскі палацык» и другие историко-культурные объекты). Прилегающие населенные пункты, агрогородки и деревни с имеющимся богатым историко-культурным и архитектурным потенциалом. Специализация на агроэкотуризме, ремеслах (гончарство, ткачество) и производстве локальных продуктов питания («пущанские» сыры, мед, травы, ягоды). Они становятся точками притяжения для желающих погрузиться в аутентичную среду. Планируется более интенсивное развитие сопутствующей инфраструктуры и городов Гродненской области, прилегающих к Пуще (Поразово, Свислочь, Подороск и других), со своей специализацией.

Создание «Туристического каркаса» как визуализации сети. Проектом предусмотрено создание не отдельных маршрутов, а целостной системы связанных между собой тематических маршрутов

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-20-34

и коридоров («Пущанское кольцо», «Архитектурное кольцо», «Экотропы»), которые физически связывают узлы сети (город – агрогородок – объект показа в Пуще); распределяют потоки туристов, предотвращая концентрацию в одной точке; создают единый навигационный и брендинговый образ территории. Целью являлось превратить разрозненные населенные пункты в взаимосвязанные узлы единого туристического продукта. Это *классический сетевой принцип, где ценность каждого узла возрастает от его подключенности к системе.*

Институциональный подход: межмуниципальное и трансграничное взаимодействие, проект изначально задумывался как механизм преодоления административных границ.

Что реализовано и что планируется: наличие общей концепции, видения и взаимоувязанного развития природно-экологического и рекреационного объекта на территории двух областей (Брестской и Гродненской); в будущем создание координационного совета или ассоциации по развитию туризма в зоне влияния Пущи, куда входят представители Каменецкого, Пружанского, Свислочского районов, дирекция национального парка. В идеале – общий маркетинг, единые стандарты услуг, совместные инвестиционные проекты (например, комплексный билет). В настоящее время разработан комплексный брендинг национального парка. В перспективе необходимо развивать трансграничный аспект проект учитывая польскую часть Пущи (Białowieża). Развитие совместных маршрутов, единых информационных систем, проектов, что превращает сеть в транснациональный полицентричный кластер.

Экологический каркас как основа планировочной структуры. Новым было то, что экологические ограничения стали не препятствием, а основой для проектирования сети. Развитие сети населенных пунктов и маршрутов проектируется с учетом буферных зон, экологических коридоров миграции животных, зон строгой охраны. Развитие получают именно те территории, где это нанесет минимальный ущерб, а сами узлы сети выступают как буфер, принимающий антропогенную нагрузку. Задача – создание модели устойчивого развития, где охрана природы и экономическая активность не конфликтуют, а поддерживают друг друга через четкое территориальное разделение функций.

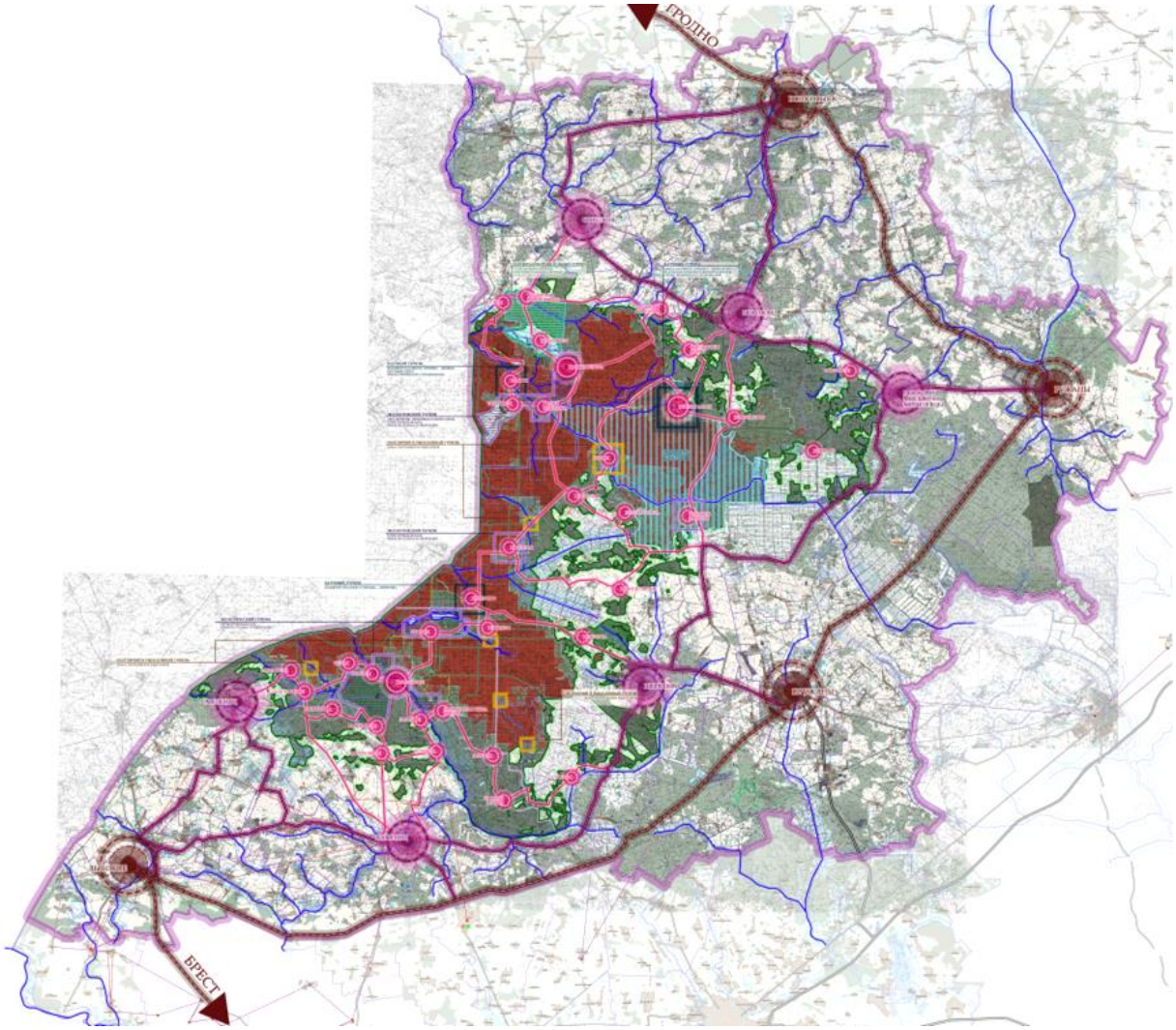


Рисунок 5 – Схема комплексного развития туристской инфраструктуры региона «Беловежская пуща» (Каменец, Высокое, Пружаны, Волковыск, Свислочь, Ружаны, Порозово, агрогородки Шерешево, Беловежский, Лысково) в зоне влияния Национального парка для создания туристско-экологического кластера. Модель «природно-ядерный (парк-центричный) полицентризм» (см. далее – модели полицентричных регионов), РУП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА», 2025

При критическом анализе и оценке можно отметить:

– точечное инвестирование отдельных проектов, памятников, инвестпредложений;

– наличие дисбаланса в развитии узлов, где более отдаленные агрогородки рискуют остаться на периферии сети без достаточных ресурсов для развития своей специализации;

– слабость «горизонтальных» связей, например, между агрогородками и населенными пунктами. Истинная сетевая синергия (когда узлы активно взаимодействуют между собой) еще не достигнута;

– управленческий пробел – отсутствие координационного совета и соответственно отсутствие реальных бюджетных полномочий, что тормозит реализацию комплексных инфраструктурных проектов.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-20-34

Проект развития территории Беловежской пущи представляет собой *модель парк-центричного ядра,* для Беларуси пример «тематического полицентризма». Он реализует новые подходы: ядерная модель на основе природного объекта, функционально-кластерная специализация узлов, проектирование туристического каркаса как материальной основы сети.

Это модель *парк-центричного полицентризма (см. далее – модели полицентричных регионов)*, которая может быть тиражирована на другие уникальные территории Беларуси (Поозерье, Припятское Полесье). Проект демонстрирует, что полицентричное развитие – это не только про города и промышленность, но и про создание устойчивых сетей, где экологические, культурные и экономические цели достигаются за счет синергии и четкого распределения ролей между разнотипными поселениями. Однако его долгосрочный успех будет зависеть от преодоления институциональных барьеров и достижения реальной экономической кооперации между всеми узлами сети.

С 2022–2025 гг. в Брестской области разрабатывается целый ряд градостроительных комплексных проектов нового типа для сельских населенных пунктов – совмещенные генеральные планы сельсоветов и агрогородков пригородной зоны. Это проекты на уровне сельсоветов выявляют уровень микрополицентрической модели, которая принципиально меняет подход к планированию сельских территорий. Вместо рассмотрения агрогородка как изолированного пункта и игнорирования малых деревень, новые схемы планировки реализуют следующие инновационные подходы:

– *подход «Единая система расселения сельсовета»* (отказ от точечного планирования). Это качественное изменение подходов. Раньше генеральный план разрабатывался только для агрогородка (центра сельсовета), а остальные деревни оставались без комплексного проекта.

Современная «Схема планировки сельсовета» стала объединяющим документом, который: рассматривает все населенные пункты на территории сельсовета (агрогородок, деревни, даже хутора) как элементы единой структуры; проводит анализ взаимосвязей и функциональной зависимости между ними (трудовые, бытовые, социальные потоки); определяет общую стратегию развития для всей территории как целостного организма;

– *выявление и закрепление иерархии центров внутри сети* (трехуровневая модель). Внутри малой сети сельсовета создается функциональная иерархия: центр сельсовета (агрогородок). Ему присваиваются функции базового и периодического обслуживания: средняя школа, амбулатория/ФАП, дом культуры, спортивный комплекс, административный центр. Следующий уровень – опорные деревни (перспективные населенные пункты). Выбираются 1–2 наиболее крупные или выгодно расположенные деревни. В них планируется размещение объектов ежедневного и повседневного спроса: начальная школа/детский сад, магазин смешанной торговли, отделение почты, клуб. Они становятся субцентрами для группы мелких деревень. Уровень 3 – деревни с ограниченным развитием (компактные жилые группы). Малые и удаленные деревни планируется сохранять как места проживания без активного развития социальной инфраструктуры. Акцент делается на благоустройство, жилищное строительство/реконструкцию и транспортную доступность до опорных центров. В идеале - создание 15-минутной доступности базовых услуг либо в опорной деревне, либо в агрогородке, что сокращает избыточную и неэффективную инфраструктуру в каждом населенном пункте;

– *функциональная кластеризация территории сельсовета.* Этот подход выходит за рамки населенных пунктов, планируя всю территорию сельсовета. Территория делится на функциональные кластеры: жилой и общественный кластер (агрогородок + опорные деревни), агропромышленный кластер (зоны сельхозпредприятий, фермы, перерабатывающие мини-цеха, которые привязываются к конкретным деревням), рекреационно-туристический кластер (выявление потенциала для агроэкоусадеб, объектов придорожного сервиса, точек развития ремесел в конкретных деревнях с историческим наследием или красивым ландшафтом), природоохранный и экологический кластер (водоохранные зоны, леса, включаемые в экологический каркас района). К примеру, в проекте схема планировки сельсовета, прилегающего к туристическому маршруту, одна деревня может получить специализацию «деревня гончаров», другая – «зеленая стоянка для велотуристов», третья – «производство сыра»;

– *проектирование локальной транспортно-пешеходной сети как «кровеносной системы»,* новый подход – акцент на внутренние связи. Помимо улучшения выезда на трассу, проекты теперь включают: развитие внутрихозяйственных дорог между деревнями внутри сельсовета, организацию школьных и социальных автобусных маршрутов по схеме «деревня – опорная деревня – агрогородок», планирование велосипедных и пешеходных связей (например, тропа от удаленной деревни к школе в агрогородке или к местной достопримечательности). Цель такого подхода – физически «сшить» разрозненные населенные пункты в единую сеть, повысив мобильность жителей и снизив изоляцию;

– *дифференцированные сценарии развития для каждого типа населенного пункта.* Отказ от шаблонов в пользу индивидуальных траекторий. Для агрогородка – сценарий «компактного уплотнения и модернизации» – развитие многоквартирной и блокированной жилой застройки, реконструкция центра, создание общественной площади. Для опорных деревень – сценарий «стабилизации и развития» – поддержка существующего населения, развитие усадебной застройки, размещение малых предприятий. Для малых деревень – сценарий «консервации и комфортного проживания» – улучшение среды, поддержка существующего жилого фонда, возможно, акцент на «деревни для дачников».

В настоящее время в границах пригородной зоны г. Бреста разработаны: генеральный план с детальным планом центральной части д. Тельмы-1 и схемой планировки Тельминского сельсовета Брестского района (рисунок 6) в дальнейшем предлагается развитие и детальная проработка логистическо-индустриального парка; генеральный план группы населенных пунктов д. Тюхиничи – д. Старое село – д. Бобровцы – д. Скоки Брестского района с детальным планом района жилой застройки; генеральный план с детальным планом центральной части аг. Мухавец и схемой планировки Мухавецкого сельсовета Брестского района; генеральный план Ленинского сельсовета с детальным планом аг. Ленинский Жабинковского района; генеральный план Ракитницкого сельсовета с детальным планом аг. Ракитница Жабинковского района; генеральный план с детальным планом центральной части д. Чернавчицы и схемой планировки Чернавчицкого сельсовета Брестского района. Такой подход позволяет комплексно рассматривать сеть населенных пунктов в зоне влияния и в увязке с областным центром, помимо строительства жилья с учетом имеющегося потенциала производственного, сельскохозяйственного, рекреационного и иных, с учетом занятости, специализации и расселения.

Оценивая слабые стороны и проблемы реализации можно отметить следующее:

– имеются проблемы финансирования, бюджет сельсовета крайне мал. Создание сети (сетевого подхода) требует софинансирования из районного и областного бюджетов, что происходит не всегда. Часто реализуется только первая очередь в агрогородке;

– сопротивление жителей малых деревень, население не готово принять потерю даже малоэффективной инфраструктуры (магазин, клуб) в своей деревне в пользу соседней опорной, воспринимая это как «закрытие» и упадок;

– административная разобщенность – сельсоветы часто не имеют реальных рычагов для управления экономической специализацией. Привлечь инвестора в конкретную деревню для создания ремесленного цеха или мини-гостиницы крайне сложно;

– декларативность специализации – назначение деревне туристической или ремесленной функции часто остается лишь в схеме, так как нет механизмов и программ для ее реализации (обучения жителей, грантов, маркетинга).

Таким образом можно сделать вывод, что новые подходы в планировании сельсоветов представляют собой принципиально важный, «низовой» уровень построения полицентричных сетей. Это микромодель полицентризма, где отрабатываются ключевые принципы:

– иерархия центров;

– функциональная специализация элементов;

– приоритет внутренних сетевых связей над внешними.

Успешная реализация этих проектов позволяет создать устойчивые структуры будущей полицентричной системы области, где каждый сельсовет становится не набором умирающих деревень, а жизнеспособной локальной сетью, способной интегрироваться в более крупные кластеры (как в примере с Беловежской пущей). Однако

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-20-34

эффективность этой модели напрямую зависит от преодоления бюджетно-управленческих ограничений и перехода от пространственного планирования к комплексному социально-экономическому программированию развития этих микротерриторий.

Перспективный интерес также представляет потенциал – формирование "Полесского кластера" (Пинск – Столин – Лунинец, с учетом нового проектируемого моста) со специализацией на: агротуризме и экологическом земледелии, переработке местной сельхозпродукции, развитии рекреационных услуг. С 2024 года разрабатываются генеральные планы (детальные планы) агрогородков со схемами планировки сельсоветов в целях реализации проекта Комплексной программы развития Припятского Полесья: Генеральный план Большемалешевского сельсовета с детальным планом аг. Большое Малешево Столинскогорайона, Генеральный план аг. Молотковичи со схемой планировки Молотковичского сельсовета Пинского района, Генеральный план группы населенных пунктов д. Ставок – д. Красиево – д. Новоселье – д. Рудавик – д. Чечницы со схемой планировки Ставокского сельсовета Пинского района и другие.

Сегодня в целом необходимо на местном уровне больше внимания уделять экономическому сотрудничеству между городами, регионами, развитию стартапов, инвестиционных проектов. Нужно больше инициативы «снизу» и «по горизонтали».

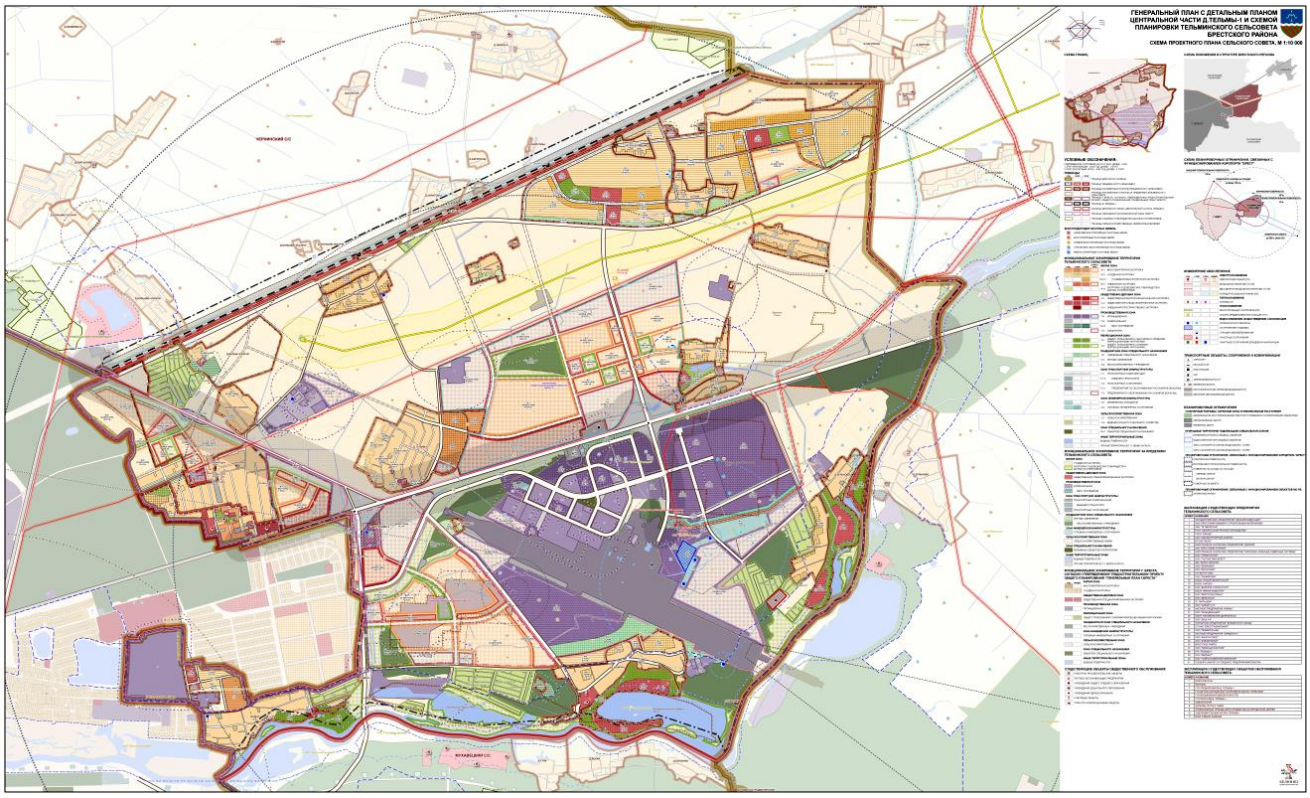


Рисунок 6 – Генеральный план с детальным планом центральной части д.Тельмы-1 и схемой планировки Тельминского сельсовета Брестского района, РУП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА», 2024

Активизация потенциала периферийных регионов. Здесь возможно рассматривать трансформацию приграничных районов в центры трансграничного сотрудничества, развитие логистических услуг для малого бизнеса приграничных территорий, создание совместных предприятий в т. ч. по переработке сельхозпродукции, изготовлению стройматериалов. Развитие экологических инициатив. Основная задача не конкурировать, а взаимодополнять друг друга, создавая трансграничные кластеры сотрудничества и компетенций. Создание особых экономических зон в приграничных районах, стимулирование "точек роста" в периферийных регионах

Совершенствование системы сельского расселения, *дифференцированный подход к опорным населенным пунктам.* Для преломления негативных тенденций и перехода к стандартам комфортного проживания необходимо выявление и развитие в системе сельского расселения базовых узлов, созвездий – базовых сельских населенных пунктов *(далее – БНП)* локального уровня (определение см. выше). Создать привлекательные опорные сельские поселения, сохранив при этом жизнеспособность окружающей территории.

Переход от «точечного» поддержания всех населенных пунктов, агрогородков к формированию устойчивой сети.

Методика выявления кандидатов в БНП, разработка системы критериев с показателями: *демография и размер* (население > 500–1000 чел., стабильная или растущая динамика); *инфраструктурный каркас* (наличие школы, ФАПа, хорошая транспортная связанность, развитые инженерные сети); *экономический потенциал* (наличие работающих предприятий, точек приложения труда, туристических активов); *транспортно-географическое положение* (узел местных дорог, равная доступность для группы малых деревень).

Проведение кластерного анализа для группировки НП вокруг потенциальных центров. В 2026 году планируется разработка «Схемы совершенствования системы сельского расселения Брестской области» с выделенными кластерами расселения и определенными кандидатами в БНП внутри них. После проведения комплексного анализа и диагностики (выявления и анализа данных по демографии, экономики, социальной сфере, инфраструктуре, пространственного анализа – удаленность НП от райцентров и друг от друга) и определения кандидатов в БНП необходимо планирование каждого БНП, которое включает: разработку «паспорта развития» – определение зоны влияния (какие малые деревни он будет обслуживать); планирование функциональной специализации (на основе анализа) – агропромышленный комплекс (логистика, переработка сельхозпродукции для соседних хозяйств); туристический кластер (особенно для районов Полесья – Каменецкого, Пружанского районов – например, агроэкотуризм на базе нескольких БНП); логистико-транзитный узел (для приграничных районов).

Определение конкретных мер по созданию БНП: социальная сфера (модернизация школ, создание многофункциональных центров). Создание передвижных бригад (врач, соцработник), базирующихся в БНП; транспорт (организация кольцевых автобусных маршрутов

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-20-34

от БНП по деревням зоны влияния («социальное такси»); экономика и инфраструктура (стимулирование создания мини-производств по переработке местного сырья; развитие высокоскоростного интернета как основы для удаленной работы и развития бизнеса; программы арендного жилья и поддержки молодых специалистов/семей в БНП; Разработка документов детального планирования для БНП, предусматривающих зоны для нового жилья (в т. ч. усадебного), общественные пространства, производственные площадки, пилотные проекты (например, концепции мезогород для аг. Междулесье, Березовского района).

Модели полицентричных регионов

В соответствии с градостроительной политикой Республика Беларусь перешла к циклу агломерационного развития [1, 12, 13]. Часть городов, городских образований, населенных пунктов впоследствии могут создавать несколько узлов активности, которые функционально взаимосвязаны и дополняют друг друга – полицентрические регионы. Основные схемы-модели (планируемый полицентризм, децентрализованная, сращивания, парк-центричная, сетевая, зеленый полицентризм), предложенные автором, можно представить в следующем виде (рисунки 7–12)**.**

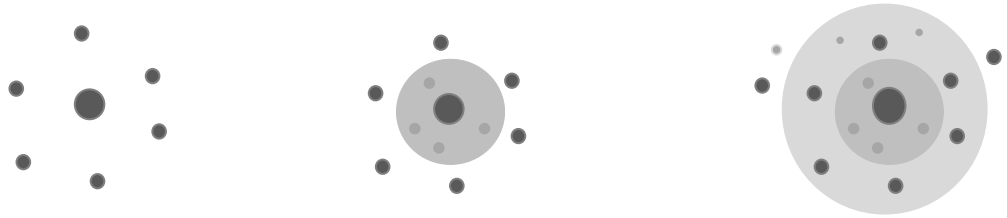


Рисунок 7 – Модель «планируемый полицентризм» (интеграционная)

Система взаимодополняющих центров в рамках единого плана развития региона. Это управляемая децентрализация (Минская агломерация, города и «деревни-спутники» областных центров). Развиваются в соответствии с Государственной градостроительной политикой, осуществляется комплексное планирование. Для данной модели характерны: функциональная специализация – каждому центру присваивается своя роль: финансовый центр, университетский кампус, инновационный кластер, культурный центр, логистический узел; развитая транспортная связность: создание эффективного общественного транспорта (скоростное железнодорожное сообщение, метро) между центрами. Стремление создать в каждом центре смешанную застройку, чтобы сократить маятниковую миграцию.

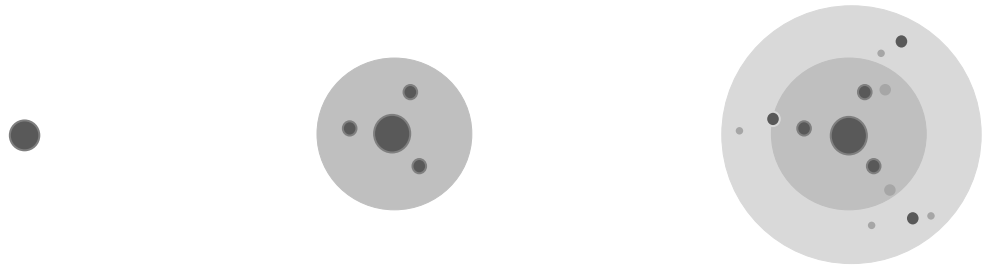


Рисунок 8 – Модель децентрализованная

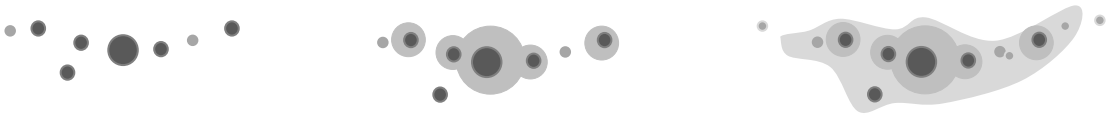


Рисунок 9 – Модель сращивания

Возникновение полицентрического региона через сближение и функциональное слияние нескольких независимых городов или населенных пунктов в единую агломерацию или непрерывную урбанизированную зону, где границы между населенными пунктами стираются. Такая модель характерна при экономической взаимозависимости, географическом линейном расположении (Столинский регион Полесья), общем рынке труда или Брестский трансграничный кластер «Брест –Жабинка – Кобрин» с логистико-индустриальным парком. Данная модель может стремится к отсутствию ярко выраженного доминирующего центра, развивается сеть равноправных игроков, либо с выраженным центром и дополняющими подцентрами. Регион воспринимается как единый экономический и социальный организм.

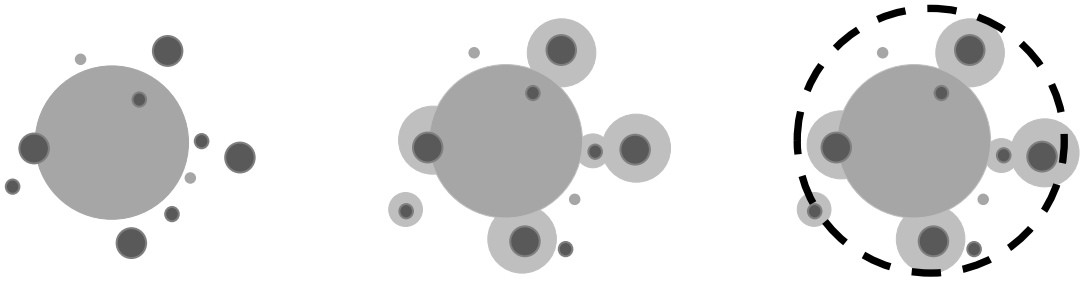


Рисунок 10 – Модель «природно-ядерный (парк-центричный) полицентризм»

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-20-34

Модель, где главным структурообразующим элементом сети выступает не город, а заповедная территория, рекреационный объект (Беловежская пуща, Припятское Полесье, оз. Белое, оз. Нарочь или озера Браславского региона) рассматривается не как изолированный туристический объект, а как активное экологическое и экономическое ядро для целой сети населенных пунктов вокруг нее. Развитие инфраструктуры и услуг концентрируется в узлах-буферах вокруг нее.

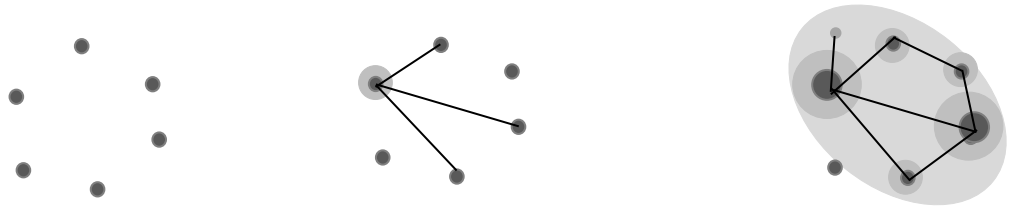


Рисунок 11 – Модель сетевая (нодальная)

Предполагает развитие предыдущих моделей. Акцент делается не на сами центры, а на потоки между ними (информация, капитал, люди, товары). Городской регион – это сеть узлов (нодов) и связей. В связи с ростом цифровизации, экономики знаний, гибких форм занятости. Здесь на первый план выходит качество цифровых и транспортных коммуникаций. Такие центры могут быстро набирать или терять вес в зависимости от их подключенности к сетям.

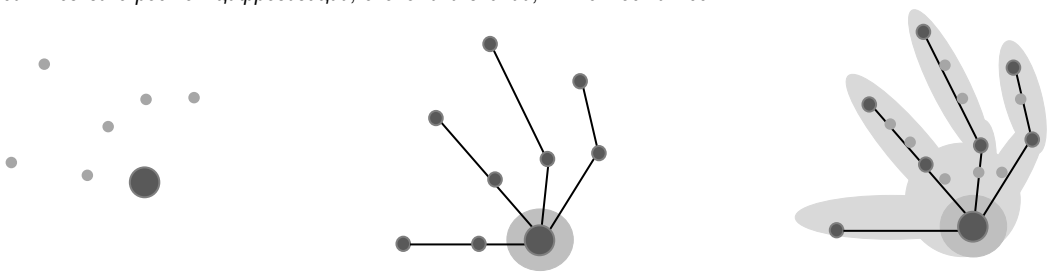


Рисунок 12 – Модель зеленый полицентризм

Альтернативная экологически ориентированная модель. Полицентризм используется как инструмент для сохранения зеленых зон и биоразнообразия. Новые центры развиваются компактно, а между ними остаются обширные незастроенные территории – экологические коридоры, сельхозугодья, рекреационные зоны. Данный подход соответствует экологической повестке, устойчивому развитию и улучшению качества жизни. Особенностью данной модели будет жесткое зонирование, четкое разделение застроенных территорий и природного каркаса, а также компактность центров: высокая плотность застройки внутри узлов для минимизации «расползания». Примером может служить развитие региона Копенгагена или агломерации Стокгольма («Пальцы руки» – урбанизированные коридоры вдоль ж/д линий, между ними – зеленые клинья). Концепция «городов-спутников» в некоторых скандинавских странах.

На практике в развитии любого крупного городского региона сочетаются элементы разных моделей. Выбор модели зависит от исторического контекста, экономики, географии и политической воли. Современный тренд – переход от простой децентрализации к управляемому, экологичному и сетевому полицентризму.

Функциональная специализация узлов и реализация концепции полицентричных сетей (на примере Брестской области)

В перспективе предлагается создавать полицентричные сети городов, населенных пунктов различной специализации и уровнями, кластеры.

Брестский трансграничный кластер

1. "Логистико-индустриальный парк".

Специализация – «международный транспортно-логистический узел» (рисунок 3), распределенная логистика и дистрибуция. Центр – город Брест – международный таможенный терминал. Города-сателлиты: Жабинка как распределительный центр, логистический спутник с наличием складских и таможенных терминалов, с перевалочными комплексами для сельхозпродукции, производством упаковки и тары; Кобрин – центр консолидации грузов, промышленно-логистический центр с глубокой переработкой сельхозсырья, производством компонентов для логистического оборудования, ремонтом и обслуживанием транспортной техники; аг. Чернавчицы – логистика скоропортящихся товаров.

2. Трансграничный медицинский кластер.

Специализация: – медицинский туризм и реабилитация. Наличие развитой медицинской инфраструктуры, близость к европейскому рынку, природные лечебные ресурсы. Развитие водно-зеленого диаметра Бреста и пригорода как курортно-рекреационной зоны. Города-сателлиты: Жабинка как филиал с возможностями проведения высокотехнологичных операций. Сельсоветы и агрогородки: аг. Томашовка – Центр реабилитации и SPA; аг. Медно – бальнеологический центр, озеро Рогознянское (сан. Берестье), озеро Белое (ОАО «Брестпроект» разработана концепция создания туристического кластера, 2025 г.) в заказнике Прибужское Полесье (использование местных минеральных вод, производство фитопрепаратов); г. п. Домачево – геронтологический центр развития пансионатов для пожилых людей, услуги долговременного ухода, центр активного долголетия.

3. Технологический энергоиндустриальный пояс Брестской области (с образовательно-инновационным кластером).

Центр в городе Барановичи. Наличие крупных образовательных учреждений, развитая промышленная база. Специализация: машиностроение и энергетика, подготовка кадров и технологические инновации. Города-сателлиты: Городище (Барановичский район) – образовательный кампус (создание межвузовского кампуса, лаборатории Industry 4.0, бизнес-инкубатора для стартапов); Ляховичи – центр профессионального образования (колледжи для подготовки рабочих специальностей, учебно-производственные комплексы, центр сертификации квалификаций); Белоозерск – энергетический хаб (Березовская ГРЭС, производство энергетического оборудования, центр компетенций по энергоэффективности); Береза – переработка ресурсов с производством строительных материалов, развитие циркулярной экономики; Ивацевичи – полный цикл переработки древесины, производства мебельной продукции; Ганцевичи – ремонт сельхозтехники, производство лекарств, плазмы крови, переработке торфа и сапропеля, разведение рыбы, выращивание ягод. На базе сельсоветов и агрогородков энергоиндустриального пояса – развитие биоэнергетического кластера, переработка древесных отходов и пр.

4. Полесский эко-агрокластер.

Центр – город Пинск, «столица Полесья». Специализация – агроэкология и туризм. Города-сателлиты: Столин – агротехнологический центр (семеноводство и питомниководство, производство органических удобрений, переработка ягод и лекарственных трав); Лунинец – рекреационный узел (развитие водного туризма, орнитологический

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-20-34

туризм, эко-образовательные программы). Сельсоветы и агрогородки: аг. Мотоль (Ивановский район) – развитие гастрономического туризма; аг. Ольшаны (Столинский район) – овощной сельскохозяйственный кластер; аг. Лясковичи – центр Национального парка «Припятский» (Петриковский район) – агротуризм на воде.

5. Моногород.

Микашевичи – добыча гранита, развитие дополнительных компетенций (производство камня для ландшафтного благоустройства, создание геопарка, развитие промышленного туризма) В настоящее время разработан и утвержден новый генеральный план г. Микашевичи. В 2024 г. проведены областные дожинки, в результате которых помимо обновления социальной, инженерной и транспортной инфраструктуры, нового благоустроенного парка город получил новое узнаваемое лицо (отремонтированные фасады домов главной улицы с уникальными изображениями индустриального города по тематике промышленности и малыми архитектурными формами с использованием добываемого гранита). Активно развивается промышленный туризм, где помимо карьера, водопадов и музея разрабатывается водный маршрут по Припяти.

6. Западный приграничный туристический кластер ("Беловежские ворота").

Специализация – экотуризм и рекреация. Центр – г. Каменец, сателлиты – сельсоветы и агрогородки: аг. Каменюки (Каменецкий район) – экологичный, научный туризм, развитие велотуризма; аг. Видомля (Каменецкий район) – этнотуризм, фестивали приграничной культуры; д. Пашутская Буда, д. Рожковка (Каменецкий район) – сельский туризм премиум, эконом-класса.

7. Ремесленно-туристический кластер ("Замковое кольцо").

Специализация – культурный туризм и традиционные ремесла), центр – г. Пружаны (концентрация памятников архитектуры (дворцы, усадьбы), сохраненные народные промыслов, пересечение туристических маршрутов). Города-сателлиты: г. п. Ружаны – историко-культурный центр (ревитализация дворца Сапег, фестиваль исторической реконструкции, школа реставрационных технологий); г. Коссово – арт-резиденция Дворец Пусловских, центр креативных индустрий, музей-мастерская народных промыслов, галерея современного искусства. Сельсоветы и агрогородки: аг. Шерешево (Пружанский район) – текстильный кластер (возрождение традиционного ткачества, производство льняных изделии, музей текстиля); аг. Линово (Пружанский район) – гончарный центр (мастерские гончарного искусства, производство строительной керамики, школа керамики для туристов).

8. Агроинновационный кластер ("Палеская жытніца").

Специализация – высокотехнологичное сельское хозяйство и семеноводство. Центр – г. Иваново: селекционно-семеноводческое направление, лаборатории микроклонального размножения, производство элитных семян, испытательные полигоны новых сортов. Сельсоветы и агрогородки: аг. Молодово (Ивановский район) – центр точного земледелия (использование дронов для мониторинга полей, системы капельного орошения, производство органических удобрений); аг. Достоево (Ивановский район) – развитие ремесленного кластера, возрождение льняного производства, производство льняного масла и тканей.

9. Припятский водно-экологический кластер.

Специализация – водный туризм и экологические услуги. Центр – г. Столин – наличие·разветвленной сети рек (Горынь Припять) и каналов, уникальные болотные экосистемы, богатая орнитофауна. Сельсоветы и агрогородки: агр. Речица (Столинский район) – центр водного туризма (создание сети причалов и стоянок, прокат плавсредств, школа экологического туризма); аг. Ольманы (Столинский район) – научный экотуризм (станция мониторинга болотных экосистем, орнитологические туры, центр изучения изменения климата).

10. Механизмы реализации и кооперации.

Транспортная интеграция: создание малого туристского кольца «*Жемчужины Берестейщины*»: Брест – Раковица – Малые Щитники – Гремяче – Высокое, Каменец – Чернавчицы – Брест; создание "*Полесского кольца*" – туристического маршрута, соединяющего Брест – Каменец – Пружаны – Ивацевичи – Пинск – Столин – Давид-Городок; маршрут «*Замки и крепости Брестчины*»: Брестская крепость – Пятый форт – Высокое – Ружаны – Косово – Ляховичи. Развитие водного транспорта по Припяти. Организация межмуниципальных автобусных маршрутов.

Экономическая кооперация может осуществляться путем создания межрайонных артелей, таких как "Полесские ягоды" (объединение производителей),"Беловежский сувенир" (ремесленники) и другие.

Управленческие механизмы. Разработка единого бренда ***1#региона*** для продвижения продукции (*Справка: в 2025 г. официально зарегистрирован товарный знак* ***«1#регион»****, в настоящее время идет разработка брендбука, логотипов и фирменного стиля не только самой Брестской области, но и городов и районов, которые будут обладать собственной идентичностью и узнаваемостью и объединены общей идеей развития области и страны в целом. Данная работа направлена на повышение имиджа региона, на раскрытие имеющегося потенциала. Повышение конкурентоспособности среди других городов, областей, чтобы удерживать свои позиции на региональном уровне и выходить на новые рынки. Расширение зоны экономического развития, привлекая к себе внимание новых инвесторов и туристов*), разработка межмуниципальных программ развития, формирование межмуниципальных советов при облисполкоме по развитию, создание общего инвестиционного фонда. Создание системы стимулов для межмуниципальной кооперации.

Нормативно-правовые меры. Закрепление понятий "агломерация" и "полицентризм" в законодательстве. Разработка гибких градостроительных регламентов СКТО, генеральных планов, стратегий пространственного развития (например, в 2019 году в г. Бресте разработана и утверждена «Стратегия пространственного развития г. Бреста до 2050 года» – это новый для Беларуси вид стратегических документов для развития городов [9, 10].

Инфраструктурные проекты предполагают: развитие высокоскоростных транспортных связей, создание межрегиональных логистических центров, модернизацию цифровой инфраструктуры.

Ожидаемые эффекты для системы расселения в целом: формирование сбалансированной полицентрической структуры, повышение устойчивости к экономическим кризисам, снижение логистических издержек на 15–20 %, рост производительности труда на 20–30 %, увеличение экспорта специализированной продукции, оптимизация использования инфраструктуры и ресурсов.

Для городских узлов: рост ВРП малых городов на 15–20 % за счет специализации, снижение безработицы и создание разнообразных рабочих мест, увеличение налоговых поступлений в местные бюджеты. Для сельских территорий: создание новых рабочих мест в агрогородках, рост доходов сельхозпроизводителей за счет кооперации, снижение оттока молодежи из сельской местности.

В целом социальный эффект заключается в снижение межрегиональной миграции, повышение качества жизни в малых городах.

Данная модель дополняет и совершенствует существующую моноцентрическую, позволяя максимально использовать конкурентные преимущества территории каждой из областей, создавая взаимодополняющую систему, где каждый населенный пункт находит свою уникальную нишу в общей структуре полицентричного развития.

Заключение

Предложенная методология планирования на основе модели «полицентричных сетей» позволяет системно управлять развитием современных городов Беларуси. Она обеспечивает стратегическую гибкость для перевода национальной системы расселения из состояния «централизованной иерархии» в состояние «устойчивой и адаптивной сети», где каждый регион в т. ч. малые города займут стратегически важное место.

Полицентрическое развитие позволяет: преодолеть региональные диспропорции (перераспределить экономический потенциал по территории страны), активнее использовать потенциал периферийных регионов, создать более устойчивую систему расселения.

Предложенная автором *методология полицентричных сетей и принципы* (специализации узлов, связности, иерархичности, устойчивости) были применены в ряде градостроительных и территориальных пилотных проектах в Брестской области и в Республике Беларусь разработанных совместно с ведущими градостроительными институтами Беларуси, где апробированы теоретические концепции полицентризма в реальной градостроительной практике. Что позволило проверить предложенные принципы и методы на практическом опыте на градостроительных и территориальных проектах различного масштаба – от пригородной зоны областного центра до схем планировки сельсоветов. Данный подход демонстрирует кардинальное изменение в подходах, от моноцентризма к сбалансированному, гибкому формированию полицентричных сетей городов. Эти проекты стали пилотными для апробации инновационных для Беларуси подходов. Результаты носят двойственный характер: инновационный

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-20-34

и комплексный подход, отказ от точечного планирования, использование инструментов полицентричного развития при существующих практических ограничениях.

Говоря о достижениях и реализованных подходах, необходимо отметить следующее:

– изменение масштаба и единицы планирования, отказ от планирования в административных границах. Переход к работе с функциональными системами: «Кобринское системное образование» (город + сельсоветы), «парк-центричная сеть» Беловежской пущи (природное ядро + города-ворота + агротуристические деревни), единая система расселения сельсовета (агрогородок + опорные деревни);

– внедрение принципа функциональной специализации узлов сети городов, населенных пунктов различной специализации и уровнями, кластеров: Брестский трансграничный кластер (логистико-индустриальный парк, трансграничный медицинский кластер). Предложение по созданию Технологического энергоиндустриального пояса Брестской области, Полесского эко-агрокластера, приграничного и ремесленно- туристического кластеров, агроинновационного кластера, Припятского водно-экологического кластера.

Реализован подход, где разные населенные пункты получают четкие, комплементарные роли: «логистический спутник» (Жабинка), «историко-культурные ворота» (Каменец), «агрорекреационный кластер» (деревни вокруг Пущи), выявление «центров базового обслуживания». Это позволяет избежать дублирования и создать основу для синергии;

– разработка и предложение в условиях Республики Беларусь иерархических сетевых моделей полицентричных регионов (планируемый полицентризм, децентрализованная, сращивания, парк-центричная, сетевая, зеленый полицентризм);

– обеспечение «территориальной справедливости». Во всех проектах прослеживается цель обеспечить доступность базовых услуг и качественной среды для жителей не только главного центра, но и периферийных узлов сети, что является ключевым социальным императивом полицентризма.

Предстоит доработать системные проблемы и направления:

– разработка и внедрение механизмов управления. Нет правовых форм для управления «системными образованиями», межбюджетного взаимодействия. Сложность реализации градостроительной документации при отсутствии единого заказчика и ответственного субъекта реализации. Необходимо разработка пилотного правового статуса для межпоселенческих территорий комплексного развития;

– доминирование пространственного планирования над экономическим и социальным. Проекты отвечают на вопросы «Где?» и «Что?», но недостаточно – на «Как?» и «За чей счет?». Не хватает экономических инструментов для стимулирования бизнеса в опорных деревнях или малых городах. Специализация часто декларативна. Необходимо: интеграция градостроительных схем с программами экономического развития, создание фондов развития и инструментов частно-государственного партнерства для узлов сети;

– неразвитость «горизонтальных» связей. Не хватает взаимодействуя между узлами. Необходим приоритет в инфраструктурном финансировании проектам, создающим латеральные связи между центрами второго и третьего порядка;

– отсутствие интегральной региональной стратегии. Рассмотренные проекты – разрозненные «островки» передового опыта. Нет общей для области концепции полицентричного каркаса, которая бы увязала развитие пригородной зоны Бреста, потенциал городов-спутников, туристические кластеры и системы сельского расселения в единую логику. Необходима разработка «Схемы полицентрического развития Брестской области» как надстройки над общей схемой территориального планирования;

– недостаток участия и коммуникации. Формирование сетей часто происходит «сверху вниз», без вовлечения ключевых участников, особенно жителей малых населенных пунктов, что приводит к сопротивлению. Необходимо внедрение обязательных процедур соучастного планирования и создания постоянных межпоселенческих диалоговых площадок.

Градостроительная практика Брестской области совершила качественный переход, доказав свою готовность к реализации принципов полицентризма на всех уровнях – от областного до сельского. Сформировался современный проектный язык и понимание. Однако, управленческая и финансовая системы остались в парадигме административного моноцентризма, что создает критический разрыв между планом и реальностью.

Таким образом, основной фронт работ смещается с архитектурно-планировочной сферы в сферу государственного управления, экономики права и финансов. Следующим этапом должен стать пилотный интеграционный проект (например, создание «Брестской агломерации» или «Ассоциации муниципалитетов территории Беловежской пущи»), наделенного реальными полномочиями и ресурсами. Только так можно трансформировать передовые градостроительные концепции в работающий механизм сбалансированного регионального развития.

Концепция "Полицентричных сетей" представляет собой современный ответ на вызовы пространственного развития страны. Ее реализация позволит создать более сбалансированную, устойчивую и конкурентоспособную систему расселения, соответствующую требованиям XXI века.

Список цитированных источников

1. Власюк, Н. Н. Стратегия и тактика пространственного планирования города Бреста. Концепция / Н. Н. Власюк. – Брест : БрГТУ, 2023. – 398 с.
2. Генеральные планы городов Брестской области (Брест, Пинск, Барановичи и др.). – URL: https://www.brest-region.gov.by/region/gen_plan (дата обращения: 15.10.2023).
3. Глазычев, В. Л. Урбанистика / В. Л. Глазычев. – М. : Европа, 2008. – 220 с.
4. Европейская программа сотрудничества Interreg (опыт приграничного сотрудничества и проектов реновации). – URL: https://www.interreg-central.eu (дата обращения: 15.10.2023).
5. Иванова, Е. А. Развитие малых и средних городов Беларуси: challenges и opportunities / Е. А. Иванова // Региональная экономика: проблемы и решения. – 2022. – № 5 (47). – С. 32–41.
6. Козловский, А. В. Совершенствование методов управления устойчивым развитием городских агломераций (на примере Минской агломерации): дис. … канд. экон. наук : 08.00.05 / Козловский Александр Владимирович. – Минск, 2019. – 187 с.
7. Лэндри, Ч. Креативный город / Ч. Лэндри ; пер. с англ. – М. : Классика–XXI, 2011. – 399 с.
8. Марцинкевич, Г. И. Современные вызовы и приоритеты пространственного развития Беларуси / Г. И. Марцинкевич // Журнал Белорусского государственного университета. Экономика. – 2020. – № 3. – С. 15–28.
9. Монахов, И. А. Кластерная политика и ее региональное измерение (опыт Германии) / И. А. Монахов // Инновации. Инновационная экономика – 2014. – № 6. – С. 39–47.
10. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года. – URL: https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf (дата обращения: 12.09.2023).
11. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2035 года. – URL: https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/NSUR-2035-1.pdf (дата обращения: 12.09.2023).
12. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года, 2025. – URL: https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR/natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-razvitija-respubliki-belarus-na-period-do-2040-goda.pdf (дата обращения: 12.09.2023).
13. Об утверждении схем комплексной территориальной организации областей и генеральных планов городов-спутников : Указ Президента Респ. Беларусь от 18 янв. 2016 г., № 13 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P31600013 (дата обращения: 30.08.2025).
14. ООН-Хабитат. Программа Организации Объединенных Наций по населенным пунктам. – URL: https://unhabitat.org (мировые best practices и отчеты по устойчивому urban development) (дата обращения: 30.08.2025).
15. Потаев, Г. А. Философия современного градостроительства / Г. А. Потаев. – Минск : БНТУ, 2018. – 347 с.
16. Проект «Умный город» в Беларуси. – URL: https://smartcity.by (дата обращения: 30.08.2025).
17. Региональная стратегия устойчивого развития Брестской области (на период до 2040 года). – URL: https://www.brest-region.gov.by/uploads/files/Proekt-Strategii-1.pdf (дата обращения: 30.08.2025).
18. Саскевич, П. А. Региональная экономика и управление : учебное пособие / П. А. Саскевич, Л. В. Шауро. – Минск : БГЭУ, 2018. – 255 с.

19. Смирнова, О. Г. Развитие моногородов в условиях структурной трансформации экономики : дис. … д-ра экон. наук : 08.00.05 / Смирнова Ольга Геннадьевна. – Екатеринбург, 2018. – 415 с.
20. Стратегия пространственного планирования Брест-2050 : утв. реш. Брестского гор. Совета депутатов от 30 мая 2019 г. № 60, Брестский городской исполнительный комитет.
21. Стратегия развития Брестской области на период до 2035 года. – URL: https://www.brest-region.gov.by/region/strategy (дата обращения: 15.10.2024).
22. Схема комплексной территориальной организации Брестской области. Отчет по проектной работе. Проектные предложения. Объект № 49.14 / Мин-во архитектуры и строительства, УП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА». – Минск, 2014. – Кн. 3. – 260 с.
23. Франция: новая стратегия промышленного развития. Полюсы конкурентоспособности. – URL: https://nisse.ru/articles/details.php. ELEMENT_ID (дата обращения: 24.09.2025).
24. Шауро, Л. В. Устойчивое развитие регионов Беларуси: проблемы и перспективы / Л. В. Шауро. – Минск : Белорусская наука, 2019. – 189 с.
25. Batty, M. Big data, smart cities and city planning / M. Batty // Dialogues in Human Geography. – 2013. – Vol. 3, № 3. – P. 274–279.
26. Caragliu, A. Smart cities in Europe / A. Caragliu, C. Del Bo, P. Nijkamp // Journal of Urban Technology. – 2011. – Vol. 18, № 2. – P. 65–82.
27. Castells, M. The Rise of the Network Society: The Information Age: Economy, Society, and Culture / M. Castells. – New York : Wiley, 2010. – 97 s.
28. Davoudi, S. Polycentricity in European spatial planning: from an analytical tool to a normative agenda / S. Davoudi // European Planning Studies. – 2003.
29. POLYCE. Metropolisation and Polycentric Development in Central Europe // Targeted Analysis. – Luxembourg : ESPON & Vienna University of Technology, 2013. – 76 s.
30. Gehl Architects. Making Cities for People. – URL: https://gehlpeople.com (дата обращения: 24.09.2025).
31. Территориальные обзоры ОЭСР: Рандстад, Голландия, Нидерланды. – https://www.oecd.org/en/publications/oecd-territorial-reviews-randstad-holland-netherlands-2007_9789264007932-en.html (дата обращения: 24.09.2025).
32. Küster, S. The Rhineland Ecosystem: Vision 2025 / S. Küster, P. Russ // A study by Startup Genome On behalf of the Ministry of Economic Affairs, Innovation, Digitalization and Energy of the State of North RhineWestphalia. – Düsseldorf, 2014. – 96 s.

References

1. Vlasyuk, N. N. Strategiya i taktika prostranstvennogo planirovaniya goroda Bresta. Koncepciya / N. N. Vlasyuk. – Brest : BrGTU, 2023. – 398 s.
2. General'nye plany gorodov Brestskoj oblasti (Brest, Pinsk, Baranovichi i dr.). – URL: https://www.brest-region.gov.by/region/gen_plan (data obrashcheniya: 15.10.2023).
3. Glazychev, V. L. Urbanistika / V. L. Glazychev. – M. : Evropa, 2008. – 220 s.
4. Evropejskaya programma sotrudnichestva Interreg (opyt prigranichnogo sotrudnichestva i proektov renovacii). – URL: https://www.interreg-central.eu (data obrashcheniya: 15.10.2023).
5. Ivanova, E. A. Razvitie malyh i srednih gorodov Belarusi: challenges i opportunities / E. A. Ivanova // Regional'naya ekonomika: problemy i resheniya. – 2022. – № 5 (47). – S. 32–41.
6. Kozlovskij, A. V. Sovershenstvovanie metodov upravleniya ustojchivym razvitiem gorodskih aglomeracij (na primere Minskoj aglomeracii): dis. … kand. ekon. nauk : 08.00.05 / Kozlovskij Aleksandr Vladimirovich. – Minsk, 2019. – 187 s.
7. Lendri, CH. Kreativnyj gorod / CH. Lendri ; per. s angl. – M. : Klassika–XXI, 2011. – 399 s.
8. Marcinkevich, G. I. Sovremennye vyzovy i prioritety pro-stranstvennogo razvitiya Belarusi / G. I. Marcinkevich // ZHurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika. – 2020. – № 3. – S. 15–28.
9. Monahov, I. A. Klasternaya politika i ee regional'noe izmerenie (opyt Germanii) / I. A. Monahov // Innovacii. Innovacionnaya ekonomika – 2014. – № 6. – S. 39–47.
10. Nacional'naya strategiya ustojchivogo social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na period do 2030 goda. – URL: https://economy.gov.by/up-loads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf (data obrashcheniya: 12.09.2023).
11. Nacional'naya strategiya ustojchivogo social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na period do 2035 goda. – URL: https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/NSUR-2035-1.pdf (data obrashcheniya: 12.09.2023).
12. Nacional'naya strategiya ustojchivogo razvitiya Respubliki Belarus' na period do 2040 goda, 2025. – URL: https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR/natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-razvitija-respubliki-belarus-na-period-do-2040-goda.pdf (data obrashcheniya: 12.09.2023).
13. Ob utverzhdenii skhem kompleksnoj territorial'noj organizacii oblastej i general'nyh planov gorodov-sputnikov : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 18 yanv. 2016 g., № 13 // Nac. pravovoj Internet-portal Resp. Belarus'. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P31600013 (data obrashcheniya: 30.08.2025).
14. OON-Habitat. Programma Organizacii Ob"edinennyh Nacij po naselennym punktam. – URL: https://unhabitat.org (mirovye best practices i otchety po ustojchivomu urban development) (data obrashcheniya: 30.08.2025).
15. Potaev, G. A. Filosofiya sovremennogo gradostroitel'stva / G. A. Potaev. – Minsk : BNTU, 2018. – 347 s.
16. Proekt «Umnyj gorod» v Belarusi. – URL: https://smartcity.by (data obrashcheniya: 30.08.2025).
17. Regional'naya strategiya ustojchivogo razvitiya Brestskoj oblasti (na period do 2040 goda). – URL: https://www.brest-region.gov.by/uploads/files/Proekt-Strategii-1.pdf (data obrashcheniya: 30.08.2025).
18. Saskevich, P. A. Regional'naya ekonomika i upravlenie : uchebnoe posobie / P. A. Saskevich, L. V. SHauro. – Minsk : BGEU, 2018. – 255 s.
19. Smirnova, O. G. Razvitie monogorodov v usloviyah strukturnoj transformacii ekonomiki : dis. … d-ra ekon. nauk : 08.00.05 / Smirnova Ol'ga Gennad'evna. – Ekaterinburg, 2018. – 415 s.
20. Strategiya prostranstvennogo planirovaniya Brest-2050 : utv. resh. Brestskogo gor. Soveta deputatov ot 30 maya 2019 g. № 60, Brestskij gorodskoj ispolnitel'nyj komitet.
21. Strategiya razvitiya Brestskoj oblasti na period do 2035 goda. – URL: https://www.brest-region.gov.by/region/strategy (data obrashcheniya: 15.10.2024).
22. Skhema kompleksnoj territorial'noj organizacii Brestskoj oblasti. Otchet po proektnoj rabote. Proektnye predlozheniya. Ob"ekt № 49.14 / Min-vo arhitektury i stroitel'stva, UP «BELNIIPGRADOSTROITEL'STVA». – Minsk, 2014. – Kn. 3. – 260 s.
23. Franciya: novaya strategiya promyshlennogo razvitiya. Polyusy konkurentosposobnosti. – URL: https://nisse.ru/articles/details.php. ELEMENT_ID (data obrashcheniya: 24.09.2025).
24. SHauro, L. V. Ustojchivoe razvitie regionov Belarusi: problemy i perspektivy / L. V. SHauro. – Minsk : Belorusskaya nauka, 2019. – 189 s.
25. Batty, M. Big data, smart cities and city planning / M. Batty // Dialogues in Human Geography. – 2013. – Vol. 3, № 3. – P. 274–279.
26. Caragliu, A. Smart cities in Europe / A. Caragliu, C. Del Bo, P. Nijkamp // Journal of Urban Technology. – 2011. – Vol. 18, № 2. – P. 65–82.
27. Castells, M. The Rise of the Network Society: The Information Age: Economy, Society, and Culture / M. Castells. – New York : Wiley, 2010. – 97 s.
28. Davoudi, S. Polycentricity in European spatial planning: from an analytical tool to a normative agenda / S. Davoudi // European Planning Studies. – 2003.
29. POLYCE. Metropolisation and Polycentric Development in Central Europe // Targeted Analysis. – Luxembourg : ESPON & Vienna University of Technology, 2013. – 76 s.
30. Gehl Architects. Making Cities for People. – URL: https://gehlpeople.com (data obrashcheniya: 24.09.2025).
31. Territorial'nye obzory OESR: Randstad, Gollandiya, Niderlandy. – https://www.oecd.org/en/publications/oecd-territorial-reviews-randstad-holland-netherlands-2007_9789264007932-en.html (data obrashcheniya: 24.09.2025).
32. Küster, S. The Rhineland Ecosystem: Vision 2025 / S. Küster, P. Russ // A study by Startup Genome On behalf of the Ministry of Economic Affairs, Innovation, Digitalization and Energy of the State of North RhineWestphalia. – Düsseldorf, 2014. – 96 s.

Материал поступил 05.01.2026, одобрен 06.02.2026, принят к публикации 06.02.2026

УДК 624.04

УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ШИРИНЫ И ПЕРЕМЕННОЙ ВЫСОТЫ

К. К. Глушко[1], К. А. Глушко[2]

[1] К. т. н., доцент кафедры архитектуры, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: const.hlushko@gmail.com

[2] К. т. н, доцент, доцент кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь

Реферат

При проектировании каркасных зданий часто возникает необходимость оценки устойчивости сжатых стержней, имеющих переменную высоту поперечного сечения, что обусловлено различными значениями внутренних усилий в таких элементах. При проведении реконструкции существующих зданий нередко возникает необходимость оценки запасов несущей способности примененных ранее строительных конструкций, проектирования подобных им новых при необходимости замены. При этом нередко виды конструкций, применявшихся ранее, не имеют современных аналогов, и, как следствие, отсутствуют какие-либо рекомендации к оценке их устойчивости как в современной научной и справочной литературе, так и в современных нормативных документах.

В настоящей статье представлено решение задачи потери устойчивости центрально сжатого стержня с переменной высотой поперечного сечения путем решения дифференциального уравнения продольного изгиба. Решение названной задачи выполнено с использованием метода конечных разностей, в котором используется последовательное уточнение формы изогнутой оси стержня. Примененный метод позволяет отказаться от использования функций Бесселя для задач подобного рода и дает возможность представить решение дифференциальных уравнений как системы линейных алгебраических уравнений, что приводит к некоторому упрощению процесса поиска коэффициентов расчетных длин. При этом уделено внимание на точность полученного приближенного решения путем экстраполяции производных разных порядков и произведено сравнение погрешности их вычисления с погрешностью округления при расчете. Полученные результаты представлены в виде графиков зависимости коэффициента расчетной длины от соотношения моментов инерции поперечных сечений на концах стержня.

Ключевые слова: устойчивость, жесткость, производная, коэффициент расчетной длины, критическая сила.

STABILITY OF CENTRALLY COMPRESSED RODS WITH A RECTANGULAR CROSS-SECTION OF CONSTANT WIDTH AND VARIABLE HEIGHT

K. K. Hlushko, K. A. Hlushko

Abstract

When designing frame buildings, it is often necessary to assess the stability of compressed bars with variable cross-sectional heights, which is due to the different values of internal forces in such elements. When renovating existing buildings, it is often necessary to assess the load-bearing capacity of previously used building structures and to design new ones similar to them if replacement is necessary. At the same time, the types of structures used previously often have no modern analogues, and as a result, there are no recommendations for assessing their stability in modern scientific and reference literature or in modern regulatory documents.

This article presents a solution to the problem of stability loss in a centrally compressed rod with a variable cross-sectional height by solving the differential equation of longitudinal bending. The solution to this problem was performed using the finite difference method, which involves sequential refinement of the shape of the curved axis of the rod. The method used makes it possible to dispense with the use of Bessel functions for problems of this kind and allows the solution of differential equations to be represented as a system of linear algebraic equations, which leads to a certain simplification of the process of finding the coefficients of the calculated lengths. At the same time, attention is paid to the accuracy of the approximate solution obtained by extrapolating derivatives of different orders, and a comparison is made of the errors.

Keywords: stability, rigidity, derivative, effective length coefficient, critical force.

Введение

Впервые решение задачи устойчивости стержней переменной жесткости, изменяющейся по степенному закону, было представлено А. Н. Динником [1], получившим точное решение дифференциального уравнения продольного изгиба с использованием функций Бесселя. При этом были рассмотрены различные способы закрепления концов стержней и различные законы изменения форм поперечных сечений. Методом последовательных приближений задача устойчивости шарнирно опертого по концам стержня была решена С. П. Тимошенко [2]. В последствии разработкой методов решения задачи устойчивости стержней переменного сечения, изгибная жесткость которых изменяется по линейному закону, занимался А. Р. Ржаницын, Ф. Блейх, С. Д. Лейтес [3–5]. Следует отметить, что результаты решения рассматриваемой задачи, полученные А. Н. Динником сложно применять на практике, рассмотренные А. Р. Ржаницыным задачи касались устойчивости шарнирно опертых стержней и стержней, один из концов защемлен, а другой свободен. При рассмотрении более сложных случаев устойчивости стержней переменного сечения описанные подходы имеют еще большую трудоемкость решения дифференциального уравнения интерпретации результатов на основе полученного решения. С этим обстоятельством связано развитие решений представленной задачи при помощи численных методов.

Авторами работ [6–9] при помощи метода конечных разностей были получены величины критических нагрузок на стержни переменного сечения различного типа и способов закрепления концов. Следует отметить, что в упомянутых работах недостаточное внимание уделено обоснованию достаточности дискретизации стержня на отдельные участки для вычисления численных производных, за исключением работы [7–14], где был использован метод экстраполяции Ричардсона [7] и Рунге – Ромберга [10, 14]. Решение подобной задачи представлено в работе [15], в которой так же отмечено, что полученное решение требует уточнения.

Теоретические предпосылки построения метода оценки потери устойчивости стержня

В представленной работе решение задачи устойчивости центрально сжатого стержня переменного сечения представлено с использованием метода конечных разностей. Целью работы является

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-35-42

определение коэффициента расчетной длины стержня для нахождения критической силы с использованием формулы Эйлера. Размеры поперечных сечений стержней изменяются по линейному закону от вершины (имеет меньшие размеры поперечного сечения) до основания с большими поперечными размерами. Уравнение продольного изгиба центрально сжатого стержня может быть описано при помощи уравнения второго порядка

$$EI(x)\frac{d^2v}{dx^2}+Pv=0\,, \tag{1}$$

разделив которое на $EI(x)$ и продифференцировав дважды, можно перейти к его следующему виду:

$$\frac{d^4w}{dx^4}+k_{\min}^2\left(w\frac{J_2(\xi)}{L^2}+\frac{d^2w}{dx^2}\cdot\frac{1}{J(\xi)}-\frac{dw}{dx}\frac{J_1(\xi)}{L}\right)=0\,; \tag{2}$$

$$k_{\min}^2=\frac{-N}{EI_{\min}}\,, \tag{3}$$

где E – модуль упругости стержня, Па; $N = –P$ – величина продольной силы при сжатии стержня, Н, $I(x)$ – момент инерции поперечного сечения стержня в точке с координатой x, w – безразмерные поперечные перемещение оси стержня, x – текущая координата в продольном направлении, м, P – усилие сжатия в стержне, Н, численно равное распору на его концах, L – длина стержня, м; $J(\xi)$ – закон изменения момента инерции поперечного сечения стержня, $\xi = x/L$ – безразмерная ордината, отношение момента инерции произвольного поперечного сечения к минимальному моменту инерции; выражения для определения $J_1(\xi)$, $J_2(\xi)$ приведены ниже.

$$J_1(\xi)=\frac{2}{J^2(\xi)}\frac{dJ(\xi)}{d\xi}\,, \tag{4}$$

$$J_2(\xi)=\frac{2}{J^3(\xi)}\left(\frac{d^2J(\xi)}{d\xi^2}\right)^2-\frac{d^2J(\xi)}{d\xi^2}\cdot\frac{1}{J^2(\xi)}\,, \tag{5}$$

в свою очередь $w = v/v_{max}$ – относительная величина перемещения оси стержня в точке с координатой x, безразмерная величина.

Уравнение (1) в некоторых случаях имеет точное решение [21]. Так, например, впервые задача устойчивости конического и пирамидального защемленного стержня с одной стороны и свободного с другой была решена Л. Эйлером в 1728 году. А. Н. Динник [1] при точном решении стержня с линейным изменением момента инерции поперечного сечения по длине использовал функции Бесселя, применение которых в инженерных расчетах часто вызывает сложности.

Рассматриваемый стержень с непрерывным изменением жесткости по длине можно приближенно заменить на стержень со ступенчатым изменением жесткости, разделив его на несколько участков по длине и принимая усредненную жесткость для каждого участка. Для каждого рассматриваемого участка необходимо составлять уравнения типа (1), принимая жесткость постоянной, при этом необходимо вводить дополнительные дифференциальные уравнения, которые описывают равенство углов поворота концов каждого из рассматриваемых соединяющихся участков. Данный подход был применен С. П. Тимошенко [2] для решения задачи устойчивости стержня со ступенчатым изменением жесткости. Недостаток данного подхода для решения задачи устойчивости стержня с непрерывным изменением жесткости – удвоенное количество уравнений при фиксированной кратности разбиения стержня на ступенчатые участки по длине (одна половина уравнений описывает продольный изгиб, вторая описывает равенство углов поворота концов участков стержней). Применение такого подхода при более чем трехкратным делением стержня на участки со ступенчатым изменением жесткости вызывает сложности для его практического использования.

Описываемый в представленной работе подход с введением функции изменения жесткости по длине $J(\xi)$ и производных от нее выражений (4) и (5) позволяет избавиться от осреднения жесткости стержня в узлах конечно-разностной сетки, в этом случае применяются их истинные значения жесткости.

Основные допущения, принятые при расчете:

1) соблюдается упругое деформирование материала стержня;

2) влиянием поворота поперечных сечений стержня на закон распределения продольной силы в нем можно пренебречь;

3) влиянием сдвига при определении поперечных деформаций стержня можно пренебречь.

Представляя функцию изогнутой оси стержня в общем случае неизвестной, можно произвести аппроксимацию ее второй и четвертой производных для средних точек, используя метод конечных разностей, принимая второй порядок точности [6, 7].

$$w_i^{II}=\frac{w_{i-1}-2w_i+w_{i+1}}{h^2}\,; \tag{6}$$

$$w_i^{IV}=\frac{w_{i-2}-4w_{i-1}+6w_i-4w_{i+1}+w_{i+2}}{h^4}\,, \tag{7}$$

где $h = L/n$ – расстояние между соседними точками по длине стержня, м;

n – количество участков разбиения.

При разбиении стержня на n участков следует вычислить производные, входящие в уравнение (1), для $n + 1$ точки, в то время как производные по формуле (6) могут быть вычислены для $n-3$ точек, поскольку производные изогнутой оси стержня в первых двух, последней и предпоследней точках будут содержать несуществующие значения (законтурные точки). Для исключения этого явления для данной задачи используется полином Лагранжа. Таким образом уравнения продольного изгиба для названных точек исключаются и заменяются на запись из граничных условий. Чтобы применять численные производные в начальной и конечной точке на оси стержня одного порядка точности, следует использовать интерполяционный полином Лагранжа для вычисления значений функции изогнутой оси в безразмерных ординатах по шести точкам и записать его производные

$$L(x)=\sum_{i=0}^{n}w_iI_i(x)\,, \tag{8}$$

где

$$I(x)=\prod_{j=0,j\neq i}^{n}\frac{x-x_j}{x_i-x_j}\cdot\frac{x-x_{j+1}}{x_i-x_{j+1}}\cdot\frac{x-x_{j+2}}{x_i-x_{j+2}}\cdot\ldots\cdot\frac{x-x_n}{x_i-x_n}\,; \tag{9}$$

$$\frac{\Delta w_0}{h}=\frac{1}{h}\left(-\frac{137}{60}w_0+5w_1-5w_2+\frac{10}{3}w_3-\frac{5}{4}w_4+\frac{1}{5}w_5\right); \tag{10}$$

$$\frac{\Delta^2w_0}{h^2}=\frac{1}{12h^2}(45w_0-154w_1+214w_2-156w_3+61w_4-10w_5)\,; \tag{11}$$

$$\frac{\Delta^3w_0}{h^3}=\frac{1}{4h^3}(17w_0+71w_1-118w_2+98w_3-41w_4+7w_5)\,; \tag{12}$$

$$\frac{\Delta w_n}{h}=\frac{1}{h}\left(\frac{137}{60}w_n-5w_{n-1}+5w_{n-2}-\frac{10}{3}w_{n-3}+\frac{5}{4}w_{n-4}-\frac{1}{5}w_{n-5}\right); \tag{13}$$

$$\frac{\Delta^2w_n}{h^2}=\frac{1}{12h^2}(45w_n-154w_{n-1}+214w_{n-2}-156w_{n-3}+61w_{n-4}-10w_{n-5})\cdot \tag{14}$$

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-35-42

Также функцию изогнутой оси w *(x)* следует заменить формой изогнутой оси *Y(x)*. Для дальнейших вычислений нужно записать следующее приближенное равенство на основе уравнения (2), переходя от дифференциалов к конечным разностям.

$$\Delta^4 w = -u^2\left(Y\frac{J_2(\xi)}{n^4} + \frac{\Delta^2 Y}{n^2}\cdot\frac{1}{J(\xi)} - \Delta Y\frac{J_1(\xi)}{n^3}\right), \qquad (15)$$

где

$$u^2 = \frac{-NL^2}{EI_{\min}}. \qquad (16)$$

В качестве граничных условий приняты следующие условия закрепления концов:

1) оба конца имеют шарнирные опоры;

2) конец стержня с меньшими размерами поперечного сечения закреплен шарнирно, другой защемлен;

3) конец стержня с большими размерами поперечного сечения закреплен шарнирно, другой защемлен;

4) оба конца стержня защемлены и неподвижны в поперечном направлении;

5) скользящая заделка на конце стержня с меньшими размерами поперечного сечения;

6) конец стержня с меньшими размерами поперечного сечения свободен, другой защемлен.

Для описанных двух последних случаев граничные условия свободного конца стержня будут иметь вид

$$\Delta^3 w = -u^2\left(\frac{1}{J(\xi)}\cdot\frac{\Delta Y}{n^2} - \frac{Y}{n^3}\cdot\frac{J'(\xi)}{J^2(\xi)}\right), \qquad (17)$$

где $J'(\xi)$ – производная закона изменения момента инерции поперечного сечения стержня.

Составляя уравнения (15) для средних точек и граничные условия для крайних, можно составить следующее равенство:

$$[A]\cdot[w] = u^2[Z], \qquad (18)$$

где [*A*] – матрица из коэффициентов при неизвестных значениях безразмерных ординат w_i, которая принимает вид при отсутствии защемления на концах;

[*w*] – вектор неизвестных безразмерных ординат функции изогнутой оси в каждой точке;

[*Z*] – вектор значений производных формы $Y_i = Y(x_i)$ изогнутой оси и момента инерции $I(x_i)$ в тех же точках.

$$[Z] = -\left(\frac{1}{n^4}\left[J_2(\xi_i)\right]\cdot[Y1] + \frac{1}{n^2}\left|\frac{1}{J(\xi_i)}\right|\cdot\left[\Delta^2 Y1\right] - \frac{1}{n^3}\left[J_1(\xi_i)\right]\cdot[\Delta Y1]\right), \qquad (19)$$

где, в свою очередь, $\lfloor J_2(\xi_i)\rfloor$ – квадратная диагональная матрица, ненулевые члены которой – аргументы функции (5);

$\left|\frac{1}{J(\xi_i)}\right|$ – квадратная диагональная матрица, ненулевые члены которой – обратные значения функции закона изменения момента инерции поперечного сечения стержня;

$\lfloor J_1(\xi_i)\rfloor$ – квадратная диагональная матрица, ненулевые члены которой – аргументы функции (4);

$[Y1], [\Delta Y1], \lfloor\Delta^2 Y1\rfloor$ – векторы значений функции формы изогнутой оси стержня, ее первой и второй конечной разности, в которых первые два и последние два элемента являются значениями правой части граничных условий задачи.

Следует также отметить, что представление исходного уравнения (2) в разностном виде (15) обладает свойством консервативности.

Определение вектора значений функции изогнутой оси стержня $[w]$ осуществляется при решении системы линейных уравнений в матричном виде (19).

$$[w] = u^2[A]^{-1}[Z]. \qquad (20)$$

При решении этого уравнения удобно принять $u^2 = 1$ с последующей нормализацией вектора [*w*] для подстановки его значений на место аналогичного вектора [*Y*] – процесс вычисления вектора [*w*] является итерационным, при этом вектор значений [*Y*] задается изначально, его значения не должны быть линейно зависимыми. Равенство (15) только в том случае будет справедливым, когда вектор значений формы [*Y*] приблизится к нормализованному вектору значений функции [*w*]. Производя процесс решения уравнения (15) путем последовательных приближений и заменяя вектор [*Y*] на нормализованный вектор [*w*], можно в итоге построить график формы изогнутой оси стержня при продольном изгибе. Величина коэффициента расчетной длины стержня в этом случае может быть определена из следующего выражения:

$$\mu = \pi\sqrt{w_{i,\max}}, \qquad (21)$$

где $w_{i,\max}$ – максимальное по величине значение элемента *не нормализованного* вектора безразмерных ординат [*w*], поскольку обратная его величина является коэффициентом пропорциональности между правой и левой частью уравнения (18).

$$[A] = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 45 & -154 & 214 & -156 & 61 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -10 & 61 & -156 & 214 & -156 & 45 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \qquad (22)$$

[*Y*] – вектор ординат формы функции изогнутой оси в каждой точке, и векторы[*Y1*], [Δ*Y1*], [Δ^2*Y1*], составленные на его основе:

$$[Y]=\begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \\ Y_9 \\ Y_{10} \end{bmatrix}, \quad [Y1]=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad [\Delta Y1]=\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Y_3-Y_1 \\ Y_4-Y_2 \\ Y_5-Y_3 \\ Y_6-Y_4 \\ Y_7-Y_5 \\ Y_8-Y_6 \\ Y_9-Y_7 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \left[\Delta^2 Y\right]=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Y_1-2Y_2+Y_3 \\ Y_2-2Y_3+Y_4 \\ Y_3-2Y_4+Y_5 \\ Y_4-2Y_5+Y_6 \\ Y_5-2Y_6+Y_7 \\ Y_6-2Y_7+Y_8 \\ Y_7-2Y_8+Y_9 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{23}$$

диагональные матрицы значений $\left[\frac{1}{J(\xi_i)}\right]$, $[J_1(\xi_i)]$, $[J_2(\xi_i)]$:

$$\left[\frac{1}{J(\xi_i)}\right]=\begin{bmatrix} J^{-1}(\xi_0) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J^{-1}(\xi_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J^{-1}(\xi_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J^{-1}(\xi_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J^{-1}(\xi_4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J^{-1}(\xi_5) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J^{-1}(\xi_6) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J^{-1}(\xi_7) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J^{-1}(\xi_8) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J^{-1}(\xi_9) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J^{-1}(\xi_{10}) \end{bmatrix}, \tag{24}$$

$$[J_1(\xi_i)]=\begin{bmatrix} J_1(\xi_0) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_1(\xi_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_1(\xi_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_1(\xi_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_1(\xi_4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_1(\xi_5) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_1(\xi_6) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_1(\xi_7) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_1(\xi_8) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_1(\xi_9) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_1(\xi_{10}) \end{bmatrix}, \tag{25}$$

$$[J_2(\xi_i)]=\begin{bmatrix} J_2(\xi_0) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_2(\xi_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_2(\xi_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_2(\xi_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_2(\xi_4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_2(\xi_5) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_2(\xi_6) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_2(\xi_7) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_2(\xi_8) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_2(\xi_9) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_2(\xi_{10}) \end{bmatrix}, \tag{26}$$

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-35-42

Представленный пример, безусловно, имеет ограниченное применение ввиду недостаточно частого разбиения стержня по длине и введен исключительно для наглядности из-за своей компактности.

Матрица (22) не является симметричной относительно главной диагонали, поскольку первые две строки и последние две строки являются формулировкой граничных условий не при помощи разностных производных, взятых вперед или назад, а при помощи интерполяционного полинома Лагранжа ввиду большей точности получаемого решения. Схема записи элементов матрицы типа (22) представлена ниже.

$$[A]=\begin{bmatrix} \text{Область граничных условий (2 строки)} \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & \dots \\ \dots & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ \text{Область граничных условий (2 строки)} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

При решении задач подобного рода с применением разностных методов возникает вопрос о точности произведенного решения и достаточности дискретизации стержня по длине. Одним из подходов, применяемых для уточнения значений производных, является метод экстраполяции значений численных производных. При решении задачи устойчивости стержня переменной жесткости в работе [6] был применен метод экстраполяции Ричардсона. В представленной же работе также применен метод экстраполяции Рунге – Ромберга [8, 10, 16–18] не с целью уточнения величин численных производных, а с целью поиска такой кратности разбиения стержня по длине n, при котором величина экстраполированного приращения производной была бы сопоставима с погрешностью округления. Расчет стержней на устойчивость производился с числом участков разбиения стержня по длине n = 6, 12, 25, 50. При этом погрешность вычисления производных второго порядка точности уменьшалась в 4, 17 и 70 раз. Оценка погрешности первой производной функции изогнутой оси по методу Рунге – Ромберга произведена с использованием следующей формулы:

$$O=\frac{w_{h/2}-w_h}{3}, \quad (28)$$

где $w_{h/2}$ – численная производная функции изогнутой оси, определенная с использованием дробного (уменьшенного вдвое) шага;

w_h – то же, с использованием принятого шага.

Оценка погрешности стерших численных производных производилась путем последовательного дифференцирования первой производной.

Ввиду применения безразностных производных на концах стержней при формировании граничных условий был применен интерполяционный полином Лагранжа (формулы (8), (9), и его производные (10)–(14)). Число узлов сетки принималось равным от двух до шести, при этом последовательно уменьшалась погрешность интерполяции. Следует отметить, что для различных способов закрепления концов стержня применялась различная кратность разбиения стержня по длине.

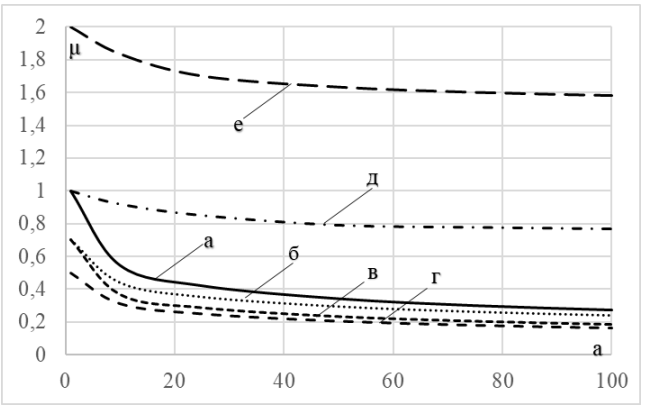
Представленный подход был реализован для решения задач устойчивости стержней прямоугольного поперечного сечения. В таблице 1 приведены формулы законов изменения величин моментов инерции поперечных сечений по длине стержня, приняв за f отношение максимального и минимального размеров поперечных сечений.

На рисунке 1 представлены графики изменения коэффициентов расчетных длин стержней для рассмотренных выше способов закрепления концов.

На рисунке 2 представлены графики изменения ординат безразмерных прогибов стержней переменного сечения при потере их устойчивости (функция-форма продольного изгиба), при этом принято соотношение максимального момента инерции стержня к минимальному равным $a = f^3$.

Таблица 1 – Формулы законов изменения величин моментов инерции поперечных сечений и их производных

Определяемый параметр	Прямоугольное поперечное сечение
$J(\xi)$	$(1+\xi(f-1))^3$
$J_1(\xi)$	$\dfrac{6(f-1)}{(1+\xi(f-1))^4}$
$J_2(\xi)$	$\dfrac{12(f-1)^2}{(1+\xi(f-1))^5}$

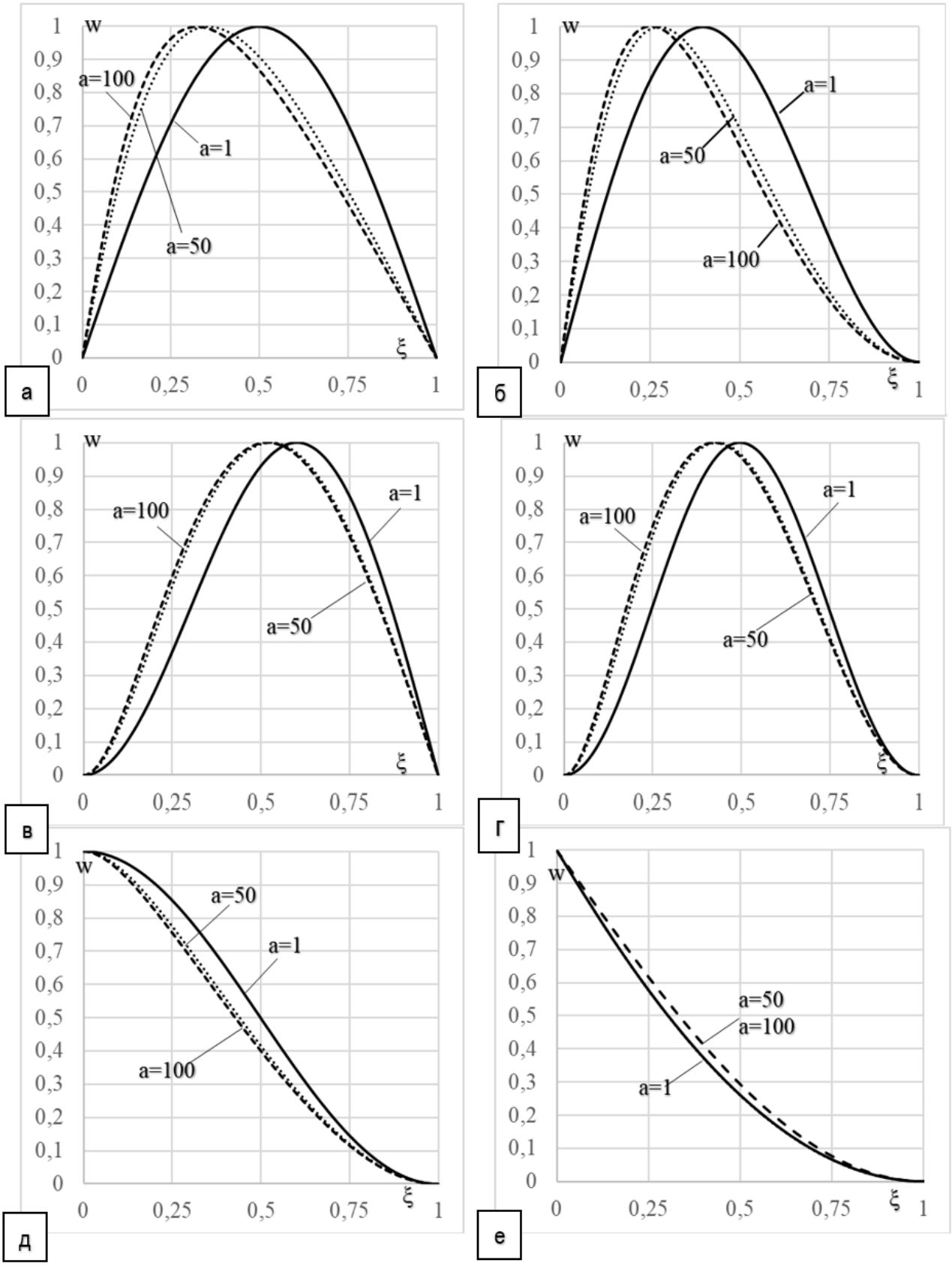


а) оба конца имеют шарнирные опоры; б) конец стержня с меньшими размерами поперечного сечения закреплен шарнирно, другой защемлен; в) конец стержня с большими размерами поперечного сечения закреплен шарнирно, другой защемлен; г) оба конца стержня защемлены и неподвижны в поперечном направлении; д) скользящая заделка на конце стержня с меньшими размерами поперечного сечения другой конец защемлен неподвижно; е) конец стержня с меньшими размерами поперечного сечения свободен, другой защемлен

Рисунок 1 – Коэффициенты расчетных длин стержней переменного поперечного сечения при продольном изгибе

Используя графики изменения расчетных длин, проверку устойчивости центрально сжатых стержней переменного поперечного сечения с линейным изменением его размеров по длине можно производить при помощи формулы Эйлера [19, 20], принимая для расчета момент инерции поперечного сечения узкого конца стержня в рассматриваемой плоскости изгиба.

Было произведено сравнение полученного решения с результатами расчета устойчивости стержней переменного поперечного сечения в программном комплексе Comsol Multiphysics. Модуль упругости $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, размеры поперечных сечений в верхней части 4 × 20 см, в нижней части 18,56 × 20 см, соотношение линейных размеров высоты f = 4,641, соотношение моментов инерции поперечного сечения a = 100, длина стержня 4 м. Каждый стержень разделен на восемь участков по длине, каждый из них имел постоянную изгибную жесткость, соответствующую среднему сечению. При рассмотренных выше условиях закрепления концов стержней результаты, полученные в программном комплексе Comsol Multiphysics, отличаются от полученных с помощью изложенного выше расчета менее 10 %. Ниже, в таблице 2 приведены результаты расчета величин критических сил и характерные изогнутые формы стержней в Comsol Multiphysics и сравнены с величинами критических сил по предложенному выше методу. Несмотря на малое отличие величин критических нагрузок, применение изложенного в работе метода позволяет быстро оценить величину критической нагрузки при помощи графиков, изображенных на рисунке 1, чем с использованием программных комплексов.

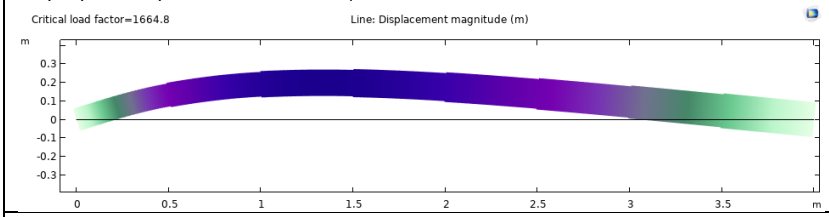
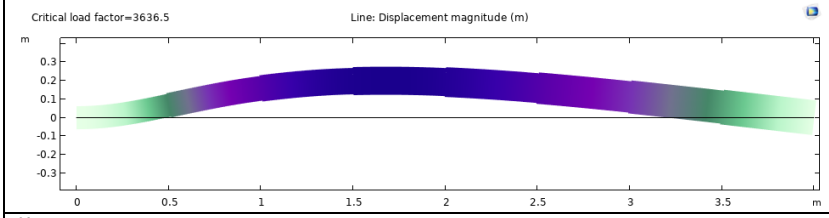
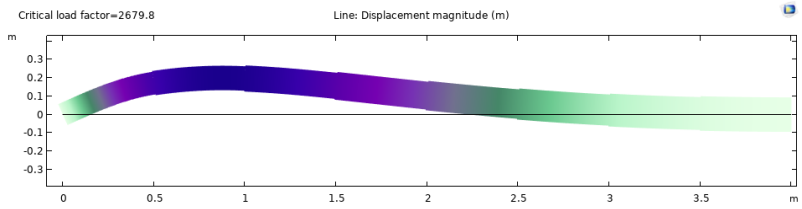
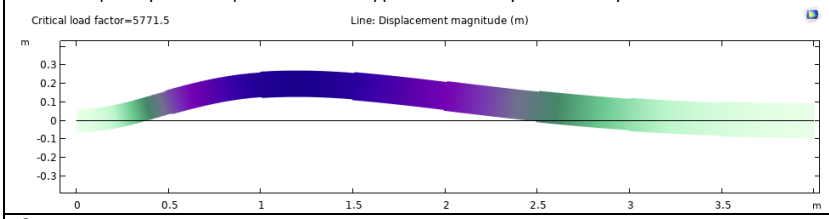
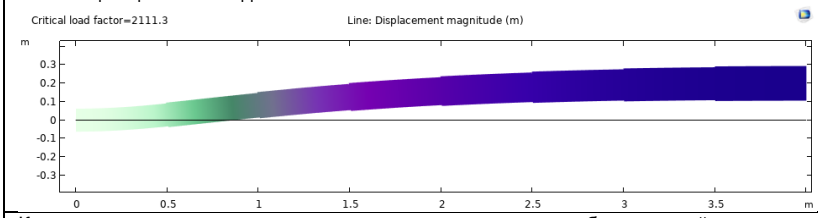
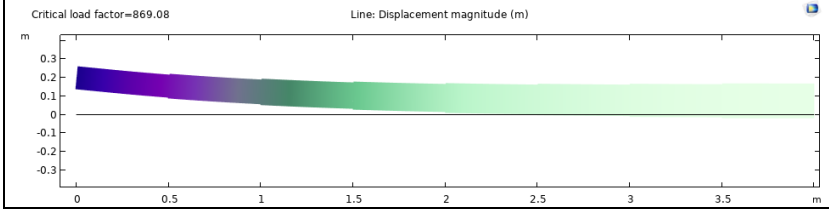


а) оба конца имеют шарнирные опоры; б) конец стержня с меньшими размерами поперечного сечения закреплен шарнирно, другой защемлен; в) конец стержня с большими размерами поперечного сечения закреплен шарнирно, другой защемлен; г) оба конца стержня защемлены и неподвижны в поперечном направлении; д) скользящая заделка на конце стержня с меньшими размерами поперечного сечения; е) конец стержня с меньшими размерами поперечного сечения свободен, другой защемлен

Рисунок 2 – Характерные кривые функции-формы стержней переменного поперечного сечения при продольном изгибе

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-35-42

Таблица 2 – Изогнутые формы стержней и величины критических нагрузок

Характерные изогнутые формы стержней	Величины критических сил, кН		Расхождение, %
	Определенные в Comsol Multiphysics	Вычисленные	
Шарнирное закрепление обоих концов 	1664,8	1813,88	8,26
Конец стержня с большими размерами поперечного сечения закреплен шарнирно, другой защемлен 	3636,5	4037	9,94
Конец стержня с меньшими размерами поперечного сечения закреплен шарнирно, другой защемлен 	2828,6	2595,3	8,99
Оба конца стержня защемлены и неподвижны в поперечном направлении 	5771,5	5137,61	12,31
Скользящая заделка на конце стержня с меньшими размерами поперечного сечения, другой конец защемлен неподвижно 	2033,8	2342,64	9,87
Конец стержня с меньшими размерами поперечного сечения свободен, другой защемлен 	869,8	863,59	0,63

Выводы

Разработан метод расчета устойчивости центрально сжатых стержней поперечного сечения с линейным и непрерывным изменением их высоты по длине. При решении этой задачи обоснована необходимая степень дискретизации стержня при помощи экстраполяции производных.

Полученные результаты в виде графиков изменения коэффициентов расчетных длин центрально сжатых стержней переменного поперечного сечения рекомендуется применять при расчете их на устойчивость в составе остова проектируемых и эксплуатируемых зданий.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-35-42

Список цитированных источников

1. Динник, А. Н. Продольный изгиб. Кручение / А. Н. Динник. – М. : АН СССР, 1955. – 392 с.
2. Тимошенко, С. П. Устойчивость упругих систем / С. П. Тимошенко ; под ред. В. З. Власова. – М. : ОГИЗ-Гостехиздат, 1946. – 532 с.
3. Ржаницын, А. Р. Устойчивость равновесия упругих систем / А. Р. Ржаницын. – М. : Гостехиздат, 1955. – 475 с.
4. Блейх, Ф. Устойчивость металлических конструкций : пер. с англ. / Ф. Блейх – М. : ФИЗМАТГИЗ, 1959. – 544 с.
5. Лейтес, С. Д. Устойчивость сжатых стальных стержней / С. Д. Лейтес. – М. : Госстройиздат, 1954. – 312 с.
6. Newmark, N. M. Numerical procedure for computing deflections, moments, and buckling loads / N. M. Newmark // ASCE Transactions. – 1943. – No. 2202. – Vol. 108. – P. 1161–1234.
7. Salvadori, M. G. Numerical computation of buckling loads by finite differences / M. G. Salvadori // ASCE Transactions. – 1951. – Vol. 116. – P. 590–624.
8. Глушко, К. К. Численный анализ устойчивости центрально сжатых стальных винтов в деревянных конструкциях / К. К. Глушко, Е. В. Маркечко // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 27 марта 2020 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2020. – С. 31–38.
9. Найчук, А. Я. Устойчивость стальных центрально сжатых винтов в массиве древесины / А. Я. Найчук, К. К. Глушко, Е. В. Маркечко // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 7. – С. 4–10.
10. Глушко, К. К. Устойчивость деревянного бруса, связанного с упругим основанием / К. К. Глушко, А. Я. Найчук, С. М. Семенюк // Промышленное и гражданское строительство. – М. : ПГС, 2022. – № 6. – С. 19–25.
11. Piazza, M. Strutture in legno – Materiale, calcolo e progetto secondo le nuovenormativeeuropee / M. Piazza, R. Tomasi, R. Modena. – Milano : Hoepli, 2005.
12. Formolo, S. Compression perpendicular to the grain and reinforcement of a pre-stressed timber deck / S. Formolo, R. Granström // Department of Civil and Environmental Engineering Division of Structural Engineering Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology. – Göteborg, 2007.
13. Nilsson, K. Skruvarmering som förstärkning i trä vid belastning vinkelrätt fiberriktningen : en försöksstudie, Examensarbete / K. Nilsson // Lunds Tekniska Högskola ; Avdelningen för Konstruktionsteknik. – Lund, 2002.
14. Глушко, К. К. Устойчивость сжатых стержней сплошного сечения переменной жесткости / К. К. Глушко, К. А. Глушко // Особенности развития региональной архитектуры : сб. статей Междунар. науч.-практ. конф.. Брест, 9 февр. 2024 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; под ред.: А. И. Карозы, В. В. Тура. – Брест, 2024. – С. 73–81.
15. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.
16. Гончаров, В. Л. Интерполяционные процессы и целые функции / В. Л. Гончаров. – Успехи математических наук. – 1937. – № 3. – С. 113–143.
17. Лазаров, Р. Д. О построении и исследовании однородных разностных схем / Р. Д. Лазаров, В. Л. Макаров, А. А. Самарский // Математический сборник. – 1982. – Т. 117 (159), № 4. – С. 469–480.
18. Калиткин, Н. Н. Об экстраполяции на сгущающихся сетках / Н. Н. Калиткин // Математическое моделирование. – 1994. – Т. 6, № 1. – С. 86–98.
19. Коршун, Л. И. Основы устойчивости стержневых систем / Л. И. Коршун, В. И. Игнатюк, А. С. Хамутовский. – Брест, 1995. – 64 с.
20. Пиковский, А. Ф. Статика стержневых систем со сжатыми элементами / А. Ф. Пиковский. – М. : ФИЗМАТГИЗ, 1961. – 396 с.
21. Горбачев, В. И. Об устойчивости стержней с переменной жесткостью / В. И. Горбачев, О. Б. Москаленко // Вестн. Моск. ун-та. Сер 1. Математика и механика. – 2010. – № 1. – С. 65.

References

1. Dinnik, A. N. Prodol'nyj izgib. Kruchenie / A. N. Dinnik. – M. : AN SSSR, 1955. – 392 s.
2. Timoshenko, S. P. Ustojchivost' uprugih sistem / S. P. Timoshenko ; pod red. V. Z. Vlasova. – M. : OGIZ-Gostekhizdat, 1946. – 532 s.
3. Rzhanicyn, A. R. Ustojchivost' ravnovesiya uprugih sistem / A. R. Rzhanicyn. – M. : Gostekhizdat, 1955. – 475 s.
4. Blejh, F. Ustojchivost' metallicheskih konstrukcij : per. s angl. / F. Blejh – M. : FIZMATGIZ, 1959. – 544 s.
5. Lejtes, S. D. Ustojchivost' szhatyh stal'nyh sterzhnej / S. D. Lejtes. – M. : Gosstrojizdat, 1954. – 312 s.
6. Newmark, N. M. Numerical procedure for computing deflections, moments, and buckling loads / N. M. Newmark // ASCE Transactions. – 1943. – No. 2202. – Vol. 108. – P. 1161–1234.
7. Salvadori, M. G. Numerical computation of buckling loads by finite differences / M. G. Salvadori // ASCE Transactions. – 1951. – Vol. 116. – P. 590–624.
8. Glushko, K. K. CHislennyj analiz ustojchivosti central'no szhatyh stal'nyh vintov v derevyannyh konstrukciyah / K. K. Glushko, E. V. Markechko // Teoriya i praktika issledovanij i proektirovaniya v stroitel'stve s primeneniem sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya (SAPR) : sb. st. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Brest, 27 marta 2020 g. / Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: S. M. Semenyuk [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2020. – S. 31–38.
9. Najchuk, A. YA. Ustojchivost' stal'nyh central'no szhatyh vintov v massive drevesiny / A. YA. Najchuk, K. K. Glushko, E. V. Markechko // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2020. – № 7. – S. 4–10.
10. Glushko, K. K. Ustojchivost' derevyannogo brusa, svyazannogo s uprugim osnovaniem / K. K. Glushko, A. YA. Najchuk, S. M. Semenyuk // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – M. : PGS, 2022. – № 6. – S. 19–25.
11. Piazza, M. Strutture in legno – Materiale, calcolo e progetto secondo le nuovenormativeeuropee / M. Piazza, R. Tomasi, R. Modena. – Milano : Hoepli, 2005.
12. Formolo, S. Compression perpendicular to the grain and reinforcement of a pre-stressed timber deck / S. Formolo, R. Granström // Department of Civil and Environmental Engineering Division of Structural Engineering Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology. – Göteborg, 2007.
13. Nilsson, K. Skruvarmering som förstärkning i trä vid belastning vinkelrätt fiberriktningen : en försöksstudie, Examensarbete / K. Nilsson // Lunds Tekniska Högskola ; Avdelningen för Konstruktionsteknik. – Lund, 2002.
14. Glushko, K. K. Ustojchivost' szhatyh sterzhnej sploshnogo secheniya peremennoj zhestkosti / K. K. Glushko, K. A. Glushko // Osobennosti razvitiya regional'noj arhitektury : sb. statej Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.. Brest, 9 fevr. 2024 g. / Brest. gos. tekhn. un-t ; pod red.: A. I. Karozy, V. V. Tura. – Brest, 2024. – S. 73–81.
15. Perel'muter, A. V. Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost' ih analiza / A. V. Perel'muter, V. I. Slivker. – Kiev : Stal', 2002. – 600 s.
16. Goncharov, V. L. Interpolyacionnye processy i celye funkcii / V. L. Goncharov. – Uspekhi matematicheskih nauk. – 1937. – № 3. – S. 113–143.
17. Lazarov, R. D. O postroenii i issledovanii odnorodnyh raznostnyh skhem / R. D. Lazarov, V. L. Makarov, A. A. Samarskij // Matematicheskij sbornik. – 1982. – T. 117 (159), № 4. – S. 469–480.
18. Kalitkin, N. N. Ob ekstrapolyacii na sgushchayushchihsya setkah / N. N. Kalitkin // Matematicheskoe modelirovanie. – 1994. – T. 6, № 1. – S. 86–98.
19. Korshun, L. I. Osnovy ustojchivosti sterzhnevyh sistem / L. I. Korshun, V. I. Ignatyuk, A. S. Hamutovskij. – Brest, 1995. – 64 s.
20. Pikovskij, A. F. Statika sterzhnevyh sistem so szhatymi elementami / A. F. Pikovskij. – M. : FIZMATGIZ, 1961. – 396 s.
21. Gorbachev, V. I. Ob ustojchivosti sterzhnej s peremennoj zhestkost'yu / V. I. Gorbachev, O. B. Moskalenko // Vestn. Mosk. un-ta. Ser 1. Matematika i mekhanika. – 2010. – № 1. – S. 65.

Материал поступил 12.12.2025, одобрен 28.01.2026, принят к публикации 09.02.2026

УДК [72.025.4:725+72.03](476-25)

БУДЫНАК БЕЛАРУСКАЙ ГЕАФІЗІЧНАЙ АБСЕРВАТОРЫІ Ў МІНСКУ: БУДАЎНІЧАЯ ГІСТОРЫЯ АД АЎТАРСКАЙ ЗАДУМЫ ДА НАВУКОВАЙ РЭСТАЎРАЦЫІ (1929–2025 гг.)

Р. А. Забела

Магістр архітэктуры, архітэктар-рэстаўратар, ТАА "Навукова-праектны цэнтр "РЭСТАБІЛІС", Мінск, Беларусь, e-mail: raman.zabiela@gmail.com

Рэферат

У артыкуле прадстаўлены сістэмны аналіз гісторыі праектавання, будаўніцтва, архітэктурных трансфармацый і рэстаўрацыі будынка Беларускай геафізічнай абсерваторыі ў Мінску ў перыяд 1929–2025 гг. Аб'ект, спраектаваны ў 1929 г. архітэктарам І. І. Валодзькам. На аснове архіўных праектных матэрыялаў, перыядычных выданняў 1920–1930-х гг., іканаграфічных крыніц і вынікаў натурных даследаванняў удакладняецца аўтарская архітэктурная канцэпцыя і яе эвалюцыя на розных этапах рэалізацыі.

Асобная ўвага надаецца адаптацыі першапачатковых праектных рашэнняў у 1930–1932 гг., у ходзе якой былі зменены аб'ёмна-планіровачныя і канструктыўныя элементы пры захаванні ключавых кампазіцыйных прынцыпаў. Упершыню ўводзіцца ў навуковы абарот і аналізуецца нерэалізаваны праект аздаблення фасадаў 1935 г., які адлюстроўвае спробу постканструктывісцкай адаптацыі будынка ва ўмовах змены архітэктурнай палітыкі СССР. Разглядаюцца пасляваенныя рамонтныя работы 1947–1948 гг. і ўтылітарныя перабудовы другой паловы XX ст., што прывялі да паступовай страты часткі першапачатковых архітэктурных адметнасцей.

Аналізуюцца этапы рэстаўрацыйных работ 1997–2007 і 2020–2025 гг., накіраваных на навукова абгрунтаванае аднаўленне аўтарскага аблічча будынка, уключна з раней не рэалізаваным колеравым рашэннем. Зроблена выснова аб прыналежнасці аб'екта да архітэктуры рацыяналізму як кірунку савецкага авангарду і крытычна пераасэнсавана яго традыцыйнае залічэнне да канструктывізму. Сістэматызацыя будаўнічай гісторыі дазваляе прасачыць, як эканамічныя, тэхналагічныя і ідэалагічныя абмежаванні 1930-х гадоў у СССР уплывалі на змену праектных рашэнняў, стварая аснову для аб'ектыўнай ацэнкі вартасцей выніковага аб'екта.

Ключевые слова: архітэктурная рэстаўрацыя, ахова архітэктурнай спадчыны, рацыяналізм, канструктывізм, постканструктывізм, І. І. Валодзька, савецкая архітэктура, архітэктурная спадчына Беларусі.

THE BELARUSIAN GEOPHYSICAL OBSERVATORY IN MINSK: CONSTRUCTION HISTORY FROM THE ORIGINAL ARCHITECTURAL DESIGN TO SCIENTIFICALLY BASED RESTORATION (1929–2025)

R. A. Zabiela

Abstract

This article presents a systematic analysis of the design, construction, architectural transformations, and restoration of the Belarusian Geophysical Observatory in Minsk from 1929 to 2025. Designed in 1929 by architect I. Valodźka, the building exemplifies Rationalist trends within Soviet avant-garde architecture. Using archival design documentation, 1920s–1930s periodicals, iconographic sources, and on-site studies, the research reconstructs the original architectural concept and traces its evolution through successive stages.

The study focuses on adaptations in 1930–1932, when spatial, structural, and volumetric elements were modified under economic and technological constraints while retaining key compositional principles. For the first time, an unrealized 1935 façade project is analyzed, reflecting a post-constructivist reinterpretation under shifting architectural policies. Post-war repairs (1947–1948) and utilitarian modifications in the latter half of the twentieth century are examined as factors contributing to the gradual loss of original features.

Restoration campaigns of 1997–2007 and 2020–2025 aimed to recover the architect's intended appearance, including a previously unrealized color scheme. The building's classification as Rationalist is substantiated, and its traditional attribution to Constructivism is critically reassessed. Systematizing its construction history allows tracing how economic, technological, and ideological constraints of the 1930s influenced design decisions, providing a foundation for an objective evaluation of the building's architectural values.

Keywords: architectural conservation, rationalism, constructivism, post-constructivism, I. Valodźka, soviet avant-garde architecture, architectural heritage of Belarus.

Уводзіны

Будынак Беларускай геафізічнай абсерваторыі ў Мінску з'яўляецца помнікам архітэктуры савецкага авангарду. Спраектаваны беларускім савецкім архітэктарам І. І. Валодзькам у 1929 г., аб'ект стаў адказам на складаныя функцыянальныя патрабаванні навуковай установы і ўвасабленнем прынцыпаў рацыяналізму.

Нягледзячы на тое, што абсерваторыя неаднаразова згадвалася ў навуковых публікацыях, яе аўтарская канцэпцыя і будаўнічая гісторыя дагэтуль не атрымалі сістэмнага асвятлення. Сучасныя публікацыі часта адносяць будынак да канструктывізму, не ўлічваючы прынцыпаў школы рацыяналізму, закладзеных аўтарам у першапачатковым праекце.

Да гэтага часу па-за межамі навуковай увагі заставалася спроба постканструктывісцкай адаптацыі будынка ў 1935 г., а таксама пасляваенныя перабудовы і эксплуатацыйныя трансфармацыі, якія змянілі яго аблічча. Аналіз будаўнічай гісторыі дазваляе сістэмна прасачыць гэтыя змены і вызначыць ступень захаванасці кампазіцыйных і стылістычных рашэнняў аўтарскага праекта.

Мэтай артыкула з'яўляецца аналіз і падсумаванне звестак па гісторыі праектавання, будаўніцтва і трансфармацый будынка Беларускай геафізічнай абсерваторыі ў перыяд 1929–2025 гг.

Утварэнне геафізічнай службы і пастаноўка праектнай задачы

Стварэнне Беларускай геафізічнай абсерваторыі ў Мінску было абумоўлена праграмай фарміравання ў СССР адзінай сістэмы назіранняў за прыроднымі працэсамі. У 1924 годзе ў БССР была ўтворана Беларуская метэаралагічная служба, якая спачатку функцыянавала як структурнае падраздзяленне навуковых і гаспадарчых устаноў рэспублікі і была арыентавана пераважна на забеспячэнне патрэб сельскай гаспадаркі [1]. У 1927 годзе служба была ўключана ў склад Беларускага навукова-даследчага інстытута сельскай гаспадаркі і лесаводства. У наступным годзе ў структуры інстытута было створана самастойнае падраздзяленне – Беларускі аддзел геафізічнай службы (Белгеафіз), які ўзначаліў прафесар метэаралогіі і кліматалогіі Беларускай дзяржаўнай сельскагаспадарчай акадэміі

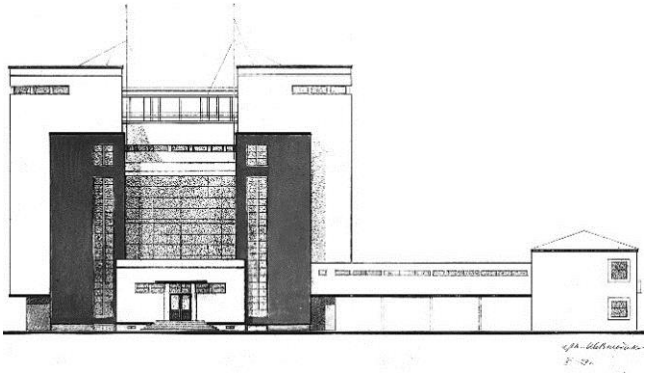
Аляксандр Іванавіч Кайгарадаў. Менавіта ім было ўзнята пытанне неабходнасці будаўніцтва ў Мінску стацыянарнай геафізічнай абсерваторыі [2]. У 1928 годзе Белгеафіз атрымаў функцыі каардынацыі сеткі метэастанцый і гідрастанцый БССР, апрацоўкі назіральных матэрыялаў, а таксама правядзення спецыялізаваных геафізічных даследаванняў. Аднак служба не мела ўласнага спецыяльнага корпуса і працавала ў прыстасаваных памяшканнях розных устаноў Мінска, што абмяжоўвала магчымасці размяшчэння абсталявання і правядзення дакладных назіранняў [3].

Важным этапам фарміравання канцэпцыі будучай абсерваторыі стала навуковая камандзіроўка А. І. Кайгарадава ў Нямеччыну ў 1928 годзе, падчас якой ён кансультаваўся са спецыялістамі Пацдамскай абсерваторыі і іншых навуковых цэнтраў. У 1929 годзе на падставе атрыманых ведаў было сфармулявана дэталёвае праектнае заданне на ўзвядзенне спецыялізаванага комплексу будынкаў абсерваторыі з поўным цыклам навуковых даследаванняў, а таксама жылога і гаспадарчага комплексу для персаналу [2]. У адпаведнасці з гэтым заданнем у тым жа годзе архітэктарам І. І. Валодзькам быў распрацаваны архітэктурны праект [4].

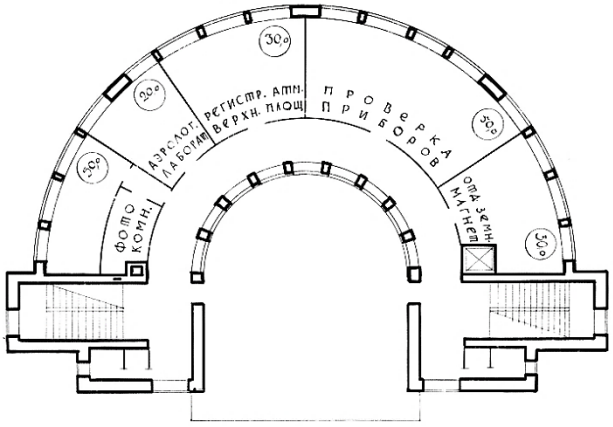
Іван Іосіфавіч (Ян Язэпавіч[1]) Валодзька належаў да першага пакалення беларускіх архітэктараў, якія атрымалі прафесійную адукацыю ўжо ў СССР. У 1928 годзе ён скончыў Вышэйшы мастацкатэхнічны інстытут у Маскве (ВМАТЭІН), дзе навучаўся ў вядучых тэарэтыкаў рацыяналізму М. А. Ладоўскага, У. Ф. Крынскага і М. В. Дакучаева, што вызначала далейшы творчы почарк архітэктара [10; 26, с. 333–334].

Архітэктурная канцэпцыя і праектныя рашэнні 1929 г.

Праект геафізічнай абсерваторыі адлюстроўваў перадавыя тэндэнцыі савецкага архітэктурнага авангарду, калі навуковатэхнічная мэтазгоднасць спалучалася з пошукам новай мастацкай мовы. Архітэктурная канцэпцыя грунтавалася на спалучэнні рознавялікіх геаметрычных аб'ёмаў, выразна дыферэнцыяваных паводле функцыі з кантрастнай афарбоўкай вялікіх плоскасцяў сцен (малюнкі 1, 2).



Малюнак 1 – Праект 1929 г. Галоўны фасад [4, арк. 5]



Малюнак 2 – Праект 1929 г. План 3-га паверха. [4, арк. 16]

У першапачатковым варыянце праекта асноўны чатырохпавярховы корпус (разам з паддашным паверхам) меў паўцыркульную, дугападобную ў плане форму і змяшчаў галоўныя службы абсерваторыі і калідор. Сіметрычна адносна яго размяшчаліся два пяціпавярховыя прастакутныя вежападобныя аб'ёмы лесвічных клетак, перад якімі знаходзіліся чатырохпавярховыя аб'ёмы гаспадарчых службаў. На ўзроўні пятага паверха паміж вежамі, паўтарая крывізну асноўнага корпуса, быў арганізаваны пераход, аформлены крытай каланадай, з выхадам на эксплуатуемую тэрасу над паддашным паверхам. Па падоўжнай восі будынка паміж вежамі прадугледжвалася суцэльнае ашкленне з эксплуатуемай тэрасай на ўзроўні чацвертага паверха. На ўзроўні першага паверха выступаў аднапавярховы аб'ём галоўнага вестыбюля, а цэнтральны ўваход акцэнтаваўся паўцыркульным навесам. Пад усім аб'ёмам будынка размяшчаўся цокальны паверх. З правага боку будынак абсерваторыі злучаўся на ўзроўні другога паверха доўгім пераходам на тонкіх апорах з катэджам на дзве сям'і.

Праект прадугледжваў плоскія эксплуатуемыя дахі не толькі як адметны элемент архітэктуры свайго часу, але і для размяшчэння навуковага абсталявання і правядзення метэаралагічных назіранняў, згодна з праектным заданнем [2].

Кампазіцыйная вертыкальная дынаміка аб'ёмаў узмацнялася вертыкальнымі чляненнямі стужкавага ашклення і вылучэннем вертыкальна выцягнутых плоскасцей цёмным колерам. Дадатковым акцэнтам служылі высокія маланкаадводы на вантавых расцяжках, размешчаныя на лесвічных рызалітах. Пры амаль роўных суадносінах вышыні фасада і яго шырыні вылучэнне рызалітаў лесвічных клетак візуальна аблягчала масу будынка і фармавала выразную вертыкальную накіраванасць кампазіцыі. Вертыкальны рух ураўнаважваўся вузкімі гарызантальнымі падсечкамі ваконных праёмаў вежаў, кантрастнымі гарызантальнымі колеравымі акцэнтамі і адносна статычнай кампазіцыяй цэнтральнай часткі будынка. Кантраст паміж вертыкальна арыентаванымі аб'ёмамі асноўнага корпуса і выцягнутым гарызантальным аб'ёмам перахода ўзмацняў дынаміку архітэктурнага вобраза і забяспечваў кампазіцыйную раўнавагу.

Будынак быў дакладна арыентаваны па баках свету і размешчаны ў супрацьлеглым ад уваходу на тэрыторыю канцы ўчастка – па восі выцягнутага партэра, які служыў для правядзення назіранняў і запуску зондаў. Злева ўздоўж партэра прадугледжвалася размяшчэнне двух жылых дамоў для супрацоўнікаў, справа – спартыўнага ядра і гаспадарчых пабудоў. Характар генеральнага плана дазваляе меркаваць, што праект быў распрацаваны да выбару тэрыторыі пад будаўніцтва абсерваторыі і ў далейшым быў перапрацаваны з улікам ўмоваў канкрэтнага участка [4].

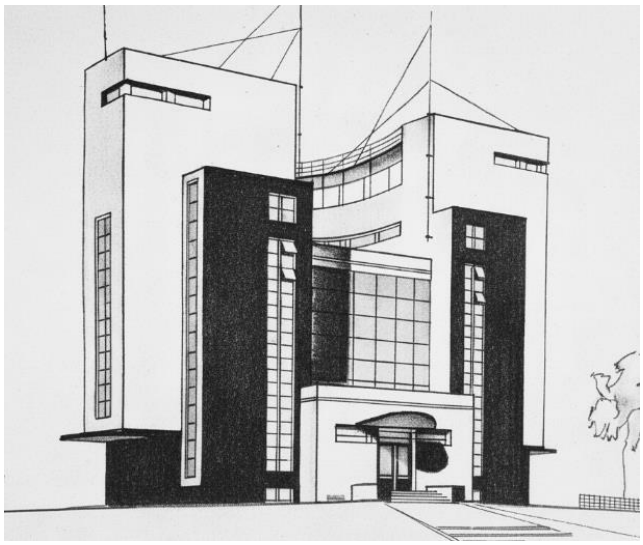
Метадалагічна праект 1929 года можна аднесці да рацыяналізму як плыні савецкага архітэктурнага авангарду. У адрозненне ад канструктывісцкага падыходу, які абсалютызаваў функцыю і канструкцыю, дадзены аб'ект дэманструе арыентацыю на працу з пластыкай аб'ёмаў, прасторавымі ўзаемадзеяннямі і паліхроміяй як сродкамі мастацкай выразнасці архітэктуры.

[1] У асабістым лістку па ўліку кадраў ад 7 лютага 1932 г., запоўненым самім архітэктарам, ён пазначыў сябе як «Валодзька Янка Язэпаў» [5]. Аналагічны варыянт прозвішча выкарыстоўваецца і ў беларускамоўнай перыёдыцы 1920–1930-х гг. [6]; [7]. Напісанне прозвішча як «Валадзько», якое сустракаецца ў энцыклапедычных выданнях канца XX ст. [8]; [9], з'яўляецца русіфікаванай формай і не адпавядае арыгінальнаму прозвішчу.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-43-49

Адаптацыя праектных рашэнняў 1930–1932 гг.

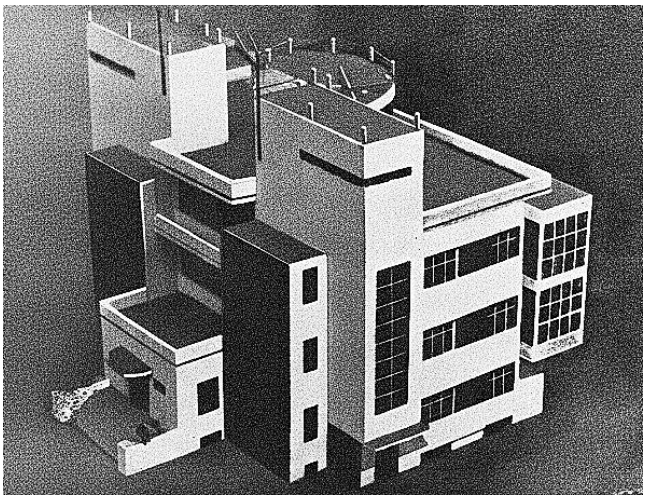
Да пачатку будаўніцтва першапачатковы праект быў некалькі разоў скарэктаваны. Характар зменаў можна вызначыць на падставе апублікаваных у выданнях таго часу ілюстрацый. Перспектыўны малюнак, змешчаны ў кнізе «Выяўленчае мастацтва БССР» 1932 г. [11], паказвае праектныя рашэнні, блізкія да аўтарскага варыянта 1929 года (малюнак 3).



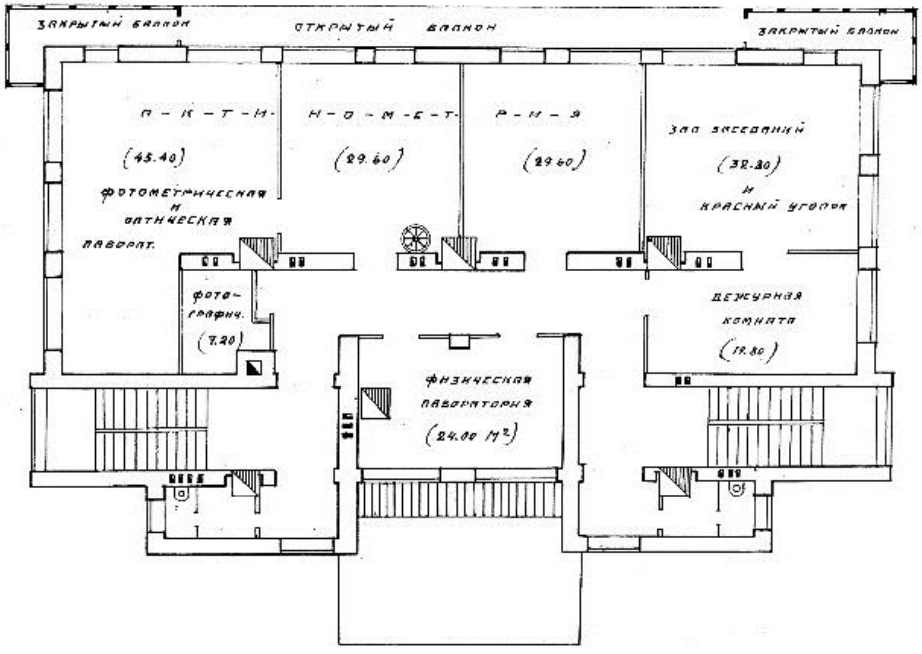
Малюнак 3 – Праект геафізічнай абсерваторыі з кнігі «Выяўленчае мастацтва БССР». 1932 г. [11]

Асноўным кампазіцыйным адрозненнем з'яўляецца адсутнасць пераходнай галерэі і катэджа, што, верагодна, было звязана з прывязкай праекта да будучай пляцоўкі. Пры гэтым будынак стаў прапарцыйна меншым, з удакладненай разбіўкай аконных пераплётаў, колькасцю праёмаў на вежах, маштабам ганка і іншымі дэталямі.

У тым жа 1932 годзе ў часопісе «Тэхніка ў масы» было апублікавана фота макета (малюнак 4), якое сведчыць пра далейшую карэкціроўку праекта ўжо ў частцы аб'ёмна-прасторавых і канструктыўных рашэнняў [12]. Праектны план 3-га паверха абсерваторыі адлюстраваны на малюнку 5.



Малюнак 4 – Фота макета будынка абсерваторыі з часопіса «Тэхніка ў масы». 1932 г. [12]



Малюнак 5 – Праектны план 3-га паверха абсерваторыі. Каля 1930 г. [13]

Асноўны корпус атрымаў прастакутную форму ў плане замест паўцыркульнай, а на яго плоскай эксплуатуемай кроўлі быў размешчаны паўцыркульны павільён для правядзення абсалютных і актынаметрычных вымярэнняў – «павільён для назірання за Сонцам»[2].

Гэты элемент па сваім кампазіцыйным значэнні замяніў першапачатковую каланаду пераходу паміж вежамі. Будынак зменшыўся на адзін паверх пры захаванні асноўных прапарцыйных суадносін аб'ёмаў. На дваравым фасадзе на ўзроўнях другога і трэцяга паверхаў з'явіліся зашклёныя выступаючыя вуглавыя балконы, злучаныя ўздоўж фасада пераходнымі галерэямі. Вежы атрымалі завяршэнні ў выглядзе слупкоў, якія нагадваюць крэнеляж сярэднявечных абарончых збудаванняў. Суцэльнае ашкленне галоўнага фасада было заменена адкрытымі балконамі. Але нягледзячы на істотную

[2] Размоўная назва павільёна, паводле ўспамінаў былых супрацоўнікаў, апытаных А. В. Бандарэнкам падчас працы над праектам рэстаўрацыі ў канцы 1990-х.

перапрацоўку аб'ёмных і планіровачных рашэнняў, І. І. Валодзьку атрымалася захаваць архітэктурную канцэпцыю і ключавыя кампазіцыйныя прыёмы першапачатковага праекта.

Пачатак і ход будаўніцтва

Паводле паведамленняў перыядычнага друку, пачатак будаўніцтва абсерваторыі планаваўся ўжо ў 1930 годзе [7], аднак фактычна работы распачаліся толькі ў пачатку 1932 года [14]. Пляцоўка была выбрана па-за межамі тагачаснай гарадской забудовы Мінска – на ўзвышшы ўздоўж Барысаўскага тракта. Такое размяшчэнне забяспечвала адкрыты гарызонт, мінімальны ўплыў гарадскіх шумоў і забруджванняў.

На адведзенай пад будаўніцтва тэрыторыі як найменш з XVII стагоддзя знаходзіліся могілкі вёсак Вялікая і Малая Сляпянка з невялікай драўлянай царквой Яна Хрысціцеля [15]. Будынак абсерваторыі быў размешчаны на самай высокай кропцы пагорка, за гістарычнымі могілкамі, аднак захаванне храма генеральным планам праекта не прадугледжвалася [13]. Царква была зачынена ў 1934 годзе і разбурана каля 1953 года. Могілкі, пазбаўленыя бачных надмагілляў, часткова захаваліся да нашага часу [16].

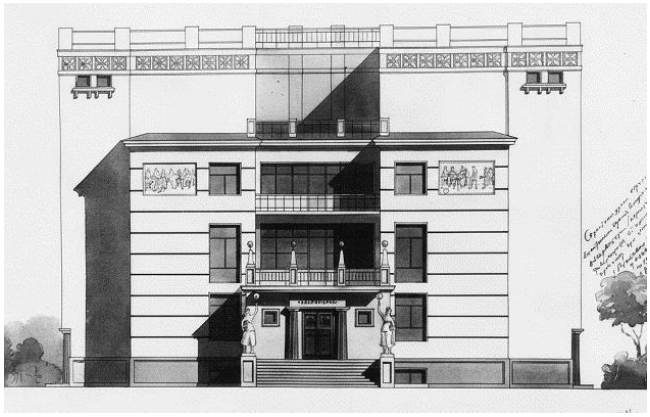
Да акупацыі Мінска нацыстамі ў 1941 годзе з усяго комплекса планаваных да ўзвядзення будынкаў была пабудаваная толькі сама абсерваторыя. Будынак не адрозніваўся складанымі канструктыўнымі рашэннямі: сцены былі выкананыя з цаглянай муроўкі таўшчынёй 640–770 мм на ўзроўні цокальнага паверха і 510–640 мм на астатніх паверхах. Перакрыцці – плоскія і рабрыстыя маналітныя жалезабетонныя пліты таўшчынёй 70–110 мм і бэлькі сячэннем 260 × 265 мм. Перакрыцці абапіраліся на падоўжныя ўнутраныя і вонкавыя нясучыя сцены.

Будаўніцтва суправаджалася працяглымі затрымкамі праз недахоп матэрыялаў і нізкай якасцю работ [14, 17, 18][3]. Нягледзячы на пастановы ЦК КП(б)Б і ўмяшанне СНК БССР, падрадная арганізацыя – Белкамунбудтрэст – сістэматычна зрывала тэрміны, а ў прэсе фіксаваліся выпадкі нецэлевога выкарыстання ёй дэфіцытных матэрыялаў. У жніўні 1935 года абсерваторыя пачала засяляцца ў новы будынак, хоць унутраныя работы яшчэ не былі завершаныя. З 1 студзеня 1936 года ўстанова функцыянавала ў складзе чатырох навуковых аддзелаў [2, 19], аднак фасады будынка заставаліся неатынкаванымі, пра што сведчаць фотаздымкі аб'екта [20, 21].

Нерэалізаваны праект аздаблення фасадаў 1935 года.

Узвядзенне геафізічнай абсерваторыі прыпала на перыяд змены архітэктурнай палітыкі ў СССР. Пастанова[4], прынятая ў лютым 1932 года па выніках конкурсу на будаўніцтва Палаца Саветаў у Маскве, задала кірунак на засваенне класічнай архітэктурай спадчыны [22]. Авангардныя плыні былі фактычна забароненыя, а класіцызаваныя элементы пачалі ўводзіцца не толькі ў новыя праекты, але і ў распрацаваныя або збудаваныя ў авангарднай эстэтыцы аб'екты. У гэтым кантэксце ў 1935 годзе быў распрацаваны праект аздаблення фасадаў, накіраваны на адаптацыю ўжо ўзведзенага авангарднага аб'ёму да новых ідэалагічных і эстэтычных патрабаванняў.

Праект постканструктывісцкай адаптацыі быў выкананы без удзела І. І. Валодзькі[5] і прадугледжваў эклектычнае насычэнне фасадаў будынка элементамі класічнага дэкору – рустоўкай, філёнгамі, пінаклямі, ляпнымі пано і скульптурамі [13] (малюнкі 6, 7).



Малюнак 6 – Паўночны (галоўны) фасад. Праектныя рашэнні 1935 г. [13]



Малюнак 7 – Паўднёвы фасады. Праектныя рашэнні 1935 г. [13]

Адначасова праект утрымліваў шэраг нязначных аб'ёмна-прасторавых зменаў: прадугледжвалася ліквідацыя галерэі ў цэнтральнай частцы другога паверха дваравога фасада, даданне слупкоў у цэнтральных частках другога і чацвёртага паверхаў галоўнага фасада, змяненне колькасці і габарытаў слупкоў на «вежах», адмова ад парапетных сцен на эксплуатуемай кроўлі асноўнага корпуса, а таксама іншае рашэнне дахавага павільёна з плоскай эксплуатуемай кроўляй і крытым пераходам да лесвічных клетак. Пры гэтым дадзеныя змены не адлюстраваныя на праектных планах, якія захоўваюцца разам з праектам фасадаў. Гэта дазваляе меркаваць, што планы адносяцца да фінальнага праекта пачатка 1930-х, аўтарства І. І. Валодзькі[6].

Праект датаваны 12 лістапада 1935 года і быў узгоднены Г. В. Якушкам 16 лістапада таго ж года, калі ўзведзены будынак ужо знаходзіўся ў эксплуатацыі Белгідрамета [13]. Гэта дае падставы меркаваць, што затрымка фасадных аддзелачных работ і ўвод аб'екта з неатынкаванымі фасадамі былі абумоўлены не толькі зрывамі тэрмінаў з боку падраднай арганізацыі, але і неабходнасцю перагляду стылістычнага рашэння ўжо ўзведзенага будынка (малюнак 8).

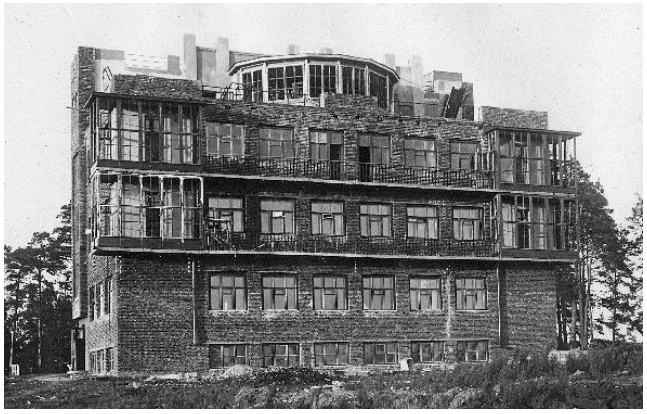
[3] Матэрыялы перыядычных выданняў выяўленыя і прадстаўленыя У. А. Садоўскім, за што аўтар выказвае яму падзяку.

[4] Пастанова Савета будаўніцтва Палаца Саветаў пры Прэзідыуме ЦВК СССР.

[5] Аўтар фасадных рашэнняў пазначаны як грамадзянскі інжынер-архітэктар; асабісты подпіс ідэнтыфікаваць не атрымалася, але ён дакладна не належыць І. І. Валодзьку, які на той момант ужо працаваў у Маскве.

[6] Раней постканструктывісцкая адаптацыя памылкова прыпісвалася І. І. Валодзьку як фінальны аўтарскі праект 1930 г. [2].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-43-49



Малюнак 8 – Агульны выгляд будынка ў працэсе выканання аддзелачных прац. 1936 г. [21]

Праектныя рашэнні па дэкаратыўным аздабленні фасадаў рэалізаваныя не былі. У выніку будынак захаваў усе асноўныя асаблівасці аўтарскага праекта, акрамя кантраснага колеравага рашэння фасадаў. Найбольш верагоднымі прычынамі сталі абмежаваныя тэрміны, неабходнасць хутчэйшага завяршэння работ у будынку, дзе ўжо працавалі і пражывалі супрацоўнікі, а таксама дэфіцыт фінансавых сродкаў і матэрыялаў, на які ўказвалася на стадыі будаўніцтва [14]. Магчыма, ускосна паўплывала таксама размяшчэнне аб'екта па-за межамі горада.

Як будынак выглядаў пасля завяршэння работ па аздабленні фасадаў, сведчыць здымак, апублікаваны ў 1941 г. Паводле яго, будынак у дэталях адпавядаў фінальным рашэнням пачатку 1930-х гг., аднак меў суцэльную светлую афарбоўку (малюнак 9).



Малюнак 9 – Агульны выгляд будынка пасля завяршэння будаўнічых прац. Не пазней за студзень 1941 г. [23, 24]

Пасляваенны стан і капітальны рамонт 1947–1948 гг.

Характар і маштабы пашкоджанняў будынка абсерваторыі ў часы Другой сусветнай вайны дакладна не зафіксаваны. Аднак фотаздымкі дазваляюць уявіць агульны стан аб'екта і вызначыць характар праведзеных у гэты перыяд рамонтных работ [25].

Пасля заканчэння вайны на аб'екце быў распачаты капітальны рамонт, які ў асноўным закрануў памяшканні першага і цокальнага паверхаў. Згодна з фотаздымкамі ад кастрычніка 1947 года, у гэты час былі дэмантаваныя вокны першага і цокальнага паверхаў з разбурэннем вонкавых чвэртак праёмаў. Рамонтныя работы працягваліся да восені 1948 года. Падчас рамонту дзейнасць установы ўнутры будынка не спынялася, а значная частка работ, выконвалася самімі супрацоўнікамі. З подпісаў пад фотаздымкамі вынікае, што пасля рамонту «аддзелы размешчаны ў даволі зручных для працы пакоях, а супрацоўнікі атрымалі дадатковую жылую плошчу»[7].

Пасля рамонту будынак захоўваў свае асноўныя архітэктурныя рысы, але былі лакальныя змены, пераважна ўтылітарнага характару: часткова закладзены вокны ўваходнага вестыбюля і гаспадарчых рызалітаў, дэмантавана левая ашклёная частка балкона трэцяга паверха.

Фотаздымкі таксама дазваляюць зрабіць высновы пра колеравае афармленне фасадаў: агульны аб'ём будынка меў больш цёмнае адценне, у той час як рызаліты лесвічных клетак былі вылучаныя светлым колерам. Драўляныя і металічныя элементы былі афарбаваныя ў цёмны колер.

Захаванне такіх элементаў, як драўляны павільён на кроўлі, вітражы лесвічных клетак і часткова ашкленне балконаў, сведчыць пра адсутнасць сур'ёзных разбурэнняў падчас ваенных дзеянняў (малюнак 10).



Малюнак 10 – Агульны выгляд будынка пасля капітальнага рамонту. 1948 г. [25]

Перабудовы і адаптацыі будынка цягам другой паловы XX ст.

У наступныя дзесяцігоддзі будынак абсерваторыі працягваў эксплуатавацца па сваім першапачатковым прызначэнні з прыстасаваннем пад новыя функцыянальныя і тэхналагічныя патрэбы. Змяненні праводзіліся пераважна гаспадарчым спосабам без распрацоўкі комплексных праектных рашэнняў.

У 1955–1960-х гадах адбыліся істотныя змены выгляду будынка Беларускага гідраметэаралагічнага цэнтра [13]. У прыватнасці, на абедзвюх вежах адсутнічала частка слупкоў агароджы, закладзеная частка ваконных праёмаў, страчанае ашкленне балконаў, замураваныя выхады на балконы, дэмантаваны дахавы павільён. Замест плоскай эксплуатуемай кроўлі над асноўным аб'ёмам быў уладкаваны вальмавы дах, а да галоўнага ўвахода прыбудаваны драўляны тамбур (малюнак 11).

[7] Неабходнасць забеспячэння непрырыўнасці назіранняў, размяшчэнне будынка за межамі горада, ваенныя разбурэнні і адсутнасць прадугледжаных праектам жылых дамоў прымушалі супрацоўнікаў пражываць у самой абсерваторыі.



Малюнак 11 – Выгляд будынка з поўдня. Каля 1955-1960 гг. [13]

Наступныя істотныя змены ў архітэктурным абліччы будынка звязаныя з усталёўкай на эксплуатуемай кроўлі лесвічных рызалітаў сфер для радыётэхнічнага абсталявання. Першая сфера на маналітным аснаванні была ўсталяваная на правай вежы падчас будаўніцтва новага адміністрацыйнага будынка Белгідрамета ў 1970 годзе. Другая сфера з'явілася у наступныя гады.

У 1988 г. будынак абсерваторыі быў уключаны ў Збор помнікаў гісторыі і культуры Беларусі як помнік архітэктуры канструктывізму[8] [8].

У выніку шасці дзесяцігоддзяў эксплуатацыі будынак моцна дэградаваў у архітэктурным і фізічным плане: страціў цэласнасць архітэктурнай задумы і прыйшоў у перадаварыйны стан.

Рэстаўрацыя і аднаўленне будынка ў 1997–2025 гг.

Сучасны этап існавання будынка характарызуецца пераходам ад утылітарнай эксплуатацыі да навукова абгрунтаванага аднаўлення яго першапачатковага аблічча. Першы комплексны праект рэканструкцыі (1997–2007 гг.) меў на мэце не толькі ўмацаванне нясучых канструкцый, якія былі ў аварыйным стане, але і аднаўленне страчаных архітэктурных формаў 1930-х гадоў. У ходзе гэтых работ былі адноўленыя ключавыя элементы аб'ёмнай кампазіцыі, што вярнула будынку яго авангардны характар (малюнак 12).



Малюнак 12 – Агульны выгляд будынка пасля рэстаўрацыйных работ 2008 г. (фота аўтара)

[8] Залічэнне будынка да канструктывізму ў энцыклапедычных даведніках і пазнейшых публікацыях абумоўлена, хутчэй за ўсё, устойлівым выкарыстаннем гэтага азначэння ў беларускай гістарыяграфіі як агульнай назвы для ўсёй савецкай авангарднай спадчыны 1920–1930-х гг., а таксама тым, што пры класіфікацыі аб'екта спецыялісты арыентуюцца на яго зменены аблічча, а не на першапачатковую праектную задуму.

Фінальны этап аднаўлення (2020–2025 гг.) дазволіў забяспечыць эксплуатацыйную прыдатнасць будынка. Падчас работ з былі больш грунтоўна вызначаныя адметныя вартасці помніка, якія ўтвараюць яго каштоўнасць як гістарычнага і архітэктурнага аб'екта. Гэта дало магчымасць крытычна ацаніць наяўны стан аб'екта, выправіць недакладнасці папярэдняга этапа рэстаўрацыі і завяршыць аднаўленне кампазіцыйных і стылістычных рашэнняў аўтарскага праекта, разам з нерэалізаванай колеравай схемай фасадаў (малюнак 13).



Малюнак 13 – Агульны выгляд будынка пасля рэстаўрацыйных работ 2025 г. (фота аўтара)

Заключэнне

На падставе вывучэння будаўнічай гісторыі Беларускай геафізічнай абсерваторыі (1929–2025 гг.) можна зрабіць наступныя высновы.

1. Праект абсерваторыі І. І. Валодзькі 1929 года можна аднесці да архітэктуры рацыяналізму як плыні савецкага авангарду. Залічэнне будынка да канструктывізму абумоўлена выкарыстаннем у беларускай гістарыяграфіі гэтага азначэння як агульнай назвы для ўсёй авангарднай спадчыны 1920–1930-х гг. У адрозненне ад канструктывізму, кампазіцыйныя рашэнні праекта вызначаліся не толькі тэхналагічнымі патрабаваннямі, але і мэтамі мастацкай выразнасці аб'екта.

2. Асноўныя кампазіцыйныя прынцыпы аўтарскага праекта 1929 г. былі захаваныя І. І. Валодзькам пры ўсіх наступных карэкціроўках, нягледзячы на аб'ёмна-планіровачныя адаптацыі.

3. Эканамічныя, тэхналагічныя і ідэалагічныя абмежаванні 1930-х гадоў паўплывалі на выніковае аблічча будынка: шэраг прынцыповых архітэктурна-мастацкіх рашэнняў, закладзеных І. І. Валодзькам у праект, не быў рэалізаваны ў ходзе будаўніцтва.

4. Постканструктывісцкі праект аздаблення фасадаў 1935 г. не быў рэалізаваны праз зацягнутыя тэрміны будаўніцтва і дэфіцыт сродкаў, што міжвольна забяспечыла захаванне першапачатковых авангардных рашэнняў у пластыцы аб'ёмаў. Адзіным істотным адступленнем стала адмова ад арыгінальнага кантраснага колеравага рашэння, якое на той момант відавочна супярэчыла новым эстэтычным устаноўкам сацыялістычнага рэалізму.

5. Падчас наступных перабудоў, якія насілі ўтылітарны характар, будынак не атрымаў новага закончанага архітэктурнага аблічча, толькі паступова страчваў свае архітэктурныя адметнасці.

6. У выніку паэтапных рэстаўрацыйных работ у 1997–2007 і 2020–2025 гг. будынак аднавіў адметнасці аўтарскага праекта пачатку 1930-х гг.

7. Сучаснае разуменне архітэктуры савецкага авангарду часта абмежавана стэрэатыпнымі інтэрпрэтацыямі, калі розныя архітэктурныя школы абагульняюцца пад назвай канструктывізм, якая належыць толькі адной з іх.

Сістэматызацыя этапаў будаўнічай гісторыі і разуменне кантэксту яго паўстання Геафізічнай абсерваторыі дазваляе

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-43-49

аб'ектыўна ацаніць эвалюцыю помніка і лепей зразумець яго адметныя вартасці. Выяўленне новых праектных матэрыялаў 1929–1930 гг. застаецца актуальным для ўдакладнення тэхнічных рашэнняў і чыннікаў трансфармацыі першапачатковага праекта І. І. Валодзькі. Далейшае пашырэнне крыніцазнаўчай базы будзе спрыяць больш глыбокаму асэнсаванню метадалогіі рацыяналізму і яго ролі ў фарміраванні архітэктурнага аблічча Мінска ў міжваенны перыяд.

Спіс цытаваных крыніц

1. Strengthening Hydromet and Early Warning Services in Belarus: A Road Map / World Bank. – Washington, DC : World Bank, 2021. – URL: https://documents1.worldbank.org/curated/en/839291594879784721/pdf/Strengthening-Hydromet-and-Early-Warning-Services-in-Belarus-A-Road-Map.pdf (дата звароту: 23.12.2025).
2. Кукуня, О. Г. Здание обсерватории в Мінске – памятник архитектуры и науки / О. Г. Кукуня // Каштоўнасці мінуўшчыны: матэрыялы канф., Мінск, 12 лістап. 1997 г. / пад рэд. С. В. Марцэлева. – Мн. : Лекцыя, 1998. – Вып. 1 : Праблемы захавання архітэктурнай спадчыны савецкага перыяду. – С. 44–48.
3. Кайгародаў, А. І. Праблема стратасферы і задача Беларускай геафізічнай абсерваторыі / А. І. Кайгародаў // Звязда. – 1934. – № 89.
4. Беларускі дзяржаўны архіў навукова-тэхнічнай дакументацыі (БДАНТД). – Ф. 105. – Воп. 1. – Спр. 2.
5. Беларускі дзяржаўны архіў навукова-тэхнічнай дакументацыі (БДАНТД). – Ф. 105. – Воп. 1. – Адз. зах. 25.
6. Да пабудовы Геафізічнай абсэрваторыі // Савецкая Беларусь. – 1929. – 9 кастр. – № 231.
7. Арганізуецца беларуская геафізычная абсэрваторыя // Зьвязда. – 1930. – 20 студз. – № 17.
8. Збор помнікаў гісторыі і культуры Беларусі. Мінск / рэдкал.: Г. В. Штыхаў (гал. рэд.) [і інш.]. – Мінск : Беларуская Савецкая Энцыклапедыя імя Петруся Броўкі, 1988. – С. 118–119.
9. Архітэктура Беларусі : энцыклапедычны даведнік / рэдкал.: А. А. Войнаў [і інш.]. – Мінск : БелЭн, 1993. – С. 317.
10. Лысенко, А. В. У истоков белорусской советской архитектуры. К 85-летию со дня рождения И. И. Володько / А. В. Лысенко // Строительство и архитектура Белоруссии. – 1980. – № 1. – С. 26–27.
11. Кастелянский, А. Изобразительное искусство БССР / А. Костелянский. – М.-Л. : ОГИЗ;ИЗОГИЗ, 1932. – С. 24.
12. [Фота] // Тэхніка ў масы. – 1932–1933. – № 3–4 (май–чэрвень). – С. 58.
13. Унутраны архіў УП «Белгідрамет». – [Справаводства і тэхнічная дакументацыя, фотаздымкі, фотакопіі праекта 1935 года].
14. Кайгарадаў, А. І. Белкомунбудтрэст зрывае будаўніцтва абсерваторыі / А. І. Кайгарадаў // Звязда. – 1935. – № 81.
15. Боянков, П. То, что имеем, досталось дорогой ценой / П. Боянков // Минский курьер. – 2005. – № 617. – 12 мая.
16. Кладбище бывших деревень Большая и Малая Слепянка. – URL: https://web.archive.org/web/20160304091318/http://www.minsk-old-new.com/minsk-2725.htm (дата звароту: 23.12.2025).
17. У СНК БССР аб ходзе будаўніцтва геафізічнай абсерваторыі // Звязда. – 1934. – № 260.
18. Даследчыкі атмасферы // Звязда. – 1935. – № 78.
19. Новы будынак беларускай геафізічнай абсерваторыі // Звязда. – 1935. – 27 лістап. – № 269.
20. Новы будынак беларускай геафізічнай абсерваторыі ў Менску : [фота] // Звязда. – 1935. – 4 снеж. – № 275.
21. Унутраны архіў УП «Белгідрамет». – Фотоальбом «Белорусская Геофизическая Обсерватория на 1ое октября 1935 г.».
22. Дворец Советов СССР. Всесоюзный конкурс 1932 г. : сборник постановлений Совета строительства Дворца Советов при Президиуме ЦИК СССР / Союз советских архитекторов ; под ред. П. И. Антипова ; отв. ред. Ю.М. Славинский. – М. : Всекохудожник, 1983. – С. 55–56.
23. Здание Минской геофизической обсерватории : [фота] (Фотохроника БЕЛТА) // Советская Белоруссия. – 1941. – 11 янв. – № 9 (3781).
24. Государственный научно-исследовательский музей архитектуры имени А. В. Щусева (ГНИМА). – НФ-ОФ-1170/25.
25. Унутраны архіў УП «Белгідрамет». – Фото-альбом минской геофизической обсерватории 1948–195… гг.
26. Хан-Магомедов, С. О. Архитектура советского авангарда : в 2 кн. / С. О. Хан-Магомедов. – М. : Стройиздат, 1996. – Кн. 1 : Проблемы формообразования. Мастера и течения.

References

1. Strengthening Hydromet and Early Warning Services in Belarus: A Road Map / World Bank. – Washington, DC : World Bank, 2021. – URL: https://documents1.worldbank.org/curated/en/839291594879784721/pdf/Strengthening-Hydromet-and-Early-Warning-Services-in-Belarus-A-Road-Map.pdf (data zvarotu: 23.12.2025).
2. Kukunya, O. G. Zdanie observatorii v Minske – pamyatnik arhitektury i nauki / O. G. Kukunya // Kashtoŭnasci minuŭshchyny: materyyaly kanf., Minsk, 12 listap. 1997 g. / pad red. S. V. Marceleva. – Mn. : Lekcyya, 1998. – Vyp. 1 : Prablemy zahavannya arhitekturnaj spadchyny saveckaga peryyadu. – S. 44–48.
3. Kajgarodaŭ, A. I. Prablema stratasfery i zadacha Belaruskaj geafizichnaj abservatoryi / A. I. Kajgarodaŭ // Zvyazda. – 1934. – № 89.
4. Belaruski dzyarzhaŭny arhiŭ navukova-tekhnichnaj dakumentacyi (BDANTD). – F. 105. – Vop. 1. – Spr. 2.
5. Belaruski dzyarzhaŭny arhiŭ navukova-tekhnichnaj dakumentacyi (BDANTD). – F. 105. – Vop. 1. – Adz. zah. 25.
6. Da pabudovy Geafizichnaj abservatoryi // Saveckaya Belarus'. – 1929. – 9 kastr. – № 231.
7. Arganizuecca belaruskaya geafizychnaya abservatoryya // Z'vyazda. – 1930. – 20 studz. – № 17.
8. Zbor pomnikaŭ gistoryi i kul'tury Belarusi. Minsk / redkal.: G. V. SHtyhaŭ (gal. red.) [i insh.]. – Minsk : Belaruskaya Saveckaya Encyklapedyya imya Petrusya Broŭki, 1988. – S. 118–119.
9. Arhitektura Belarusi : encyklapedychny davednik / redkal.: A. A. Vojnaŭ [i insh.]. – Minsk : BelEn, 1993. – S. 317.
10. Lysenko, A. V. U istokov belorusskoj sovetskoj arhitektury. K 85-letiyu so dnya rozhdeniya I. I. Volod'ko / A. V. Lysenko // Stroitel'stvo i arhitektura Belorussii. – 1980. – № 1. – S. 26–27.
11. Kastelyanskij, A. Izobrazitel'noe iskusstvo BSSR / A. Kostelyanskij. – M.-L. : OGIZ;IZOGIZ, 1932. – S. 24.
12. [Fota] // Tekhnika ŭ masy. – 1932–1933. – № 3–4 (maj–cherven'). – S. 58.
13. Unutrany arhiŭ UP «Belgidramet». – [Spravavodstva i tekhnichnaya dakumentacyya, fotazdymki, fotakopii praekta 1935 goda].
14. Kajgaradaŭ, A. I. Belkomunbudtrest zryvae budaŭnictva abservatoryi / A. I. Kajgaradaŭ // Zvyazda. – 1935. – № 81.
15. Boyankov, P. To, chto imeem, dostalos' dorogoj cenoj / P. Boyankov // Minskij kur'er. – 2005. – № 617. – 12 maya.
16. Kladbishche byvshih dereven' Bol'shaya i Malaya Slepyanka. – URL: https://web.archive.org/web/20160304091318/http://www.minsk-old-new.com/minsk-2725.htm (data zvarotu: 23.12.2025).
17. U SNK BSSR ab hodze budaŭnictva geafizichnaj abservatoryi // Zvyazda. – 1934. – № 260.
18. Dasledchyki atmasfery // Zvyazda. – 1935. – № 78.
19. Novy budynak belaruskaj geafizichnaj abservatoryi // Zvyazda. – 1935. – 27 listap. – № 269.
20. Novy budynak belaruskaj geafizichnaj abservatoryi ŭ Mensku : [fota] // Zvyazda. – 1935. – 4 snezh. – № 275.
21. Unutrany arhiŭ UP «Belgidramet». – Fotoal'bom «Belorusskaya Geofizicheskaya Observatoriya na 1oe oktyabrya 1935 g.».
22. Dvorec Sovetov SSSR. Vsesoyuznyj konkurs 1932 g. : sbornik postanovlenij Soveta stroitel'stva Dvorca Sovetov pri Prezidiume CIK SSSR / Soyuz sovetskih arhitektorov ; pod red. P. I. Antipova ; otv. red. YU.M. Slavinskij. – M. : Vsekohudozhnik, 1983. – S. 55–56.
23. Zdanie Minskoj geofizicheskoj observatorii : [fota] (Fotohronika BELTA) // Sovetskaya Belorussiya. – 1941. – 11 yanv. – № 9 (3781).
24. Gosudarstvennyj nauchno-issledovatel'skij muzej arhitektury imeni A. V. SHCHuseva (GNIMA). – NF-OF-1170/25.
25. Unutrany arhiŭ UP «Belgidramet». – Foto-al'bom minskoj geofizicheskoj observatorii 1948–195… gg.
26. Han-Magomedov, S. O. Arhitektura sovetskogo avangarda : v 2 kn. / S. O. Han-Magomedov. – M. : Strojizdat, 1996. – Kn. 1 : Problemy formoobrazovaniya. Mastera i techeniya.

Материал поступил 31.01.2026, одобрен 12.02.2026, принят к публикации 12.02.2026

УДК 004.942:624.011.1

МЕТОДОЛОГИЯ ИНТЕГРАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ДЕРЕВЯННЫХ МЕМОРИАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Ш. М. Исаев[1], П. Д. Шиндина[2], А. Д. Занина[3]

[1] Магистрант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: isaev.list@list.ru
[2] Бакалавр, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: polinafroggy@gmail.com
[3] Старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: pavlenko_ad@spbstu.ru

Реферат

Современный этап развития строительной отрасли характеризуется активным внедрением цифровых технологий, создающих предпосылки для трансформации традиционных проектных процессов. Настоящее исследование посвящено разработке интегрированной методологии проектирования малых архитектурных форм мемориального назначения из древесины, основанной на последовательном применении генеративных нейросетевых моделей, параметрического информационного моделирования и алгоритмов автоматизированной визуализации.

Экспериментальная апробация выполнена на проектировании мемориального комплекса, включающего арочно-каркасную беседку диаметром 9,5 м и пятилучевую ферменную конструкцию. Применение диффузионных моделей Stable Diffusion и Midjourney позволило генерировать 40 концептуальных вариантов за 3,5 часа, что в 17–23 раза быстрее традиционного эскизирования. Систематический анализ выявил оптимальный объем текстового промпта в диапазоне 150–200 слов, обеспечивающий соответствие замыслу на уровне 8,9 балла по десятибалльной шкале при приросте качества на 43,5 % относительно кратких описаний.

Параметрическое моделирование выполнено в среде Graphisoft ArchiCAD с разработкой специализированных GDL-объектов и интеграцией расчетных модулей через Python API. Информационная модель уровня детализации LOD 350 включает 247 элементов арочной системы и 184 элемента ферменной конструкции. Автоматизированная проверка несущей способности реализована за 38 секунд с определением коэффициентов использования прочности 0,33 для первой конструкции и 0,27 для второй при расчетной нагрузке 0,3 кН/м.

Нейросетевая визуализация с применением диффузионных моделей и модуля ControlNet сократила временные затраты в 3,6–4,6 раза при сохранении качества на уровне 8,4 балла против 8,7 балла для традиционного рендеринга. Установлены оптимальные параметры генерации: denoising strength в диапазоне 0,60–0,70 и guidance scale в диапазоне 9–11 единиц.

Разработанная методология обеспечивает сокращение общих трудозатрат на 80–85 % с экономическим эффектом 6,66–13,28 млн рублей годовых для организации с проектным портфелем 15–20 объектов. Срок окупаемости инвестиций составляет 0,8–1,6 месяца. Результаты подтверждают целесообразность интеграции технологий искусственного интеллекта и информационного моделирования для создания эффективного адаптивного проектного процесса.

Ключевые слова: информационное моделирование зданий, генеративный дизайн, диффузионные модели, параметрическое проектирование, деревянные конструкции, цифровые технологии проектирования, ArchiCAD, Stable Diffusion, нейросетевая визуализация, малые архитектурные формы.

METHODOLOGY FOR INTEGRATING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND INFORMATION MODELING TECHNOLOGIES IN DESIGNING WOODEN MEMORIAL COMPLEXES

Sh. M. Isaev, P. D. Shindina, A. D. Zanina

Abstract

The current stage of construction industry development is characterized by active implementation of digital technologies that create prerequisites for transformation of traditional design processes. This study is devoted to the development of an integrated methodology for designing small architectural memorial forms made of wood, based on sequential application of generative neural network models, parametric information modeling, and automated visualization algorithms.

Experimental validation was performed on the design of a memorial complex including an arched-frame gazebo with a diameter of 9,5 m and a five-beam truss structure. Application of Stable Diffusion and Midjourney diffusion models enabled generation of 40 conceptual variants in 3,5 hours, which is 17–23 times faster than traditional sketching. Systematic analysis revealed optimal text prompt volume in the range of 150–200 words, ensuring concept compliance at the level of 8,9 out of 10 with quality improvement of 43,5 % compared to brief descriptions.

Information model of LOD 350 detail level includes 247 elements of the arched system and 184 elements of the truss structure.

Neural network visualization using diffusion models and ControlNet module reduced time costs by 3,6–4,6 times while maintaining quality at 8,4 versus 8,7 for traditional rendering. Optimal generation parameters were established: denoising strength in range of 0,60–0,70 and guidance scale in range of 9–11 units.

Developed methodology provides reduction of total labor costs by 80–85 % with economic effect of 6,66–13,28 million rubles annually for an organization with project portfolio of 15–20 objects. Payback period of investments is 0,8–1,6 months. Results confirm feasibility of integrating artificial intelligence technologies and information modeling for creating efficient adaptive design process.

Keywords: building information modeling, generative design, diffusion models, parametric design, wooden structures, digital design technologies, ArchiCAD, Stable Diffusion, neural network visualization, small architectural forms.

Введение

Цифровая трансформация проектно-строительной деятельности определяется масштабным внедрением технологий информационного моделирования, обеспечивающих создание виртуальных прототипов с полным набором геометрических, физических и функциональных параметров [1]. Параллельное развитие алгоритмов машинного обучения, особенно генеративных архитектур, формирует качественно новые возможности автоматизации творческих процессов на этапах концептуализации и презентации проектных решений [2].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-50-58

Малые архитектурные формы мемориального назначения представляют специфический класс объектов, требующих гармоничного сочетания символической выразительности архитектурного образа, конструктивной надежности, технологичности изготовления и органичной интеграции в природное окружение [3]. Применение древесины обусловлено экологичностью материала, возобновляемостью ресурсной базы, выразительностью естественной текстуры и традиционностью использования в мемориальной архитектуре [4].

Традиционный проектный процесс включает последовательные этапы ручного эскизирования концепций, детального проектирования в CAD-системах, расчётного обоснования конструкций и создания визуализаций методами трассировки лучей. Концепция Индустрии 4.0 формирует новые требования к информационной связности этих этапов [5]. Каждый этап характеризуется значительными временными затратами при ограниченной вариативности рассматриваемых решений, что снижает вероятность выбора оптимального проектного варианта [6]. Интеграция технологий генеративного искусственного интеллекта и информационного моделирования создает предпосылки для качественного изменения проектного процесса посредством автоматизации рутинных операций и расширения пространства проектных альтернатив [7], включая смежные области цифрового проектирования [20].

Анализ современных публикаций выявляет отсутствие комплексных исследований, объединяющих генерацию концептуальных решений средствами искусственного интеллекта, детальное параметрическое BIM-моделирование с интегрированной проверкой конструктивных параметров и автоматизированную нейросетевую визуализацию в единый технологический цикл проектирования малых архитектурных форм [8]. Существующие работы рассматривают отдельные аспекты применения цифровых технологий без формирования целостной методологии сквозного проектного процесса [9], что подтверждают систематические обзоры интеграции BIM и ИИ [21].

Целью настоящего исследования является разработка и экспериментальная апробация методологии интегрированного проектирования малых архитектурных форм из древесины на основе синтеза технологий генеративного искусственного интеллекта, параметрического информационного моделирования и нейросетевой визуализации с количественной оценкой эффективности предложенного подхода по критериям временных затрат, качества проектных решений и экономической целесообразности внедрения.

Анализ современного состояния проблемы

Применение генеративных нейросетевых моделей в архитектурном проектировании исследовано в работах отечественных и зарубежных авторов. Фундаментальные исследования диффузионных моделей типа Stable Diffusion, способных генерировать архитектурные изображения на основе текстовых описаний, представлены Rombach и соавторами [8]. Установлено, что латентные диффузионные модели обеспечивают создание изображений разрешением до 1024 × 1024 пикселей с высокой степенью детализации архитектурных элементов при времени генерации 5–15 секунд на современных графических ускорителях.

Regenwetter и соавторы [23] в систематическом обзоре генеративных нейросетевых моделей в инженерном проектировании показали, что диффузионные архитектуры устойчиво превосходят генеративно-состязательные сети по метрикам разнообразия и реалистичности результатов. Это подтверждает выбор Stable Diffusion XL и Midjourney в качестве основных инструментов концептуализации.

Chen и соавторы [12] в систематическом обзоре выявили 34 сценария интеграции BIM с алгоритмами искусственного интеллекта в строительной отрасли. Авторы констатируют, что наибольший эффект достигается при совместном применении генеративных моделей на концептуальном этапе и параметрических BIM-инструментов на этапе детального проектирования.

Методология информационного моделирования деревянных конструкций рассмотрена в работах, посвященных параметризации свойств древесины и автоматизации проектных процессов. Amanzadegan и соавторы [10] выявили, что интеграция BIM с системами ИИ обеспечивает принципиально новые возможности автоматизации строительного проектирования. Khan и соавторы [11] в систематическом обзоре 73 источников определили машинное обучение, компьютерное зрение и NLP как наиболее перспективные направления применения ИИ в BIM-среде. Jiang и соавторы [13] в библиометрическом анализе 521 публикации констатируют, что задачи планирования, управления ресурсами и контроля качества демонстрируют наибольший прирост применения методов машинного обучения в строительной отрасли. Установлено, что основными препятствиями широкого внедрения технологий в проектировании деревянных объектов являются отсутствие стандартизированных библиотек параметрических элементов и недостаточная интеграция с расчетными программными комплексами.

Al-Saeed и соавторы [14] в обзоре инноваций в строительстве систематизируют принципы интеграции BIM с методами бережливого производства, констатируя значительный синергетический эффект совместного применения этих подходов для сокращения непроизводительных затрат.

Al-Saeed и соавторы [15] выявили, что добавление временно́го измерения в информационную модель (4D BIM) сокращает отставание от календарного плана на 12–18 % при строительстве объектов повышенной конструктивной сложности — к числу которых относятся криволинейные деревянные конструкции.

Karim и соавторы [16] в обзоре применения генеративного ИИ в архитектурном проектировании констатируют, что диффузионные модели сокращают время концептуализации на 60–80 % по сравнению с традиционным ручным эскизированием, обеспечивая при этом сопоставимое или превосходящее качество архитектурных образов по экспертным оценкам.

Анализ литературных источников выявляет следующие нерешенные проблемы: отсутствие комплексной методологии интеграции генеративного искусственного интеллекта, информационного моделирования и нейросетевой визуализации в единый проектный процесс; недостаточная проработка вопросов параметризации деревянных конструкций малых архитектурных форм; отсутствие количественных сравнительных исследований эффективности интегрированного подхода по сравнению с традиционными методами проектирования.

Материалы и методы исследования

Экспериментальное исследование выполнено на примере проектирования мемориального комплекса, размещаемого на территории парка Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета и посвящённого памяти участников Великой Отечественной войны и событий блокады Ленинграда. В состав комплекса входят две основные конструкции из древесины, различающиеся по конструктивной схеме и функциональному назначению.

Первая конструкция представляет собой арочно-каркасную беседку круглого плана с центральным элементом в виде символического дерева. От него радиально расходятся 12 криволинейных арковетвей, формирующих замкнутое пространство диаметром 9,5 м и высотой 4,15 м, предназначенное для размещения круговых скамеек. Функциональная концепция объекта предполагает возможность закрепления посетителями мемориальных лент с именами родственников — участников войны, что обеспечивает формирование динамически развивающегося мемориального пространства [17].

Вторая конструкция представляет собой пятилучевую ферменную систему (рисунок 6), в которой параметрическая BIM-модель отражает иерархию несущих элементов и принципы пространственной организации. Каждый луч длиной от 7,25 до 8,10 м формирует самостоятельное экспозиционное пространство, посвящённое отдельным аспектам истории войны, блокады Ленинграда, а также деятельности Лесотехнической академии в военные годы. Центральным композиционным элементом является круговая площадь диаметром 6 м с размещением символического вечного огня [17].

Разработанная методология проектирования реализована в виде последовательности трёх взаимосвязанных этапов с передачей данных между программными средами посредством стандартизированных форматов обмена.

На первом этапе применялись генеративные модели Stable Diffusion XL-1.0 (Stability AI) и Midjourney 6.0 для формирования концептуальных архитектурных решений [8]. Входные данные представлялись в виде структурированных текстовых описаний объёмом 150–200 слов на английском языке, сформированных с учётом особенностей работы диффузионных моделей. Структура описания включала тип объекта, материал, архитектурный стиль, функциональное назначение, ключевые геометрические параметры, символическое

содержание, контекст размещения и параметры визуализации. Для каждого варианта выполнялось 20–25 итераций генерации с направленным варьированием параметров модели.

На втором этапе на основе отобранных концепций выполнялось параметрическое моделирование в среде Graphisoft ArchiCAD 27 с формированием информационной модели уровня детализации LOD 350 в соответствии с классификацией American Institute of Architects [18]. Указанный уровень предполагает включение точной геометрии элементов, информации о материалах с физико-механическими характеристиками, а также описание узловых соединений и технологии монтажа.

Для автоматизации проектирования типовых элементов разработаны параметрические объекты на языке Geometric Description Language (GDL), обеспечивающие генерацию геометрии при изменении ключевых параметров, расчёт объёмов материалов, формирование спецификаций и контроль конструктивных ограничений. Интеграция расчётных процедур реализована с использованием Python API, что позволило автоматизировать проверку несущей способности деревянных элементов в соответствии с нормативными требованиями. Расчётный алгоритм включает определение изгибающих моментов, нормальных и касательных напряжений, а также оценку прочности, жёсткости и коэффициентов использования несущей способности.

На третьем этапе формировались визуализационные материалы с использованием диффузионных моделей [19]. Процесс включал экспорт геометрии из ArchiCAD в формат FBX с сохранением иерархии элементов, предобработку в среде Blender 4.0, применение модели Stable Diffusion XL с модулем ControlNet для сохранения геометрической структуры, а также последующую постобработку изображений.

Для валидации результатов проведено сравнительное исследование трёх подходов к визуализации: традиционного рендеринга (V-Ray 6.0, Corona Renderer 10) и нейросетевой генерации (Stable Diffusion XL с ControlNet). Для каждого метода сформировано по 8 изображений в различных условиях освещения и с различных ракурсов. Оценка качества выполнена экспертной группой из 15 специалистов по десятибалльной шкале.

Интегральный показатель качества определялся как средневзвешенное значение по следующим критериям: реалистичность текстур (0,30), естественность светотеневого моделирования (0,25), геометрическая точность (0,25), композиционная целостность и гармоничность окружения (0,20).

Применение генеративных диффузионных моделей позволило сформировать 40 альтернативных концептуальных решений за 3 часа 28 минут совокупного времени. При этом генерация 22 вариантов арочной конструкции заняла 112 минут (в среднем 5,1 минуты на вариант), а 18 вариантов ферменной системы – 96 минут (5,3 минуты на вариант). Сопоставление с традиционной практикой проектирования показывает, что разработка одного концептуального решения требует 24–32 часов, что позволяет говорить об увеличении производительности в 17–23 раза.

Сравнительный анализ методов концептуализации по показателям временных затрат, вариативности и экспертной оценки качества представлен в таблице 1, что позволяет количественно оценить преимущества применения генеративных моделей в архитектурном проектировании.

Таблица 1 – Сравнение эффективности методов концептуализации

Метод проектирования	Количество вариантов	Время создания, час	Время на 1 вариант, час	Экспертная оценка, баллы
Ручное эскизирование карандашом	3-5	72–120	24–32	8,9
Цифровое эскизирование (планшет)	5-8	48–80	9,6–13,3	8,6
Генеративный ИИ (Stable Diffusion)	40	3,47	0,087	8,1
Генеративный ИИ (Midjourney)	40	3,47	0,087	8,4

На основании данных, представленных в таблице 1, можно констатировать, что применение генеративного искусственного интеллекта (ИИ) позволяет существенно сократить временные затраты на процесс поиска архитектурной формы, в частности, с 48–120 часов до 3,47 часов. При этом наблюдается лишь незначительное снижение экспертной оценки качества генерируемых изображений, что варьируется в диапазоне от 8,1 до 8,4 баллов по сравнению с 8,6–8,9 баллами, присуждаемыми традиционным методам. Это свидетельствует о том, что ИИ-инструменты являются оптимальным решением для итерационного концептуализационного процесса.

Детальный анализ влияния параметров промпта на качество генерируемых изображений выявил нелинейную зависимость между объемом текстового описания и соответствием конечного результата исходному замыслу, как это наглядно продемонстрировано на рисунке 1. График демонстрирует, что с увеличением объема промпта с 50 до 150 слов наблюдается значительный рост экспертной оценки соответствия с 6,2 до 8,9 баллов, что составляет прирост в 43,5 %. Дальнейшее увеличение объема промпта до 200 слов приводит к дополнительному приросту в 5,6 % до 9,4 баллов, тогда как дальнейшее увеличение до 250 слов дает прирост всего в 1,1 % до 9,5 баллов.

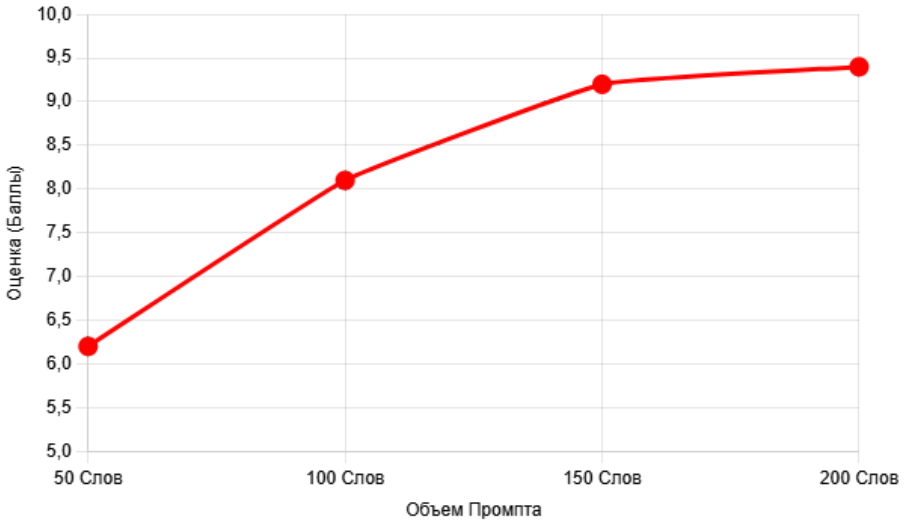


Рисунок 1 – Зависимость качества генерации от объема промпта

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-50-58

Данная закономерность согласуется с принципом убывающей отдачи, что позволяет сделать вывод о существовании оптимального объема промпта в диапазоне 150–200 слов, который обеспечивает баланс между качеством генерируемых изображений и трудозатратами на формулирование текстового описания.

Сравнительный анализ генеративных моделей выявил специфические преимущества каждой архитектуры в различных аспектах визуализации архитектурных решений. Модель Stable Diffusion XL демонстрирует превосходство в геометрической точности воспроизведения конструктивных элементов со средней экспертной оценкой 7,8 балла, что на 0,6 балла выше показателей Midjourney, составивших 7,2 балла, однако уступает последней в художественной выразительности композиционных решений с оценкой 7,6 балла против 8,9 балла, соответственно. Архитектура Midjourney обеспечивает более высокую художественную ценность генерируемых изображений, что проявляется в способности передавать атмосферные характеристики и создавать эмоциональное воздействие на зрителя, вместе с тем демонстрируя пониженную точность в детализации технических особенностей конструктивных элементов.

На основании выявленных характеристик оптимальным признан гибридный подход, предполагающий использование Stable Diffusion XL для генерации изображений технически сложных элементов, требующих высокой геометрической точности, и применение Midjourney для разработки общих композиционных решений, где приоритетное значение имеет художественная выразительность архитектурного образа. Экспертный отбор концептуальных вариантов, реализованный по методике многокритериальной оценки с применением взвешенных коэффициентов значимости, позволил выявить архитектурные решения с наивысшими интегральными показателями качества, результаты которого представлены в таблице 2. По совокупному интегральному показателю ИИ-генерация (8,94 балла) превосходит традиционный рендеринг (8,77 балла), прежде всего по критериям архитектурной выразительности (+0,2 балла) и инновационности формы (+0,4 балла).

Таблица 2 – Результаты экспертной оценки концептуальных вариантов

Критерий оценки	Вес	Традиционный рендеринг (лучший вариант)	ИИ-генерация (лучший вариант)
Архитектурная выразительность	0,25	9,2	9,4
Символическое соответствие	0,20	8,8	9,1
Конструктивная реализуемость	0,25	8,4	8,6
Интеграция в окружение	0,15	8,9	8,7
Инновационность формы	0,15	8,6	9,0
Интегральная оценка	1,00	8,77	8,94

Пример одного из концептуальных вариантов («Дерево памяти»), созданного с помощью Midjourney и получившего наивысшую интегральную оценку, представлен на рисунке 4. Отобранные концептуальные решения отличаются чёткостью геометрической формы, структурной выраженностью несущих элементов и гармоничной интеграцией в природное окружение парковой зоны, что подтверждается высокими экспертными оценками по всем критериям таблицы 2. Применение диффузионных моделей машинного обучения для создания фотореалистичных визуализаций обеспечило значительное сокращение временных затрат по сравнению с традиционными методами рендеринга на основе трассировки лучей, что наглядно свидетельствует об эффективности нейросетевых алгоритмов для ускорения подготовки презентационной документации. Количественные характеристики сравниваемых методов для создания одного изображения разрешением 4096 × 2304 пикселей представлены в таблице 3. Ключевой показатель – соотношение скорости и качества – позволяет обоснованно выбирать инструмент в зависимости от стадии проектирования.

Таблица 3 – Сравнение методов визуализации архитектурных объектов

Метод визуализации	Среднее время, мин:сек	Стд. отклонение, мин	Экспертная оценка качества, баллы	Стд. отклонение оценки
V-Ray-6.0 (CPU)	52:18	4,2	8,7	0,6
Corona Renderer-10 (CPU)	48:34	3,8	8,6	0,5
Stable Diffusion XL + ControlNet	13:47	1,6	8,4	0,7
Midjourney-6.0 (img2img)	11:22	1,2	8,2	0,8
Ускорение относительно V-Ray	3,8x	–	–3,4 %	–
Ускорение относительно Corona	4,2x	–	–2,3 %	–

Результаты показывают, что нейросетевые методы ускоряют процесс визуализации в 3,8–4,6 раза при статистически незначимом снижении экспертных оценок качества на 2,3–5,7 %. Статистический анализ оценок методом дисперсионного анализа (ANOVA) показал, что различия между методами статистически значимы ($F = 4,38$, $p = 0,021$), но практически приемлемы для презентационных целей проектной документации. Детальный анализ экспертных оценок в разрезе отдельных критериев качества позволил выявить специфические преимущества и ограничения каждого из исследуемых методов визуализации, результаты которого представлены на рисунке 2 в виде профильной диаграммы сравнительных оценок по четырем основным критериям перцептивного качества изображений.

Диаграмма наглядно демонстрирует, что результаты расходятся по критериям: по текстурам и геометрии выигрывает традиционный рендеринг, по освещению и гармоничности окружения – нейросетевой. По критерию реалистичности текстур древесины традиционные рендеры получили оценки 9,0–9,1 балла, нейросетевые методы – 8,3–8,5 балла (отставание 5,5–6,6 %). Это обусловлено тем, что традиционные рендеры используют физически точные модели рассеяния света в материалах (BSDF – Bidirectional Scattering Distribution Function), в то время как нейросетевые алгоритмы генерируют текстуры на основе статистических закономерностей обучающей выборки.

По критерию естественности освещения различия минимальны (9,0–9,2 балла), что свидетельствует об эффективности диффузионных моделей в моделировании рассеянного естественного света. Нейросетевые алгоритмы особенно успешны в создании реалистичной атмосферы облачного дня с мягкими тенями, которая сложна для традиционного рендеринга из-за необходимости трассировки множества отраженных лучей.

Наибольшее преимущество традиционных методов проявляется в геометрической точности (9,5–9,6 балла против 8,1–8,9 балла), где нейросетевые алгоритмы иногда искажают мелкие детали конструкций при высоких значениях параметра denoising strength. Однако применение модуля ControlNet в Stable Diffusion XL позволяет значительно улучшить сохранность геометрии (8,9 балла) по сравнению с базовым Midjourney (8,1 балла).

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-50-58

Неожиданным результатом стало превосходство нейросетевых методов по критерию композиции и гармоничности окружения (8,9–9,1 балла против 8,3–8,4 балла для традиционного рендеринга). Это обусловлено автоматической генерацией реалистичного природного окружения (деревья, трава, небо) нейросетевыми алгоритмами, в то время как для традиционных рендеров требуется ручное создание и настройка 3D-моделей растительности, что требует 4–6 часов дополнительной работы и нередко выполняется в упрощённом варианте.

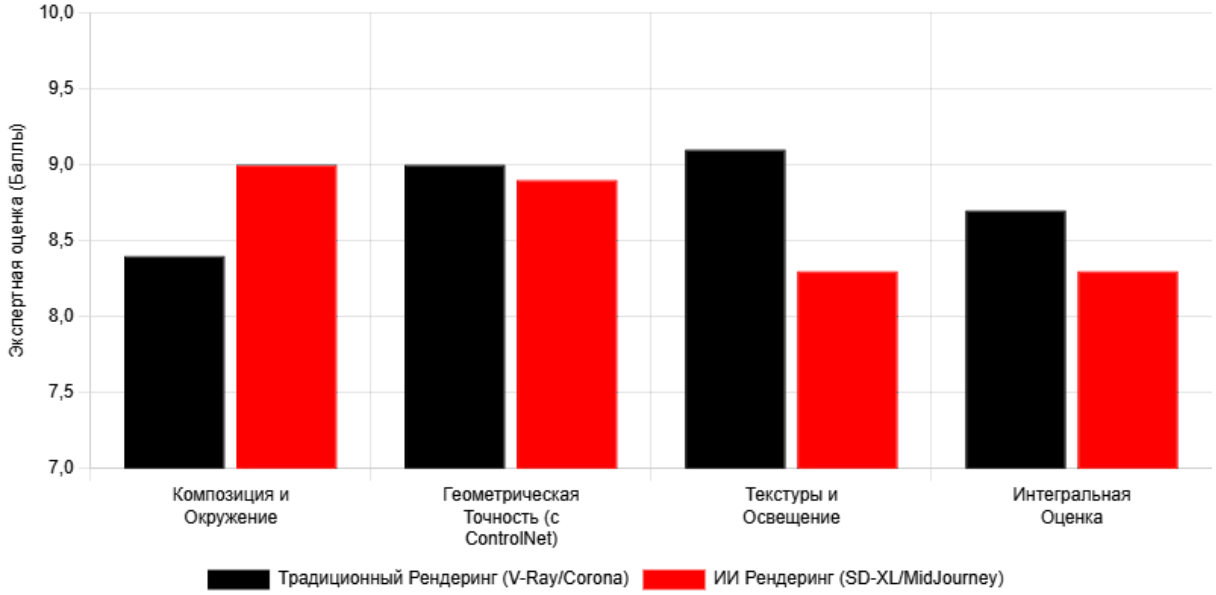


Рисунок 2 – Детализация экспертных оценок по критериям качества визуализации

Экспериментальное исследование влияния параметров нейросетевой генерации на качество результата выполнено для арочной конструкции с систематическим варьированием ключевых параметров. Результаты представлены на рисунке 3.

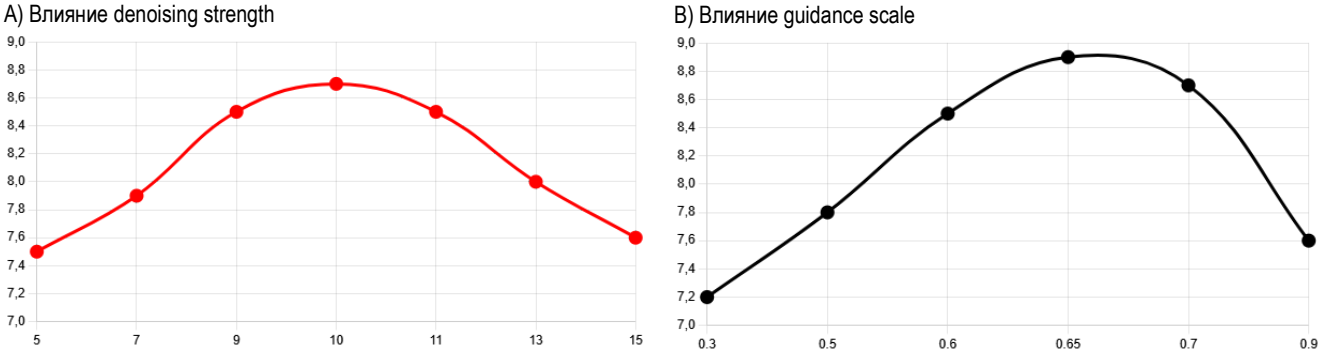


Рисунок 3 – Влияние параметров нейросетевой генерации на качество визуализации

Установлено, что оптимальный диапазон параметра denoising strength составляет 0,60–0,70: при меньших значениях изображение остается слишком близким к исходному базовому рендеру и теряет фотореалистичность (оценка 7,2 балла при denoising = 0,3), при больших значениях теряется геометрическая точность модели (оценка 7,6 балла при denoising = 0,9). Максимальное качество 8,9 балла достигается при denoising = 0,65.

Влияние параметра guidance scale имеет аналогичную колоколообразную зависимость с оптимумом в диапазоне 9–11. При guidance scale < 7 изображение становится размытым и теряет детализацию (оценка 7,4 балла), при guidance scale > 13 появляются визуальные артефакты и нереалистичные элементы (оценка 7,8 балла). Максимальное качество 8,8 балла достигается при guidance scale = 10.

Создано по 8 финальных визуализаций для каждой конструкции с различных точек обзора и в различных условиях освещения (утро, день, вечер, пасмурная погода). Общая статистика создания 16 изображений разрешением 4096 × 2304 пикселей представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Сводная статистика создания визуализаций

Метод визуализации	Время на 16 изображений	Общая трудоемкость с подготовкой сцены	Стоимость (электроэнергия + ПО)	Средняя оценка качества
V-Ray-6.0	13:42 (822 мин)	17:42 (1062 мин)	1580 руб.	8,7 балла
Corona Renderer-10	12:54 (774 мин)	16:54 (1014 мин)	1420 руб.	8,6 балла
Stable Diffusion XL	3:41 (221 мин)	5:41 (341 мин)	380 руб.	8,4 балла
Midjourney-6.0	3:02 (182 мин)	5:02 (302 мин)	420 руб.	8,2 балла
Экономия времени	3,5–3,7x	3,0–3,1x	71–76 %	–2,3–5,7 %

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-50-58

Результаты подтверждают высокую эффективность нейросетевых методов для создания презентационных материалов проектной документации. Экономия времени составляет 3,5–3,7 раза для чистого рендеринга и 3,0–3,1 раза с учетом подготовки сцены. Экономия стоимости (электроэнергия + лицензии ПО) достигает 71–76 %, что особенно важно для небольших проектных организаций. Финальная фотореалистичная визуализация мемориального комплекса, полученная нейросетевым методом при denoising strength = 0,65 и guidance scale = 10, представлена на рисунке 7. Изображение наглядно демонстрирует, что нейросетевой подход обеспечивает фотореалистичное природное окружение без дополнительного ручного моделирования растительности.

Разработанная методология обеспечивает непрерывный цифровой процесс проектирования, охватывающий весь жизненный цикл от генерации концептуальных изображений на основе текстовых описаний до формирования детализированной информационной модели с автоматизированной генерацией рабочей документации и презентационных материалов, что устраняет разрывы между этапами проектирования и обеспечивает согласованность данных на всех стадиях разработки проектных решений.

Сравнительный анализ трудозатрат по этапам проектирования мемориального комплекса представлен в таблице 5.

Совокупная экономия трудозатрат на проектирование мемориального комплекса составила 121,6–167,6 часа, что соответствует сокращению 80,0–84,7 % общего рабочего времени (таблица 5). Наибольший эффект зафиксирован на этапе концептуализации – 96,4–97,3 % за счёт генеративного ИИ – и расчётного обоснования – 89,5–92,1 % благодаря автоматизированным модулям проверки конструктивных параметров.

Таблица 5 – Сравнение трудозатрат традиционного и интегрированного подходов

Этап проектирования	Традиционный подход, час	Интегрированный подход, час	Абсолютная экономия, час	Относительная экономия, %
Концептуализация (эскизы, 40 вариантов)	96–128	3,47	92,5–124,5	96,4–97,3
Детальное BIM-моделирование	18–22	18,33	0–3,67	0–16,7
Расчетное обоснование несущей способности	6–8	0,63	5,37–7,37	89,5–92,1
Формирование рабочей документации	18–22	2,25	15,75–19,75	87,5–89,8
Визуализация (16 изображений 4K)	14–18	5,68	8,32–12,32	59,4–68,4
ИТОГО	**152–198**	**30,36**	**121,6–167,6**	**80,0–84,7**

Этап детального BIM-моделирования закономерно продемонстрировал наименьшую экономию трудозатрат (0–16,7 %), поскольку создание параметрических объектов и детальной геометрии по существу требует квалифицированного ручного труда специалиста. Вместе с тем качество этапа принципиально улучшилось: интегрированная проверка расчётных параметров и автоматический контроль нормативных требований устраняют системные ошибки, характерные для традиционной практики.

Анализ качественных показателей проектирования, представленных в таблице 6, выявляет не только экономию времени, но и принципиальное улучшение характеристик проектного процесса.

Вариативность рассматриваемых концептуальных решений возросла с 3–5 при традиционном подходе до 40 вариантов при ИИ-генерации, что в 8–13 раз повышает вероятность выбора оптимального архитектурного образа. Иллюстрацией результата концептуального этапа служит рисунок 4 – визуализация конструкции «Дерево памяти», созданная системой Midjourney и получившая наивысшую интегральную экспертную оценку.

Таблица 6 – Качественные показатели интегрированного подхода

Показатель качества	Традиционный подход	Интегрированный подход	Улучшение
Вариативность рассматриваемых концепций	3–5 вариантов	40 вариантов	+700–1233 %
Вероятность ошибок в расчетах	15–25 %	2–5 %	–80–92 %
Согласованность данных (чертежи, спецификации)	85–92 %	100 %	+8,7–17,6 %
Скорость итераций при изменениях	4–6 часов	0,7–1,2 часа	+333–757 %
Количество визуализаций на проект	3–5 изображений	16 изображений	+220–433 %
Детальность проработки конструкций	LOD 200–300	LOD 350	+16,7–75,0 %

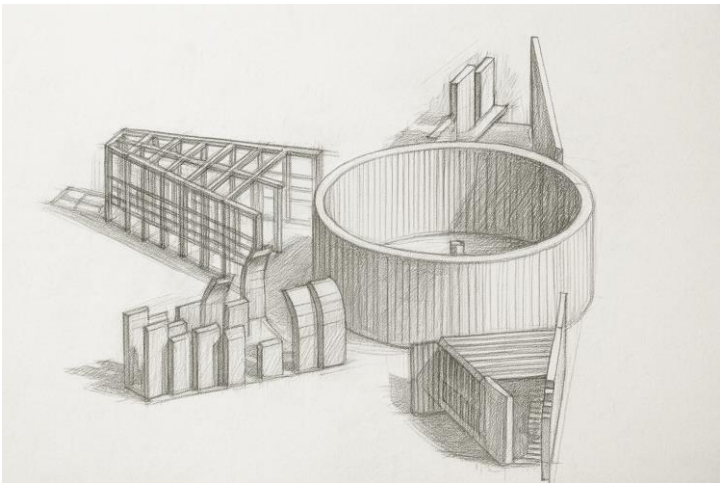


Рисунок 4 – Модульная конструкция «Дерево памяти» – концептуальная визуализация, созданная генеративной моделью Midjourney

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-50-58

Вероятность ошибок проектирования снизилась с 15–25 % до 2–5 % за счёт автоматизированной проверки геометрических и конструктивных параметров в реальном времени. Согласованность данных между чертежами, спецификациями и расчётами достигла 100 % благодаря единой цифровой BIM-модели, исключающей рассогласование, которое неизбежно при параллельной работе в разнородных программных средах.

Параметрическая BIM-модель уровня LOD 350, разработанная в среде Graphisoft ArchiCAD 27, обеспечила полное конструктивное обоснование обеих сооружений мемориального комплекса. Фрагмент модели арочно-каркасной конструкции «Дерево памяти» с детализацией узловых соединений представлен на рисунке 5 – он демонстрирует уровень проработки, достаточный для передачи в производство без дополнительной деталировки.

Параметрическая модель пятилучевой ферменной системы «Звезда нашей Родины», приведённая на рисунке 6, иллюстрирует возможности GDL-параметризации при проектировании конструкций с радиальной симметрией: автоматическая генерация геометрии всех пяти лучей из единого параметрического объекта сокращает объём моделирования в пять раз по сравнению с поэлементным построением.

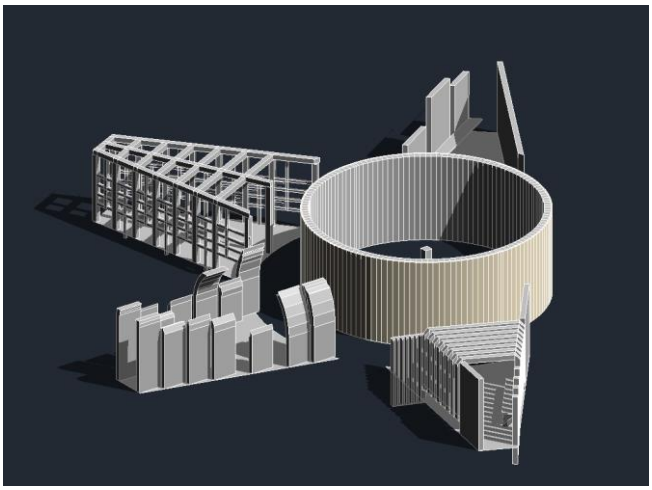


Рисунок 5 – BIM-модель модульной конструкции в среде Graphisoft ArchiCAD 27 с детализацией узловых соединений



Рисунок 6 – Модульная система «Звезда нашей Родины» – параметрическая BIM-модель с визуализацией структуры элементов

Экономическая эффективность интегрированной методологии оценена для проектной организации с портфелем 15–20 аналогичных объектов в год. При средней ставке специалиста 2 500 руб./час и экономии 121,6–167,6 часа на объект снижение себестоимости составляет 304 000–419 000 руб. на объект. Совокупный годовой эффект, включающий прямую экономию и дополнительную выручку от увеличенной пропускной способности, представлен в таблице 7.

Единовременные инвестиции в освоение методологии составляют 864 000 руб. (лицензия ArchiCAD 27 – 180 000 руб., оборудование – 450 000 руб., подписки Stable Diffusion Pro и Midjourney – 84 000 руб./год, обучение 5 специалистов – 150 000 руб.). Срок окупаемости при объёме 15 объектов/год – 0,9–1,6 месяца, при 20 объектах/год – 0,8–1,2 месяца, что подтверждает высокую инвестиционную привлекательность подхода.

Таблица 7 – Экономический эффект внедрения интегрированного подхода

Показатель	15 объектов/год	20 объектов/год
Экономия трудозатрат, часов	1824–2514	2432–3352
Снижение себестоимости проектирования, руб.	4560000–6285000	6080000–8380000
Повышение пропускной способности, объектов	+3–5	+4–7
Дополнительная выручка от роста объема, руб.	2100000–3500000	2800000–4900000
Общий годовой эффект, руб.	6660000–9785000	8880000–13280000

Итоговая фотореалистичная визуализация мемориального комплекса, полученная нейросетевым методом при оптимальных параметрах denoising strength = 0,65 и guidance scale = 10, представлена на рисунке 7. Изображение наглядно демонстрирует, что нейросетевой конвейер обеспечивает качество 8,4 балла из 10, при этом сокращая время рендеринга в 3,5–4,6 раза по сравнению с V-Ray-6.0 и Corona Renderer-10.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-50-58



Рисунок 7 – Финальная фотореалистичная визуализация мемориального комплекса, созданная нейросетевыми алгоритмами Stable Diffusion XL

Заключение

В ходе исследования обоснована и экспериментально подтверждена эффективность комплексного применения генеративных моделей искусственного интеллекта, параметрического BIM-моделирования и нейросетевых алгоритмов визуализации в архитектурно-проектной практике. Полученные результаты демонстрируют значительное сокращение временных и трудовых затрат на ключевых этапах формирования проектных решений при одновременном росте их вариативности и проработанности. Использование генеративных моделей позволило интенсифицировать процесс концептуального поиска, обеспечив кратное увеличение количества альтернативных решений при сохранении управляемости параметров генерации.

Применение параметрического BIM-моделирования обеспечило переход к более формализованной и воспроизводимой логике проектирования, в рамках которой достигается высокая скорость создания информационных моделей уровня детализации LOD 350, автоматизируется проверка конструктивных элементов и существенно оптимизируются процессы подготовки проектной документации. Разработанная система параметризации деревянных конструкций подтвердила свою прикладную значимость, обеспечив сокращение трудозатрат при формировании спецификаций и чертежей без потери точности и согласованности данных.

Нейросетевые методы визуализации, в свою очередь, продемонстрировали устойчивое ускорение процессов создания фотореалистичных изображений при сохранении высокого уровня визуального качества, что расширяет возможности представления проектных решений и повышает эффективность профессиональной коммуникации.

В совокупности полученные результаты позволяют рассматривать интеграцию генеративных и параметрических подходов как один из ключевых факторов повышения эффективности и качества архитектурного проектирования в условиях цифровизации отрасли. Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения предложенной методологии в реальные проектные процессы, в том числе при разработке объектов из древесины. Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием библиотек параметрических объектов, углублением интеграции с технологиями виртуальной и дополненной реальности, а также масштабированием подхода на проектирование крупных общественных зданий.

Список цитированных источников

1. Azhar, S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry / S. Azhar // Leadership and Management in Engineering. – 2011. – Vol. 11, № 3. – P. 241–252. – DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127.
2. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors / C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston. – 2nd ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2011. – 648 p. – DOI: 10.1002/9780470261309.
3. Caetano, I. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design / I. Caetano, L. Santos, A. Leitão // Frontiers of Architectural Research. – 2020. – Vol. 9, № 2. – P. 287–300. – DOI: 10.1016/j.foar.2019.12.008.
4. The wood from the trees: The use of timber in construction / M. H. Ramage, H. Burridge, M. Busse-Wicher [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 68. – P. 333–359. – DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.107.
5. Dallasega, P. Industry 4.0 as an Enabler of Proximity for Construction Supply Chains: A Systematic Literature Review / P. Dallasega, E. Rauch, C. Linder // Computers in Industry. – 2018. – Vol. 99. – P. 205–225. – DOI: 10.1016/j.compind.2018.03.039.
6. Bryde, D. The project benefits of Building Information Modelling (BIM) / D. Bryde, M. Broquetas, J. M. Volm // International Journal of Project Management. – 2013. – Vol. 31, № 7. – P. 971–980. – DOI: 10.1016/j.ijproman.2012.12.001.
7. Artificial Intelligence and Architectural Design: An Introduction / J. Muntañola, M. Saura, A. Cocho-Bermejo, J. Beltran Borràs. – Barcelona : Polytechnic University of Catalonia, 2022. – DOI: 10.5821/ebook-9788419184498.
8. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models / R. Rombach, A. Blattmann, D. Lorenz [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – New Orleans, 2022. – P. 10684–10695. – DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01042.
9. Photorealistic Text-to-Image Diffusion Models with Deep Language Understanding / C. Saharia, W. Chan, S. Saxena [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2022. – Vol. 35. – P. 36479–36494. – DOI: 10.48550/arXiv.2205.11487.
10. Amanzadegan, M. A Systematic Review of the BIM in Construction: From Smart Building Management to Interoperability of BIM & AI / M. Amanzadegan, A. Heidari, Y. Peyvastehgar // Architectural Science Review. – 2023. – Vol. 66, № 5. – P. 1–20. – DOI: 10.1080/00038628.2023.2263721.
11. Integrating Building Information Modelling and Artificial Intelligence in Construction Projects: A Review of Challenges and Mitigation Strategies / A. A. Khan, A. O. Bello, M. Arqam [et al.] // Technologies. – 2024. – Vol. 12, № 10. – Art. 185. – DOI: 10.3390/technologies12100185.
12. Integrated applications of building information modeling and artificial intelligence techniques in the AEC/FM industry / F. Zhang, A. P. C. Chan, A. Darko [et al.] // Automation in Construction. – 2022. – Vol. 139. – Art. 104289. – DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104289.
13. Nguyen Van, T. Research Trends on Machine Learning in Construction Management: A Scientometric Analysis / T. Nguyen Van, T. Nguyen Quoc // Journal of Applied Science and Technology Trends. – 2021. – Vol. 2, № 2. – P. 124–132. – DOI: 10.38094/jastt203105.
14. Alnajjar, O. A Systematic Review of Lean Construction, BIM and Emerging Technologies Integration: Identifying Key Tools / O. Alnajjar, E. Atencio, J. Turmo // Buildings. – 2025. – Vol. 15, № 16. – Art. 2884. – DOI: 10.3390/buildings15162884.
15. Towards 4D BIM: A Systematic Literature Review on Challenges, Strategies and Tools in Leveraging AI with BIM / M. Awe, A. Malhi, M. Budka [et al.] // Buildings. – 2025. – Vol. 15, № 7. – Art. 1072. – DOI: 10.3390/buildings15071072.
16. Generative AI for Architectural Design: A Literature Review / C. Li, T. Zhang, X. Du [et al.] // arXiv. – 2024. – arXiv:2404.01335. – URL: https://arxiv.org/abs/2404.01335 (date of access: 24.10.2025).
17. Lobos-Calquin, D. Implementation of BIM Technologies in Wood Construction: Multidisciplinary Review / D. Lobos-Calquin, R. Mata, C. Correa [et al.] // Buildings. – 2024. – Vol. 14, № 3. – P. 677. – DOI: 10.3390/buildings14030677.
18. BIMForum. Level of Development (LOD) Specification, Part I & Commentary. – Washington D.C. : BIMForum, 2023. – 238 p. – URL: https://bimforum.org/lod (дата обращения: 24.10.2025).
19. Zhang, L. Adding Conditional Control to Text-to-Image Diffusion Models / L. Zhang, A. Rao, M. Agrawala // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – Paris, 2023. – P. 3836–3847. – DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.00355.

20. As, I. Artificial Intelligence in Architecture: Generating Conceptual Design via Deep Learning / I. As, P. Basu // International Journal of Architectural Computing. – 2018. – Vol. 16, № 4. – P. 306–327. – DOI: 10.1177/1478077118800982.
21. Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Review of Present Status, Opportunities and Future Challenges / S. O. Abioye, L. O. Oyedele, L. Akanbi [et al.] // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 44. – P. 103299. – DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103299.
22. Ho, J. Denoising Diffusion Probabilistic Models / J. Ho, A. Jain, P. Abbeel // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2020. – Vol. 33. – P. 6840–6851. – DOI: 10.48550/arXiv.2006.11239.
23. Regenwetter, L. Deep Generative Models in Engineering Design: A Review / L. Regenwetter, A. H. Nobari, F. Ahmed // Journal of Mechanical Design. – 2022. – Vol. 144, № 7. – P. 071703. – DOI: 10.1115/1.4053859.
24. Исаев, Ш. М. Современные подходы к проектированию архитектурного освещения с помощью искусственного интеллекта / Ш. М. Исаев, А. И. Зацепина // Неделя науки Инженерно-строительного института – 2025: материалы секции «Цифровое строительство зданий и сооружений». – СПб. : Изд-во СПбПУ, 2025. – С. 263–265.

References

1. Azhar, S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry / S. Azhar // Leadership and Management in Engineering. – 2011. – Vol. 11, № 3. – P. 241–252. – DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127.
2. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors / C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston. – 2nd ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2011. – 648 p. – DOI: 10.1002/9780470261309.
3. Caetano, I. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design / I. Caetano, L. Santos, A. Leitão // Frontiers of Architectural Research. – 2020. – Vol. 9, № 2. – P. 287–300. – DOI: 10.1016/j.foar.2019.12.008.
4. The wood from the trees: The use of timber in construction / M. H. Ramage, H. Burridge, M. Busse-Wicher [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 68. – P. 333–359. – DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.107.
5. Dallasega, P. Industry 4.0 as an Enabler of Proximity for Construction Supply Chains: A Systematic Literature Review / P. Dallasega, E. Rauch, C. Linder // Computers in Industry. – 2018. – Vol. 99. – P. 205–225. – DOI: 10.1016/j.compind.2018.03.039.
6. Bryde, D. The project benefits of Building Information Modelling (BIM) / D. Bryde, M. Broquetas, J. M. Volm // International Journal of Project Management. – 2013. – Vol. 31, № 7. – P. 971–980. – DOI: 10.1016/j.ijproman.2012.12.001.
7. Artificial Intelligence and Architectural Design: An Introduction / J. Muntañola, M. Saura, A. Cocho-Bermejo, J. Beltran Borràs. – Barcelona : Polytechnic University of Catalonia, 2022. – DOI: 10.5821/ebook-9788419184498.
8. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models / R. Rombach, A. Blattmann, D. Lorenz [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – New Orleans, 2022. – P. 10684–10695. – DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01042.
9. Photorealistic Text-to-Image Diffusion Models with Deep Language Understanding / C. Saharia, W. Chan, S. Saxena [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2022. – Vol. 35. – P. 36479–36494. – DOI: 10.48550/arXiv.2205.11487.
10. Amanzadegan, M. A Systematic Review of the BIM in Construction: From Smart Building Management to Interoperability of BIM & AI / M. Amanzadegan, A. Heidari, Y. Peyvastehgar // Architectural Science Review. – 2023. – Vol. 66, № 5. – P. 1–20. – DOI: 10.1080/00038628.2023.2263721.
11. Integrating Building Information Modelling and Artificial Intelligence in Construction Projects: A Review of Challenges and Mitigation Strategies / A. A. Khan, A. O. Bello, M. Arqam [et al.] // Technologies. – 2024. – Vol. 12, № 10. – Art. 185. – DOI: 10.3390/technologies12100185.
12. Integrated applications of building information modeling and artificial intelligence techniques in the AEC/FM industry / F. Zhang, A. P. C. Chan, A. Darko [et al.] // Automation in Construction. – 2022. – Vol. 139. – Art. 104289. – DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104289.
13. Nguyen Van, T. Research Trends on Machine Learning in Construction Management: A Scientometric Analysis / T. Nguyen Van, T. Nguyen Quoc // Journal of Applied Science and Technology Trends. – 2021. – Vol. 2, № 2. – P. 124–132. – DOI: 10.38094/jastt203105.
14. Alnajjar, O. A Systematic Review of Lean Construction, BIM and Emerging Technologies Integration: Identifying Key Tools / O. Alnajjar, E. Atencio, J. Turmo // Buildings. – 2025. – Vol. 15, № 16. – Art. 2884. – DOI: 10.3390/buildings15162884.
15. Towards 4D BIM: A Systematic Literature Review on Challenges, Strategies and Tools in Leveraging AI with BIM / M. Awe, A. Malhi, M. Budka [et al.] // Buildings. – 2025. – Vol. 15, № 7. – Art. 1072. – DOI: 10.3390/buildings15071072.
16. Generative AI for Architectural Design: A Literature Review / C. Li, T. Zhang, X. Du [et al.] // arXiv. – 2024. – arXiv:2404.01335. – URL: https://arxiv.org/abs/2404.01335 (date of access: 24.10.2025).
17. Lobos-Calquin, D. Implementation of BIM Technologies in Wood Construction: Multidisciplinary Review / D. Lobos-Calquin, R. Mata, C. Correa [et al.] // Buildings. – 2024. – Vol. 14, № 3. – P. 677. – DOI: 10.3390/buildings14030677.
18. BIMForum. Level of Development (LOD) Specification, Part I & Commentary. – Washington D.C. : BIMForum, 2023. – 238 p. – URL: https://bimforum.org/lod (data obrashcheniya: 24.10.2025).
19. Zhang, L. Adding Conditional Control to Text-to-Image Diffusion Models / L. Zhang, A. Rao, M. Agrawala // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – Paris, 2023. – P. 3836–3847. – DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.00355.
20. As, I. Artificial Intelligence in Architecture: Generating Conceptual Design via Deep Learning / I. As, P. Basu // International Journal of Architectural Computing. – 2018. – Vol. 16, № 4. – P. 306–327. – DOI: 10.1177/1478077118800982.
21. Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Review of Present Status, Opportunities and Future Challenges / S. O. Abioye, L. O. Oyedele, L. Akanbi [et al.] // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 44. – P. 103299. – DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103299.
22. Ho, J. Denoising Diffusion Probabilistic Models / J. Ho, A. Jain, P. Abbeel // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2020. – Vol. 33. – P. 6840–6851. – DOI: 10.48550/arXiv.2006.11239.
23. Regenwetter, L. Deep Generative Models in Engineering Design: A Review / L. Regenwetter, A. H. Nobari, F. Ahmed // Journal of Mechanical Design. – 2022. – Vol. 144, № 7. – P. 071703. – DOI: 10.1115/1.4053859.
24. Isaev, SH. M. Sovremennye podhody k proektirovaniyu arhitekturnogo osveshcheniya s pomoshch'yu iskusstvennogo intellekta / SH. M. Isaev, A. I. Zacepina // Nedelya nauki Inzhenerno-stroitel'nogo instituta – 2025: materialy sekcii «Cifrovoe stroitel'stvo zdanij i sooruzhenij». – SPb. : Izd-vo SPbPU, 2025. – S. 263–265.

Материал поступил 09.02.2026, одобрен 23.02.2026, принят к публикации 30.03.2026

УДК 692.21

АНИЗОТРОПИЯ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

П. И. Матяс[1], В. Н. Деркач[2], А. В. Галалюк[3]

[1] Аспирант, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: matyas.ntc@gmail.com
[2] Д. т. н., директор, Филиал НТЦ РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», Брест, Беларусь, e-mail: v-derkatch@yandex.ru
[3] К. т. н., начальник управления, Филиал НТЦ РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», Брест, Беларусь, e-mail: halaliuk@mail.ru

Реферат

Приведены результаты экспериментальных исследований анизотропии прочности на сжатие керамического кирпича. Исследовался исторический кирпич, отобранный из стен здания казармы Брестской крепости и современный кирпич разной прочности на сжатие. Определение степени анизотропии прочности на сжатие выполнялось на основании испытаний образцов-кубов с ребром 65 мм, выпиленных из тела кирпича. Образцы-кубы испытывались сжимающей нагрузкой, действующей перпендикулярно лицевой, торцевой и опорной поверхностям кирпича. По результатам испытаний установлено, что значение прочности на сжатие исторического кирпича при сжатии перпендикулярно его опорной поверхности, ниже, чем при сжатии перпендикулярно лицевой и торцевой поверхностям. При испытаниях современного кирпича наблюдался обратный эффект. Разница в свойствах исторического и современного кирпича объясняется разной технологией их производства, а также использованием в одной конструкции разных видов кирпича. Полученные результаты следует учитывать при проведении работ по обследованию каменных конструкций. Показано, что при обследовании исторических зданий применение склерометрических методов оценки прочности каменной кладки недопустимо, так как построение градуировочной зависимости, связывающей прочность на сжатие кирпича в направлении опорной поверхности с результатами косвенного испытания лицевой поверхности кирпича, не представляется возможным. При оценке надежности исторических конструкций прочность на сжатие каменной кладки следует определять по результатам испытаний кирпича и раствора на сжатие в направлении действующего в конструкции сжимающего усилия. Предпочтительными являются испытания каменной кладки в конструкции или лабораторными испытаниями отобранных из обследуемой конструкции образцов кладки.

Ключевые слова: каменная кладка, керамический кирпич, анизотропия прочности, прочность на сжатие, исторические здания.

ANISOTROPY OF THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CERAMIC BRICKS

P. I. Matyas, V. N. Derkach, A. V. Halaliuk

Abstract

The results of experimental studies of the anisotropy of the compressive strength of ceramic bricks are presented. The historical brick selected from the walls of the Brest Fortress barracks building and modern bricks of different compressive strength were studied. The degree of anisotropy of compressive strength was determined based on tests of cube specimen with an edge of 65 mm sawn from the body of the brick. The cube specimen was tested by a compressive load acting perpendicular to the stretchers, headers and beds surfaces of the brick. According to the test results, it was found that the compressive strength of a historical brick when compressed perpendicular to its bed surface is lower than when compressed perpendicular to the header and stretcher faces. When testing modern bricks, the opposite effect was observed. The difference in the properties of historical and modern bricks is explained by the different technology of their production, as well as the use of different types of bricks in the same structure. The results obtained should be taken into account when carrying out work on the inspection of stone structures. It is shown that when examining historical buildings, the use of sclerometric methods for assessing the strength of masonry is unacceptable, since it is not possible to build a calibration relationship linking the compressive strength of bricks in the direction of the bed surface with the results of indirect testing of the stretcher faces of the brick. When assessing the reliability of historical structures, the compressive strength of masonry should be determined based on the results of tests of brick and mortar for compression in the direction of the compressive force acting in the structure. Tests of masonry in the structure or laboratory tests of masonry specimen selected from the examined structure are considered to be mandatory.

Keywords: masonry, ceramic brick, strength anisotropy, compressive strength, historical buildings.

Введение

Кирпичная каменная кладка является композитным материалом, физико-механические характеристики которого зависят от физико-механических характеристик кирпича и растворных швов. В каменной кладке кирпич играет роль основного конструктивного элемента. Соответственно сопротивление силовым и температурно-влажностным воздействиям каменных конструкций, их огнестойкость, теплотехнические и акустические свойства во многом определяются свойствами кирпича.

Важнейшей механической характеристикой каменной кладки, является ее прочность на сжатие, которая зависит от ряда факторов. Главными из них являются прочность на сжатие кирпича и раствора. Ввиду разницы в физико-механических свойствах кирпича и затвердевшего раствора каменная кладка обладает выраженной конструкционной неоднородностью. Неоднородностью каменной кладки объясняется анизотропия ее прочностных и деформационных характеристик. Сцепление в каменной кладке обоих ее компонентов (кирпича и растворных швов) обеспечивает их совместную деформацию при внешних воздействиях. Поэтому в инженерных расчетах каменных конструкций используют упрощение, заключающееся в том, что каменную кладку рассматривают как однородный материал с условными прочностными и деформационными свойствами – одинаковыми в каждой точке.

Следует отметить, что предположение об однородности каменной кладки может быть весьма ошибочным в случае выполнения численного анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) ответственных фрагментов или узлов каменных конструкций. В этом случае используют метод микромоделирования каменной кладки, согласно которому ее рассматривают как конструкцию или гетерогенное (неоднородное) тело, состоящее из кирпичей и растворных швов, характеристики жесткости и прочности которых учитываются раздельно. Указанные характеристики, как правило, устанавливают на основе простых стандартных испытаний кирпича и раствора. Известно, что керамический кирпич является анизотропным материалом, степень анизотропии механических характеристик которого зависит от технологии его производства [1–6]. При этом данные о анизотропии механических характеристик керамического кирпича в научной и технической литературе практически отсутствуют, что определяет актуальность настоящих исследований.

Материалы и методы

С целью получения данных о степени анизотропии прочности на сжатие керамического кирпича были выполнены исследования исторического полнотелого кирпича, отобранного из стен здания казармы Брестской крепости, построенной в 1933 г, а также двух типов современного кирпича, произведенного в Республике Беларусь.

Исторический кирпич имел следующие размеры: длина – 265 мм, ширина – 130 мм, высота – 60 мм. Данным размерам соответствует керамический кирпич, который производился со второй половины XIX века в Польше [7]. Размеры современного кирпича: длина – 250 мм, ширина – 120 мм, высота – 65 мм.

Первоначально были определены средние значения прочности кирпича при сжатии и изгибе в соответствие с ГОСТ 8462 (рисунок 1).

По результатам испытаний средние значения прочности кирпича при сжатии и изгибе, соответственно составили:

– для исторического кирпича – 16,9 МПа и 5,1 МПа;

– для современного кирпича первого типа – 17,3 МПа и 5,5 МПа;

– для современного кирпича второго типа – 25,9 МПа и 3,3 МПа.

Анизотропия прочности на сжатие керамического кирпича устанавливалась на основании испытаний выпиленных из его тела кубов с размером ребра равным высоте кирпича. Кубы испытывались сжимающей нагрузкой, действующей перпендикулярно граням параллельным лицевой, торцевой и опорной поверхностям кирпича. Для каждого испытания из кирпичей изготавливалось по 5–6 керамических образцов-кубов. Грани куба, контактирующие с плитами пресса, выравнивалась тонким слоем гипсового раствора.

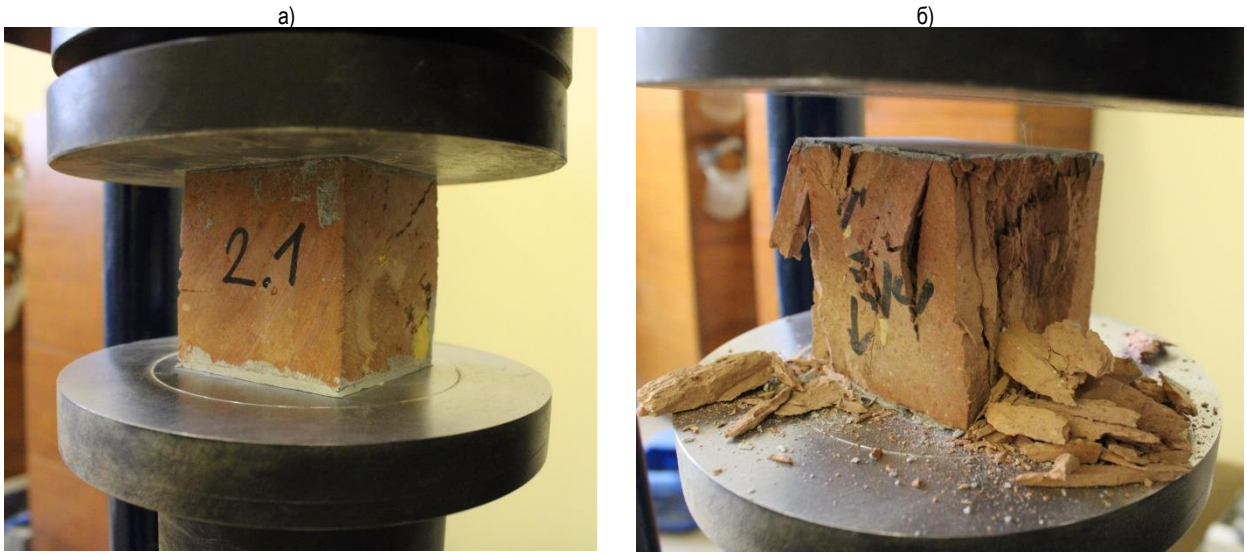
Испытание на сжатие опытных образцов-кубов производилось при помощи испытательной машины УМЭ-10М. Керамические кубы устанавливались одной из выбранных граней на нижнюю опорную плиту испытательной машины центрально относительно ее продольной оси. После установки образца на опорную плиту, верхняя плита машины совмещалась с верхней опорной гранью образца, так, чтобы их плоскости полностью прилегали одна к другой. Нагружение образца производилось непрерывно, со скоростью, обеспечивающей его разрушения в пределах 30-ти секунд. Общий вид керамического образца-куба в испытательной установке и характер его разрушения показаны на рисунке 2.

Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытаний, принималось за разрушающую нагрузку. Прочность на сжатие образца определялась как частное от деления разрушающей нагрузки на рабочую площадь его поперечного сечения. По результатам испытаний образцов-кубов определялись средние значения прочности образцов при действии сжимающего усилия в направлении лицевой, опорной и торцевой поверхностей кирпича.



а) сжатие; б) изгиб

Рисунок 1 – Испытания кирпича



а) общий вид образца; б) характер разрушения

Рисунок 2 – Испытание керамических кубов

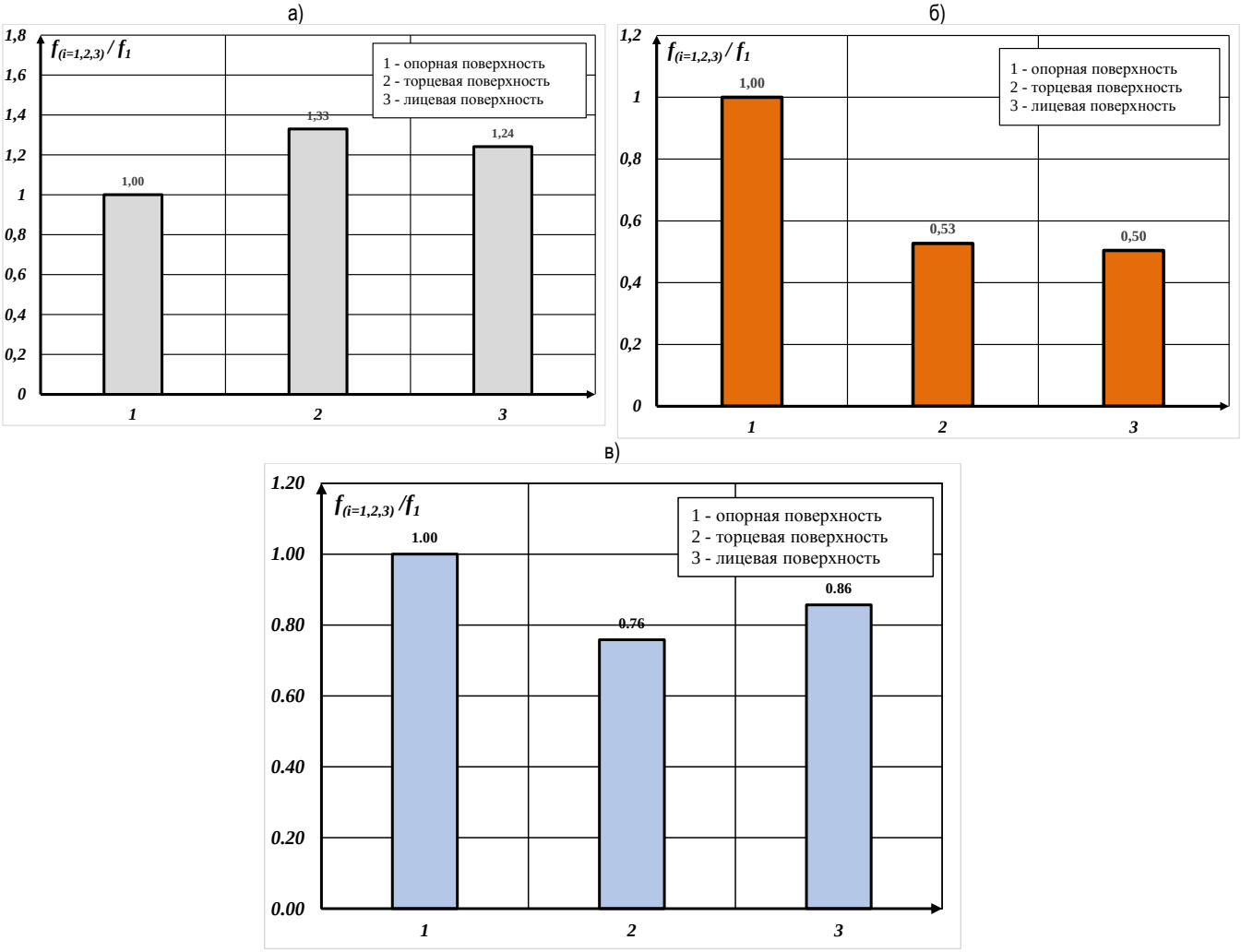
https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-59-63

Результаты исследования

Испытания на сжатие керамических образцов кубов, выпиленных из исторического кирпича, показали, что его прочность на сжатие перпендикулярно лицевой *(f3)* и торцевой *(f2)* поверхностям выше, соответственно, на 24 % и 33 % прочности на сжатие перпендикулярно опорной поверхности *(f1)*.

При испытаниях образцов-кубов, выпиленных из современного кирпича, наиболее высокие значения прочности на сжатие были получены для направления нагрузки перпендикулярно опорной поверхности кирпича. Прочность керамических кубов, испытанных сжимающей нагрузкой перпендикулярно лицевой *(f3)* и торцевой *(f2)* поверхностям кирпича, оказалась ниже прочности на сжатие перпендикулярно опорной поверхности *(f1)* для кирпича первого типа на 50 % и 47 %, а для кирпича второго типа – на 15 % и 24 %.

На рисунке 3 приведены графики отношения полученных значений прочности опытных образцов-кубов при сжатии перпендикулярно лицевой *(f3)* и торцевой *(f2)* поверхностей кирпича к прочности на сжатие перпендикулярно к его опорной поверхности *(f1)*.



а) исторический кирпич; б) современный кирпич первого типа; в) современный кирпич второго типа

Рисунок 3 – Результаты определения прочности керамических образцов кубов

Из рисунка 3 следует, что керамический кирпич обладает выраженной анизотропией прочности на сжатие. Для исторического кирпича отношение f_2/f_1 = 1,33 и f_3/f_1 =1,24, а для современного кирпича – f_2/f_1 = 0,53–0,76 и f_3/f_1 = 0,5–0,86.

Следует отметить, что при испытании керамических образцов-кубов коэффициент вариации прочности на сжатие составил 25–40 % для исторического кирпича и 10–15 % для современного кирпича.

Полученные значения анизотропии прочности на сжатие современного кирпича удовлетворительно согласуются с приведенными в [4, 5] результатами испытаний керамических образцов-цилиндров, которые отбирались из полнотелого керамического кирпича марок М150 (Новгород), М200 (Витебск) и М250 (Санкт-Петербург) перпендикулярно его лицевой и опорной поверхностям. По результатам испытаний среднее значение отношения прочности на сжатие цилиндрических образцов, отобранных ортогонально лицевой и опорной поверхности кирпича $f_3/f_1 \approx 0{,}6$. При этом для исторического кирпича установить корреляционную зависимость прочности на сжатие от направления сжимающего усилия не удалось ввиду значительного разброса результатов испытаний, (коэффициент вариации 30–45 %).

Представляют интерес данные о прочности на сжатие керамического кирпича в зависимости от направления действия сжимающего усилия по отношению к его опорной плоскости [6]. На сжатие испытывались керны диаметром 45 мм, которые выбуривались под разными углами к опорной плоскости кирпича. Исследования показали, что для современного кирпича при направлении сжимающего усилия под углом к опорной плоскости $0^0 < \varphi \leq 60^0$ прочность на сжатие близка к прочности на сжатие ортогонально опорной плоскости, $\varphi = 0^0$.

Для исторического кирпича при действии сжимающего усилия под углами $35^0 \leq \varphi \leq 60^0$ прочность на сжатие оказалась на 20–25 % выше прочности на сжатие под углом $\varphi = 0^0$. Из-за высокого разброса результатов испытаний для данного кирпича не удалось установить корреляционную зависимость прочности на сжатие от направления сжимающего усилия.

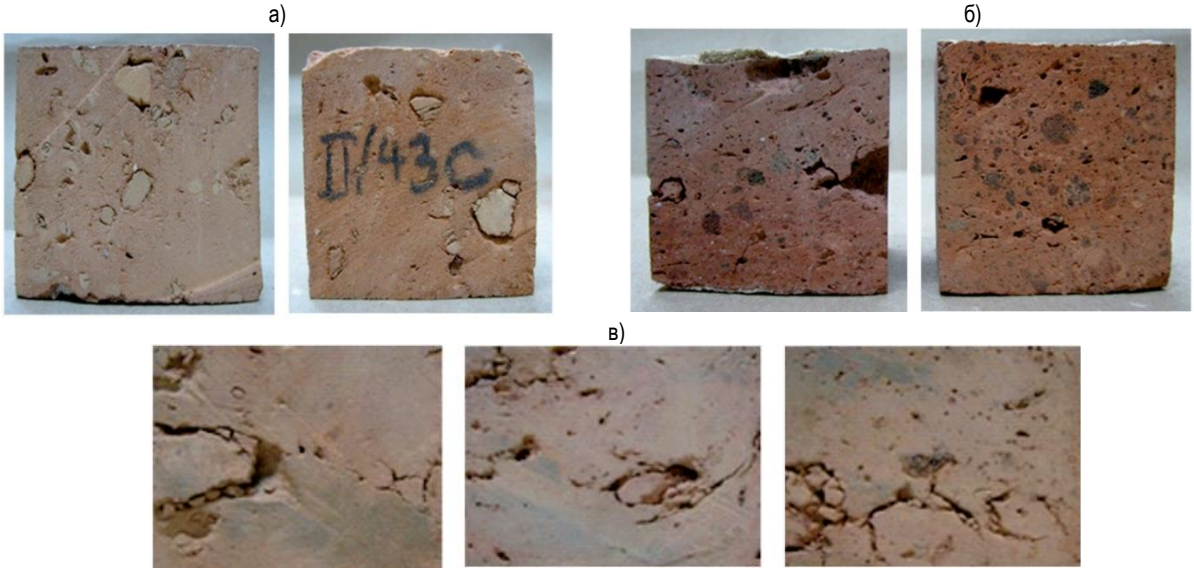
https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-59-63

Обсуждение

Разница в свойствах исторического и современного кирпича объясняется разной технологией их производства. Керамический кирпич, в зависимости от способа его производства, можно разделить на две категории: ручной и механизированной формовки. Кирпич ручной формовки изготавливался с древних времен практически до конца XIX века (хотя известны примеры ручной формовки кирпичей XX века). Ручная формовка кирпичей происходила в деревянных формах – глину уплотняли, а затем излишки срезали пальцами. Из-за заметных отпечатков пальцев на плоской поверхности такие кирпичи называли «пальчатками» [16]. В более позднее время (примерно с XVII века) для удаления излишков глины из формы использовали деревянную строганую рейку.

Основным видом кирпича на территории современной Беларуси являлся обожжённый кирпич, отличающийся высокой стойкостью к воздействию внешних факторов [16–19]. Обжиг кирпича чаще всего проводился в простых полевых печах, при этом укладка, обжиг и охлаждение обычно занимали от четырех до восьми недель. Температура обжига составляла от 800 до 1100 °С и достигала своего максимума в течение четырех–шести дней. После обжига следовал естественный процесс охлаждения печи. В зависимости от количества кирпичей, типа топлива и погодных условий один цикл обжига длился от двух до четырех недель. Конструкцией печей определялось качество керамического кирпича. Лучше всего обжигался материал из средней части печей (вишнёвые кирпичи). Чем ближе к внешним стенкам, тем хуже было качество кирпичей, а значительная часть керамического материала «полусырые» характеризовалась низкими прочностными показателями (недожжённый кирпич). Таким образом, из одной обжиговой партии получали кирпичи с существенным различием физико-механических характеристик. Значительная изменчивость физико-механических характеристик кирпича в каменной кладке стен объясняется еще и тем, что при строительстве крупных объектов использовался кирпич, обжиг которого производился в разных печах.

Значительные изменения в производстве кирпича произошли на рубеже XVIII и XIX веков. В Англии сначала была применена паровая машина для смешивания глины, а в 1799 году было создано первое устройство, заменяющее ручную формовку кирпичей. В середине XIX века были разработаны устройства для промышленной формовки кирпича. Большое значение имело также внедрение для обжига кирпича туннельной печи (1853 год), а затем кольцевой печи (Хоффмана – 1858 год). На территории современной Беларуси новые технологии и так называемый «машинный кирпич» начали применять с конца XIX века. На свойства «машинного кирпича» влияли: механический способ подготовки сырья, формовка под давлением, обжиг в стационарных печах при температурах выше 900 °С. При этом структура «машинного кирпича» получалась более плотной и однородной по сравнению с кирпичом ручной формовки. Примеры структуры исторического керамического кирпича приведены на рисунке 4.



а), б) кирпич XIX века; в) кирпич XVII и XVIII века

Рисунок 4 – Структура исторического керамического кирпича [7]

Из-за несовершенства технологии геометрические размеры исторического кирпича не выдерживались. Формованный кирпич, применявшийся до первых десятилетий XIX в., имел деформированные грани, скругленные ребра и обтекаемые углы. Прочность на сжатие кирпича составляла 8–12 МПа, что соответствовало марке кирпича М100. Вследствие деградации материала кирпича в течении длительного периода эксплуатации его прочность на сжатие на сегодняшний момент может быть существенно снижена. При капитальном ремонте и реконструкции зданий старой постройки часто использовался кирпич из разрушенных зданий, о чем свидетельствует наличие в обследуемой каменной кладке кирпичей с различными клеймами. Примером являются исторические сооружения Брестской крепости, многие из которых были возведены в середине XIX века из кирпича разрушенных зданий [20]. В связи с этим при испытании кирпичей, изъятых из каменной кладки исторических зданий, их прочность на сжатие, а также степень анизотропии прочности может существенно разниться.

При обследовании исторических зданий прочность на сжатие кирпича и кладочного раствора часто устанавливают на основе склерометрических методов, используют склерометры, в которых заводом заложена градуировочная зависимость между параметрами, измеряемыми данными приборами, и прочностью на сжатие кирпича. Проведенные исследования показывают, что применение склерометрических методов оценки прочности каменной кладки исторических зданий недопустимо, так как построение градуировочной зависимости, связывающей прочность на сжатие кирпича в направлении опорной поверхности с результатами косвенного испытания лицевой поверхности кирпича, не представляется возможным. Данные методы рекомендуется применять для оценки однородности каменной кладки и определения мест отбора кирпича и раствора, а также при контроле прочности кирпича заводского изготовления, для которого имеется возможность построения частных градуировочных зависимостей.

Заключение

Керамический кирпич имеет выраженную анизотропию прочности на сжатие. По результатам испытаний исторического кирпича прочность на сжатие перпендикулярно опорной плоскости оказалась

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-59-63

ниже прочности в направлении лицевой и торцевой поверхностям. Для современного кирпича наблюдалась обратная зависимость. Указанное обстоятельство следует учитывать при проведении работ по обследованию каменных конструкций.

При оценке надежности исторических конструкций прочность на сжатие каменной кладки следует определять по результатам испытаний кирпича и раствора на сжатие в направлении действующего в конструкции сжимающего усилия. Результаты оценки прочности кладки, полученные на основании испытаний отобранных из ее тела отдельных кирпичей и затвердевшего раствора, не учитывают взаимодействие кирпича и раствора в каменной кладке. Достоверные данные о прочности на сжатие каменной кладки существующих конструкций можно получить путем ее испытания в конструкции или лабораторных испытаний отобранных из обследуемой конструкции образцов кладки [1–3, 8–15].

Список цитированных источников

1. Деркач, В. Н. Каменные и армокаменные конструкции. Оценка технического состояния, ремонт и усиление / В. Н. Деркач. – Минск : СтройМедиа Проект, 2021. – 256 с.
2. Орлович, Р. Б. Оценка технического состояния исторических каменных зданий / Р. Б. Орлович, С. С. Зимин.– СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 209 с.
3. Tkacz, P. Wybrane sposoby określania wytrzymałości muru w budynkach istniejących / P. Tkacz, R. Orlowicz // XXXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta WPPK : Materiały Konferencyjne, Gliwice, 5–8 marca 2019. – Gliwice, 2019. – S. 227–242.
4. Улыбин, А. В. О методах контроля прочности керамического кирпича при обследовании зданий и сооружений / А. В. Улыбин, С. В. Зубков // Инженерно-строительный журнал. –2013. – № 3. – С. 29–34.
5. Стандартная и альтернативная методики определения прочности кирпича при обследовании зданий и сооружений / А. В. Улыбин, С. В. Зубков, О. Ю. Сударь, Е. А. Лаптев // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 3 (18). – С. 9–24.
6. Einfluss der Belastungsrichtung auf die einaxiale Druckfestigkeit von Proben aus Vollziegeln / A. Krawtschuk, O. Zeman, J. Schellander [et al.] // Mauerwerk. − 2014. − № 2. − P. 98–104.
7. Matysek, P. Identyfikacja wytrzymałości na ściskanie i odkształcalności murów ceglanych w obiektach istniejących / P. Matysek. – Kraków : Politechnika Krakowska, 2014. − 167 s.
8. Деркач, В. Н. Методы оценки прочности каменной кладки в отечественной и зарубежной практике обследования зданий и сооружений / В. Н. Деркач, Н. М. Жерносек // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2010. – № 3 (28). – С. 135–143.
9. Белов, В. В. Экспертиза и технология усиления каменных конструкций / В. В. Белов, В. Н. Деркач // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 3 (28). – С. 14–20.
10. Желдаков, Д. Ю. Сегментный метод определения прочности ограждающей конструкции / Д. Ю. Желдаков // Строительство и реконструкция. − 2016. − № 3 (65). − С. 10–17.
11. Niedostatkiewicz, M. Badania wytrzymałości historycznych murów ceglanych / M. Niedostatkiewicz, T. Majewski // XXXVIII Ogolnoposkie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisla, 9–12 Kwiecień 2024 r. − Wisla, 2024. − S. 1–40.
12. UIC Code. Recommendations for the Inspection, Assessment, Reliability and Maintenance of Masonry Arch Bridges : final draft / International Union of Railways. – Paris : UIC, 2008. – 16 p.
13. RILEM Recommendation MDT. D. 4. In situ stress-strain behaviour tests based on the flat jack / RILEM TC 177-MDT. – Bagneux : RILEM, 2004. – 38 p.
14. Галалюк, А. В. Оценка механических характеристик каменной кладки существующих зданий / А. В. Галалюк, В. Н. Деркач // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 6 (110). – С. 5–14.
15. Gaber, K. Vorschlag für ein neues Verfahren zur Prüfung der Druckfestigkeit von bestehendem Mauerwerk / K. Gaber, R. Kupper // Mauerwerk. – 2012. – No. 16, Heft 6. – P. 297–300.
16. Трусов, О. А. Большемерный кирпич XIII-XVII в.в. на территории Белоруссии / О. А. Трусов // Славянорусские древности. – М. : Наука, 1991. – С. 111–117.
17. Малевская, М. В. Архитектурный комплекс Новогрудского детинца XIII–XIV в.в. / М. В. Малевкая // Древнерусское государство и славяне. – Минск, 1983. – С. 122–124.
18. Багласов, С. Г. Историко-архитектурные исследования и реставрация Лидского замка / С. Г. Багласов, О. А. Трусов // Вопросы архитектуры Лит. ССР. – Рига, 1983. – С. 36–38.
19. Колединский, Л. В. Строительная техника, строительные материалы средневекового Витебска / Л. В. Колединский, М. А. Ткачев // Вопросы архитектуры Лит. ССР. – Рига, 1983. – С. 22–24.
20. Курков, И. Н. Город на месте города: история Брестской крепости 20-е–30-е гг. / И. Н. Курков // Брестчина: легенды, события, люди. – Минск : Медиафакт, 2005. – С. 207–209.

References

1. Derkach, V. N. Kamennye i armokamennye konstrukcii. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya, remont i usilenie / V. N. Derkach. – Minsk : StrojMedia Proekt, 2021. – 256 s.
2. Orlovich, R. B. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya istoricheskih kamennyh zdanij / R. B. Orlovich, S. S. Zimin.– SPb. : POLITEKH-PRESS, 2024. – 209 s.
3. Tkacz, P. Wybrane sposoby określania wytrzymałości muru w budynkach istniejących / P. Tkacz, R. Orlowicz // XXXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta WPPK : Materiały Konferencyjne, Gliwice, 5–8 marca 2019. – Gliwice, 2019. – S. 227–242.
4. Ulybin, A. V. O metodah kontrolya prochnosti keramicheskogo kirpicha pri obsledovanii zdanij i sooruzhenij / A. V. Ulybin, S. V. Zubkov // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. –2013. – № 3. – S. 29–34.
5. Standartnaya i al'ternativnaya metodiki opredeleniya prochnosti kirpicha pri obsledovanii zdanij i sooruzhenij / A. V. Ulybin, S. V. Zubkov, O. YU. Sudar', E. A. Laptev // Stroitel'stvo unikal'nyh zdanij i sooruzhenij. – 2014. – № 3 (18). – C. 9–24.
6. Einfluss der Belastungsrichtung auf die einaxiale Druckfestigkeit von Proben aus Vollziegeln / A. Krawtschuk, O. Zeman, J. Schellander [et al.] // Mauerwerk. − 2014. − № 2. − P. 98–104.
7. Matysek, P. Identyfikacja wytrzymałości na ściskanie i odkształcalności murów ceglanych w obiektach istniejących / P. Matysek. – Kraków : Politechnika Krakowska, 2014. − 167 s.
8. Derkach, V. N. Metody ocenki prochnosti kamennoj kladki v otechestvennoj i zarubezhnoj praktike obsledovaniya zdanij i sooruzhenij / V. N. Derkach, N. M. ZHernosek // Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta. – 2010. – № 3 (28). – S. 135–143.
9. Belov, V. V. Ekspertiza i tekhnologiya usileniya kamennyh konstrukcij / V. V. Belov, V. N. Derkach // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. – 2010. – № 3 (28). – S. 14–20.
10. ZHeldakov, D. YU. Segmentnyj metod opredeleniya prochnosti ograzhdayushchej konstrukcii / D. YU. ZHeldakov // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. − 2016. − № 3 (65). − S. 10–17.
11. Niedostatkiewicz, M. Badania wytrzymałości historycznych murów ceglanych / M. Niedostatkiewicz, T. Majewski // XXXVIII Ogolnoposkie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisla, 9–12 Kwiecień 2024 r. − Wisla, 2024. − S. 1–40.
12. UIC Code. Recommendations for the Inspection, Assessment, Reliability and Maintenance of Masonry Arch Bridges : final draft / International Union of Railways. – Paris : UIC, 2008. – 16 p.
13. RILEM Recommendation MDT. D. 4. In situ stress-strain behaviour tests based on the flat jack / RILEM TC 177-MDT. – Bagneux : RILEM, 2004. – 38 p.
14. Galalyuk, A. V. Ocenka mekhanicheskih harakteristik kamennoj kladki sushchestvuyushchih zdanij / A. V. Galalyuk, V. N. Derkach // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2023. – № 6 (110). – S. 5–14.
15. Gaber, K. Vorschlag für ein neues Verfahren zur Prüfung der Druckfestigkeit von bestehendem Mauerwerk / K. Gaber, R. Kupper // Mauerwerk. – 2012. – No. 16, Heft 6. – P. 297–300.
16. Trusov, O. A. Bol'shemernyj kirpich XIII-XVII v.v. na territorii Belorussii / O. A. Trusov // Slavyanorusskie drevnosti. – M. : Nauka, 1991. – S. 111–117.
17. Malevskaya, M. V. Arhitekturnyj kompleks Novogrudskogo detinca XIII–XIV v.v. / M. V. Malevkaya // Drevnerusskoe gosudarstvo i slavyane. – Minsk, 1983. – S. 122–124.
18. Baglasov, S. G. Istoriko-arhitekturnye issledovaniya i restavraciya Lidskogo zamka / S. G. Baglasov, O. A. Trusov // Voprosy arhitektury Lit. SSR. – Riga, 1983. – S. 36–38.
19. Koledinskij, L. V. Stroitel'naya tekhnika, stroitel'nye materialy srednevekovogo Vitebska / L. V. Koledinskij, M. A. Tkachev // Voprosy arhitektury Lit. SSR. – Riga, 1983. – S. 22–24.
20. Kurkov, I. N. Gorod na meste goroda: istoriya Brestskoj kreposti 20-e–30-e gg. / I. N. Kurkov // Brestchina: legendy, sobytiya, lyudi. – Minsk : Mediafakt, 2005. – S. 207–209.

Материал поступил 24.02.2026, одобрен 03.03.2026, принят к публикации 03.03.2026

УДК 624.046.5

АНАЛИЗ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ С ПОЛНОСВЯЗНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ, ИСПОЛЬЗОВАННЫХ В РАСЧЁТАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОДАВЛИВАНИЮ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТАХ

В. В. Молош[1], А. Е. Желткович[2], К. Г. Пархоц[3], И. Г. Томашев[4]

[1] К. т. н., доцент, доцент кафедры теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: m.vic@rambler.ru

[2] К. т. н., доцент, доцент кафедры теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gelpek@mail.ru

[3] Магистр технических наук, инженер-программист, Брест, Беларусь, e-mail: konstantinparhoc@gmail.com

[4] Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: tomashev@mail.ru

Реферат

В железобетонных плитах при продавливании на небольшой площади, окружающей колонну, возникает сложное напряжённо-деформированное состояние, включающее деформации изгиба, сдвига и кручения, которое приводит к хрупкому разрушению в предельном состоянии. Проведённые к настоящему времени многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, позволили разработать ряд расчётных аналитических моделей сопротивления продавливанию, наиболее точные из которых введены в действующие нормативно-технические документы. Однако они обладают недостаточной точностью и требуют усовершенствования. Интенсивное развитие в последние годы нейросетевых технологий позволило использовать машинное обучение во многих инженерных расчётах, в том числе и в предсказании величины сопротивления продавливанию. В данной работе выдвинута гипотеза цифрового моделирования сопротивления продавливанию с применением нейросетевых технологий, которое позволит сократить количество экспериментальных испытаний реальных образцов плит. Разработаны нейросетевые модели с полносвязной архитектурой, для которых проведено исследование влияния на точность модели количества скрытых слоёв и количества нейронов в скрытом слое. Выполнена проверка влияния количества образцов в тренировочной выборке на точность нейросетевой модели. В качестве оценки точности нейросетевых моделей были использованы общепринятые и достаточно широко использующиеся в современной практике математические статистики: коэффициент корреляции Пирсона (r), коэффициент детерминации (R2), нормализованное по среднему значение среднеквадратичной ошибки CV(RMSE), нормализованное по среднему значение средней абсолютной ошибки CV(MAE), а также средняя ошибка модели (d), полученная по вектору ошибок (δ), и коэффициент вариации (Vd) вектора ошибок δ [41]. В результате проведённых исследований, несмотря на достаточно высокую точность разработанных нейросетевых моделей гипотеза цифрового моделирования была отклонена. Тем не менее, авторы считают, что существует возможность создания нейросетевой модели, обладающей достаточной точностью для использования её в цифровом моделировании.

Ключевые слова: железобетонные плиты, сопротивление продавливанию, нейросетевое моделирование, сложное напряжённо-деформированное состояние, оценка точности нейросетевых моделей, цифровое моделирование.

ANALYSIS OF NEURAL NETWORK MODELS WITH A FULLY CONNECTED ARCHITECTURE USED IN CALCULATIONS OF PUSHING RESISTANCE IN REINFORCED CONCRETE SLABS

V. V. Molosh, A. E. Zheltkovich, K. G. Parchotz, I. G. Tomashev

Abstract

In reinforced concrete slabs, punching shear occurs in a small area surrounding a column, resulting in a complex stress-strain state involving bending, shear, and torsion deformations, leading to brittle failure in the ultimate limit state. Numerous experimental and theoretical studies conducted to date have resulted in the development of a number of analytical computational models for punching shear resistance, the most accurate of which have been incorporated into current regulatory and technical documents. However, these models lack sufficient accuracy and require improvement. The rapid development of neural network technologies in recent years has enabled the use of machine learning in many engineering calculations, including predicting punching shear resistance. This paper proposes a hypothesis for digital modeling of punching resistance using neural network technologies, which will reduce the number of experimental tests of real slab samples. Neural network models with a fully connected architecture have been developed, and the influence of the number of hidden layers and the number of neurons in a hidden layer on model accuracy has been studied. The influence of the number of samples in the training set on the accuracy of the neural network model was tested. Commonly accepted and widely used mathematical statistics in modern practice were used to evaluate the accuracy of the neural network models: Pearson correlation coefficient (r), determination coefficient (R2), mean-normalized root mean square error CV(RMSE), mean-normalized mean absolute error CV(MAE), as well as the average model error (d) obtained from the error vector (δ), and the coefficient of variation (Vd) of the error vector δ [41]. As a result of the conducted research, despite the relatively high accuracy of the developed neural network models, the digital modeling hypothesis was rejected. Nevertheless, the authors believe that it is possible to create a neural network model with sufficient accuracy for use in digital modeling.

Keywords: reinforced concrete slabs, punching resistance, neural network modeling, complex stress-strain state, assessment of the accuracy of neural network models, digital modeling.

Введение

Железобетонные плиты являются одним из наиболее распространенных видов горизонтальных несущих элементов применяемых в конструкциях перекрытий, покрытий и фундаментов жилых и общественных зданий и сооружений, а также широко применяются в конструкции пролётов мостов, в покрытии площадок портов и гидросооружениях [1]. В конструкциях перекрытий и покрытий плоские железобетонные плиты достаточно популярны благодаря возможности снизить высоту этажей, а плоская поверхность, удобная для отделки, и возможность относительно свободной установки колонн позволяют ускорить сроки строительства и применять гибкие архитектурно-планировочные решения [2, 3, 4].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-64-78

Внешне относительно простые перекрытия, в конструкции которых применяют железобетонные плоские плиты, имеют сложное поведение под нагрузкой, особенно в соединении плиты и колонны. При сложном напряжённо-деформированном состоянии с концентрацией напряжений на небольшой площади, окружающей колонну, в бетоне плиты образовывается сеть трещин, которые являются проявлением сложной деформации, включающей изгиб, сдвиг и кручение одновременно в нескольких плоскостях. Гипотеза наличия деформации кручения в описанном сопротивлении требует дополнительного изучения и проверки. При таком виде сложной деформации в предельном состоянии плиты возникает хрупкое разрушение с ограниченными перемещениями и выделением части бетона конической формы (конуса, пирамиды), сопровождающееся внезапным обрушением перекрытия (рисунок 1) [3, 16, 4].

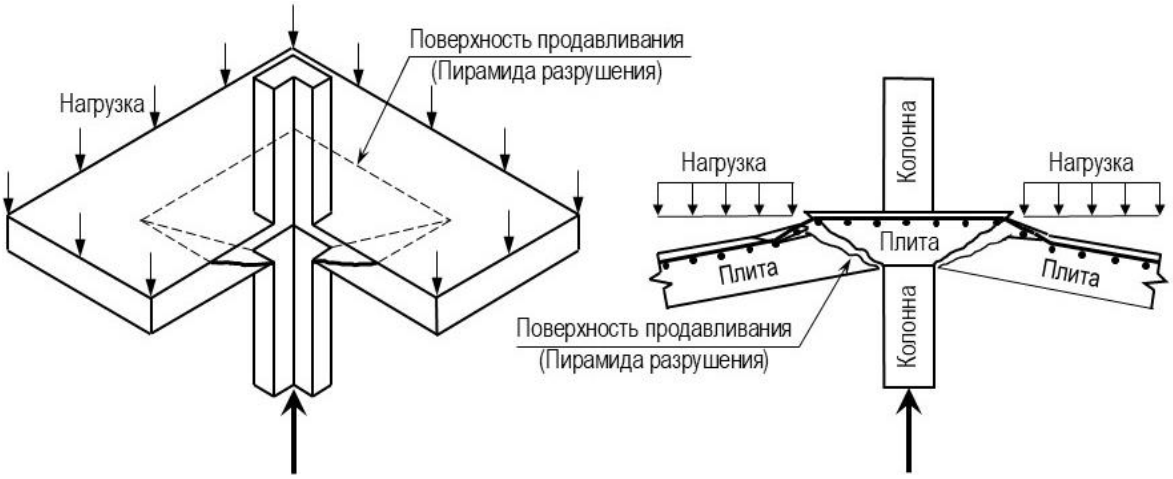


Рисунок 1 – Схема продавливания в железобетонных плоских плитах без поперечного армирования [2]

Вопрос названия данного вида разрушения плит можно считать дискуссионным. В разных источниках его называют продавливанием, срезом при продавливании, местным срезом. Авторы работы предлагают называть его продавливанием – разрушением плиты в предельном состоянии, возникающем как результат сложного сопротивления, включающего деформации изгиба, сдвига и кручения одновременно в нескольких плоскостях, по аналогии со срезом, возникающем в предельном состоянии как результат деформации сдвига.

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, направленные на изучение сопротивления продавливанию, привели к возникновению целого ряда расчётных механических (полуэмпирических) и чисто эмпирических моделей [5, 6, 7, 8, 9, 10, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, 13, 14, 15], предусмотренных для определения предельной величины разрушающей силы. Наиболее точные из них, простые в применении и стабильные были введены в действующие нормативно-технические документы. Однако, по мнению некоторых авторов [25, 24] и по результатам собственных исследований авторов данной работы [4] вышеупомянутые механические или эмпирические модели не достаточно точно предсказывают величину сопротивления продавливанию. По этой причине явление сопротивления продавливанию по-прежнему остаётся исследуемым. С другой стороны, по-прежнему существует необходимость в создании точной расчётной модели.

Развитие нейросетевых технологий, которые получают в последние годы всё большее применение во всех отраслях техники, позволило использовать алгоритмы, в основе которых лежат методы обработки данных [1, 17]. Машинное обучение (machine learning – ML), относящееся к таким алгоритмам, привлекло внимание значительного количества исследователей. Существует множество успешных примеров его применения во многих инженерных областях [1, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, 19, 20, 21, 22, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34].

В области проектирования конструкций в 2019 году A. N. D. Hoang [23] на основе машинного обучения разработал альтернативный метод оценки сопротивления продавливанию плоских плит из сталефибробетона (SFRC). Он использовал кусочно-множественную линейную регрессию (PMLR) и искусственную нейронную сеть (ИНС, ANN – англ.) для построения аппроксимирующих моделей, предсказывающих величину сопротивления продавливанию плоских плит из сталефибробетона, отображающих взаимосвязь между величиной сопротивления и влияющими на нее факторами.

H. D. Nguyen и др. [24] в 2021 году создали модель сопротивления продавливанию с использованием экстремального градиентного повышения (XGBoost), эффективность которой была подтверждена эмпирическими исследованиями и двумя другими моделями на основе машинного обучения – искусственной нейронной сетью (ANN) и методом случайного леса (RF).

S. Mangalathu и др. [25] в 2021 году для прогнозирования сопротивления продавливанию плоских плит без поперечной арматуры также построили модели XGBoost и использовали аддитивный метод Шепли (SHAP) для иллюстрации процесса прогнозирования XGBoost.

В 2022 Y. X. Shen и др. [1] провели масштабные исследования моделей ML при прогнозировании сопротивления продавливанию бетонных плит, армированных легким, высокопрочным и устойчивым к коррозии волокнистым полимером (FRP). Используя базу данных из 121 образца, полученную из литературных источников, авторы исследовали несколько алгоритмов машинного обучения – искусственную нейронную сеть (ANN), механизм опорных векторов [Support vector machine (SVM)], дерево принятия решений [Decision tree (DT)] и адаптивный бустинг (AdaBoost). В качестве сравнения авторы работы приводят результаты расчётов сопротивления по шести моделям – эмпирическим и из действующих нормативных документов. Точность предложенной моделей ML была лучше сравниваемых с ней эмпирических моделей.

G. T. Truong и др. [26] в 2022 году применили модель ML в исследовании сопротивления продавливанию плит, армированных стеклопластиковой и стальной арматурой.

Некоторые исследователи [1, 27, 28] используют машинное обучение для прогнозирования сложного поведения композитных материалов и конструкций на молекулярном уровне, таких как композиты, армированные углеродными нанотрубками, а также нековалентно или ковалентно связанные молекулярные системы, и достигают в этом успеха.

Целью работы было создание нейросетевой модели, предназначенной для определения сопротивления продавливанию плоских железобетонных плит без поперечной арматуры, установить архитектуру нейросети сети, дающую наиболее оптимальный результат с точки зрения скорости обучения, точности предсказания результата (ошибки моделирования) и её общей простоты, подтвердить гипотезу цифрового моделирования, основанную на использовании нейросетевых технологий в получении величины сопротивления продавливанию при изменении входных базовых параметров, что позволит значительно сократить количество экспериментальных испытаний реальных образцов плит.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-64-78

Методы и материалы

Выбор и обоснование вида архитектуры нейронной сети

Классификация нейронных сетей, разработанных к настоящему времени, достаточно обширна. Персептрон с одним скрытым слоем является универсальным аппроксиматором, т. е. он способен с любой степенью точности аппроксимировать любую непрерывную функцию, если в качестве функции активации нейронных элементов скрытого слоя используется непрерывная, монотонно возрастающая, ограниченная функция [35]. Многослойный персептрон может быть использован для решения задач классификации образов, прогнозирования и управления. Для обработки динамических данных, временных образов, решения задач прогнозирования, идентификации систем, распознавания речи, обработки естественного языка и управления могут использоваться рекуррентные сети [35]. Свёрточные нейронные сети (convolutional neural networks, CNN), являющиеся дальнейшим развитием многослойного персептрона, широко используются для обработки изображений, и, в отличие от многослойного персептрона, позволяют учитывать топологию изображений и сохраняют предсказательные свойства при сдвигах, масштабировании и других искажениях входного образа [35]. Известны также многие другие типы нейронных сетей.

Учитывая, что задача предсказания сопротивления продавливанию является задачей регрессии, было принято решение в качестве нейронной сети использовать персептрон с одним и более промежуточными слоями.

Алгоритм работы нейронной сети и её обучение

Принято считать, что человеческий мозг содержит триллионы клеток, из которых 100 млрд представлены соединенными в сети совместно работающих нейронов [35, 36]. Нейроны, обладающие электрической активностью, получают информацию (рисунок 2а) при помощи сильно разветвленных отростков (дендритов), и вдоль тонкого волокна (аксона) передают её другим нейронам посредством множества ответвлений на конце через синапсы. Каждый нейрон может иметь тысячи связей с соседними нейронами [35].

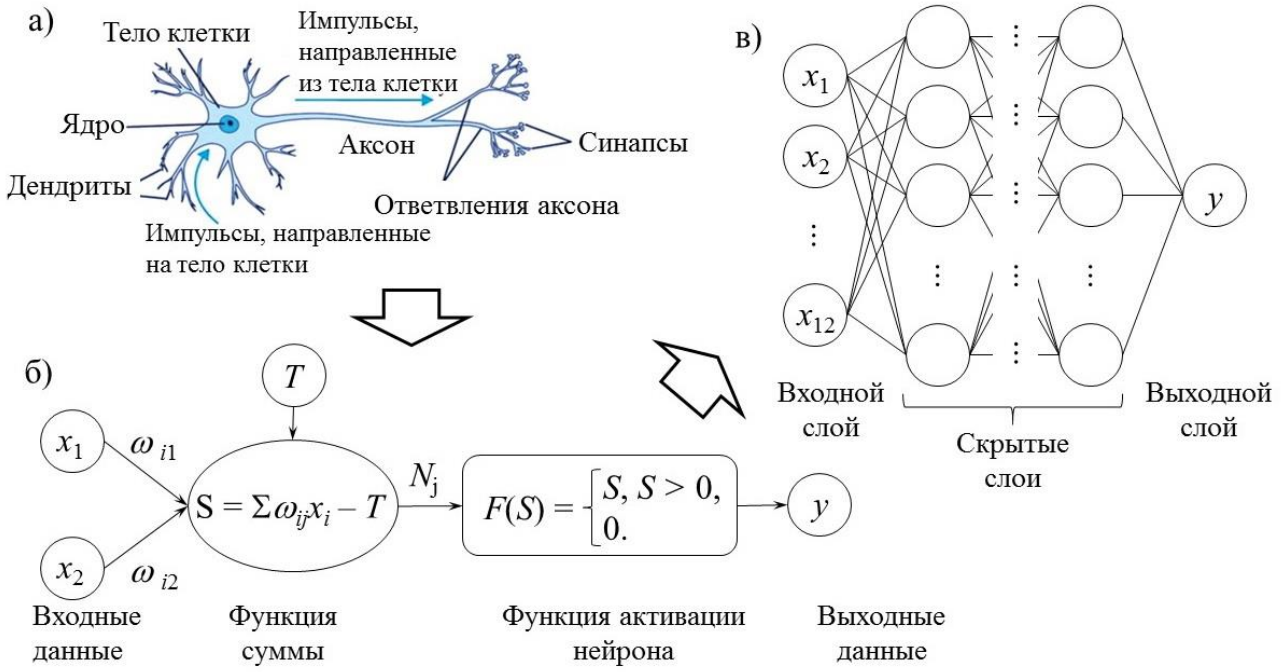
Основным элементом искусственной нейронной сети (ИНС) является искусственный нейрон (рисунок 2б), который выполняет операцию нелинейного преобразования суммы произведений входных сигналов x_i на весовые коэффициенты ω_{ij} (взвешенное суммирование) с добавлением порога нейронного элемента T, характеризующего расположение функции активации по оси абсцисс [35, 36]. Весовой коэффициент ω_{ij} представлен действительным числом, на которое будет умножено значение входящего в нейрон сигнала и показывает, насколько сильно между собой связаны те или иные нейроны – это коэффициент связи между ними. Взвешенная сумма S рассчитывается по формуле (1)

$$S = \sum \omega_{ij} x_i - T \,. \tag{1}$$

В процессе обучения входные данные – сигналы, поступающие к нейрону данного слоя – передаются с помощью весовых коэффициентов как взвешенная сумма с добавлением порога от всех нейронов предыдущего слоя.

Для активации нейрона, учитывая условие тормозящей или усиливающей синаптической связи, использовали ректификационную функцию (*ReLU*) вида

$$F(S) = \begin{cases} S, S > 0, \\ 0. \end{cases} \tag{2}$$



а) принципиальная схема биологического нейрона [36]; б) структура персептрона, имитирующая один биологический нейрон [35, 36]; в) общая принципиальная схема персептрона с несколькими скрытыми слоями, используемая в данном исследовании

Рисунок 2 – Аналогия в структуре живого и искусственного нейронов

Такие вычисления выполняются для каждого из нейронов скрытых и выходного слоёв. В результате в выходном слое получается некоторое значение искомой величины *Y*. Вычисленное (предсказанное) значение *Y* сравнивается с действительным эталонным значением, которым в рассматриваемой задаче выступает сопротивление продавливанию $V_{u,exp}$, полученное при экспериментальном исследовании фактических образцов железобетонных плит. Процесс обучения нейронной сети заключается в изменении весовых коэффициентов, т. е. коэффициентов связи между имеющимися в ней нейронами. В процессе обучения весовые коэффициенты меняются, и, если они положительные, то идет усиление сигнала в нейроне, к которому он приходит. Если весовой коэффициент нулевой, то влияние одного нейрона на другой отсутствует. Если же весовой коэффициент отрицательный, то идет погашение сигнала в принимающем нейроне.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-64-78

Общая схема персептрона с несколькими скрытыми слоями, применённая при определении сопротивления срезу при продавливании железобетонных монолитных плит, приведена на рисунке 2в. Входной слой включал двенадцать нейронов, представляющих собой количественное (числовое) или качественное (описание формы) отображение основных параметров, влияющих на величину сопротивления срезу при продавливании: X_1 – форма колонны в плане (круг, квадрат, прямоугольник; *F_kol*); X_2 – размер одной из сторон экспериментальной железобетонной плиты (*a*, м); X_3 – размер второй стороны экспериментальной железобетонной плиты (*b*, м); X_4 – высота экспериментальной железобетонной плиты (*h*, м); X_5 – радиус круглой колонны (*r*, м) или размер одной из сторон колонны квадратной или прямоугольной формы ($a_к$, м); X_6 – размер второй стороны колонны квадратной или прямоугольной формы ($b_к$, м); X_7 – рабочая эффективная высота плиты (*d*, м); X_8 – средняя прочность бетона плиты на осевое сжатие (f_{cm}, МПа); X_9 – средний модуль упругости бетона плиты (E_{cm}, МПа); X_{10} – коэффициент продольного армирования плиты (ρ, в долях); X_{11} – средняя прочность арматуры на осевое растяжение (f_s, МПа); X_{12} – средний модуль упругости арматуры (E_s, МПа).

В выходном слое, как было отмечено ранее, был только один нейрон *Y*, отображающий информацию об определяемой предельной величине сопротивления продавливанию $V_{u,exp}$ (МН).

Перед запуском процедуры машинного обучения данные входных переменных были предварительно обработаны – нормализованы. Нормализация данных является ключевым этапом обучения нейронных сетей так как может значительно повысить эффективность обучения за счёт устранения разницы между численной величиной данных и их размерностью. В данной работе была применена нормализация по среднему (Z-нормализация), которая вычисляется по выражению

$$z = (x - \mu) / \sigma, \quad (3)$$

где z – нормализованное значение исходного значения *x*; μ и σ – математическое ожидание (среднее) и стандартное отклонение для выборки данных, соответственно.

Обучение полносвязной нейронной сети происходит методом обратного распространения ошибки (англ. backpropagation), суть которого заключается в обновлении весов нейронной сети, при котором распространение сигналов ошибки происходит от выхода сети к её входам, в направлении, обратном прямому распространению сигналов в обычном режиме работы.

В работе [35] отмечено, что алгоритм обратного распространения ошибки (backpropagation algorithm) для последовательного обучения является эффективным средством обучения нейронных сетей и приводится его следующая последовательность проведения.

1. Задается шаг обучения α ($0 < \alpha < 1$) и желаемая среднеквадратичная ошибка нейронной сети E_e.

2. Случайным образом инициализируются весовые коэффициенты и пороговые значения нейронной сети в достаточно узком диапазоне значений, например [–0,1; 0,1].

3. Последовательно подаются входные образы из обучающей выборки $k = 1,L$ (где *L* – размерность обучающей выборки) на вход нейронной сети и для каждого входного образа выполняются следующие действия:

а) производится фаза прямого распространения входного образа по нейронной сети и вычисляется выходная активность всех нейронных элементов сети

$$y_j = F\left(\sum_j \omega_{ij} y_i - T_j\right), \quad (3)$$

где индекс *j* характеризует нейроны следующего слоя по отношению к текущему слою *i*; в качестве активации нейрона использовали функцию *ReLu* (2);

б) производится фаза обратного распространения сигнала, в результате которой определяется ошибка γ_j, $j = 1, 2, ...$, нейронных элементов для всех слоев сети; при этом для выходного и скрытого слоев, соответственно,

$$\gamma_j = y_j - e_j, \quad (4)$$

$$\gamma_j = \sum_i \gamma_i F'(S_i)\omega_{ji}, \quad (5)$$

в последнем выражении индекс *i* характеризует нейронные элементы следующего слоя по отношению к слою *j*; y_j, e_j – выходное и эталонное значение нейронной сети, соответственно;

В выражении (5) ошибка скрытого слоя γ_j может быть вычислена по формуле

$$\gamma_j = \frac{\partial E}{\partial y_j} = \sum_i \frac{\partial E}{\partial y_i}\frac{\partial y_i}{\partial S_i}\frac{\partial S_i}{\partial y_j},$$

где

$$\frac{\partial E}{\partial y_i} = \gamma_i, \ \frac{\partial y_i}{\partial S_i} = F'(S_i), \ \frac{\partial S_i}{\partial y_j} = \omega_{ji};$$

в) для каждого слоя нейронной сети происходит изменение весовых коэффициентов и порогов нейронных элементов в соответствии с обобщенным дельта-правилом:

$$\omega_{ij}(t+1) = \omega_{ij}(t) - \alpha\gamma_j F'(S_j) y_i, \quad (6)$$

$$T_j(t+1) = T_j(t) + \alpha\gamma_j F'(S_j), \quad (7)$$

где *t* – временной интервал.

4. Последовательно подаются входные образы из обучающей выборки $k = 1,L$ и вычисляется среднеквадратичная ошибка нейронной сети

$$E_s = \frac{1}{n}\sum_j \left(y_j^k - e_j^k\right)^2. \quad (8)$$

5. Если $E_s > E_e$ то происходит переход к шагу 3 алгоритма. В противном случае алгоритм обратного распространения ошибки заканчивается.

Таким образом, данный алгоритм функционирует до тех пор, пока суммарная квадратичная ошибка сети не станет меньше заданной, т. е.

$$E_s \le E_e \quad (9)$$

Существует также другой критерий остановки алгоритма: алгоритм продолжается до тех пор, пока не перестанут изменяться синаптические связи или значения суммарной квадратичной ошибки сети. В этом случае модификация синаптических связей сети происходит после подачи группы образов на нейронную сеть.

Нейронная сеть была реализована с помощью открытой программной библиотеки для машинного обучения TensorFlow, разработанной компанией Google для решения задач построения и обучения нейронных сетей.

База экспериментальных данных, использованная для обучения нейронной сети

Для наилучшего и точного обучения нейронной сети с целью построения моделей ML необходимо использовать достаточно большой объём точных данных. Наиболее ценными для этой задачи являются данные, полученные в результате экспериментальных исследований. Для обучения нейронной сети была сформирована база экспериментальных данных, взятых из доступных литературных источников, которая включала сведения о 248 экспериментальных образцах плит, испытанных зарубежными и отечественными авторами. В обучающую базу данных вошли сведения о геометрических параметрах, физико-механических характеристиках материалов, о величине предельного сопротивления продавливанию каждого экспериментального образца. Геометрические параметры и физико-механические характеристики материалов представляют собой данные входного слоя нейронной сети – двенадцать нейронов, обозначенные X_1, X_2, …, X_{12} (см. раздел 2.2), границы изменения которых – минимальное, среднее и максимальное значения –приведены в таблице 1.

Целью прогнозирования нейросетевой модели являлась предельная величина равнодействующей поперечных сил ($V_{u,exp}$), полученной экспериментально, при достижении которой происходит продавливание железобетонной плиты.

Гистограммы, представленные на рисунке 3, показывают относительные распределения частот (долю появлений каждого значения в наборе данных относительно общего числа наблюдений) входных переменных (рисунок 3 а, …, 3 и) и выходных данных (рисунок 3 к).

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-64-78

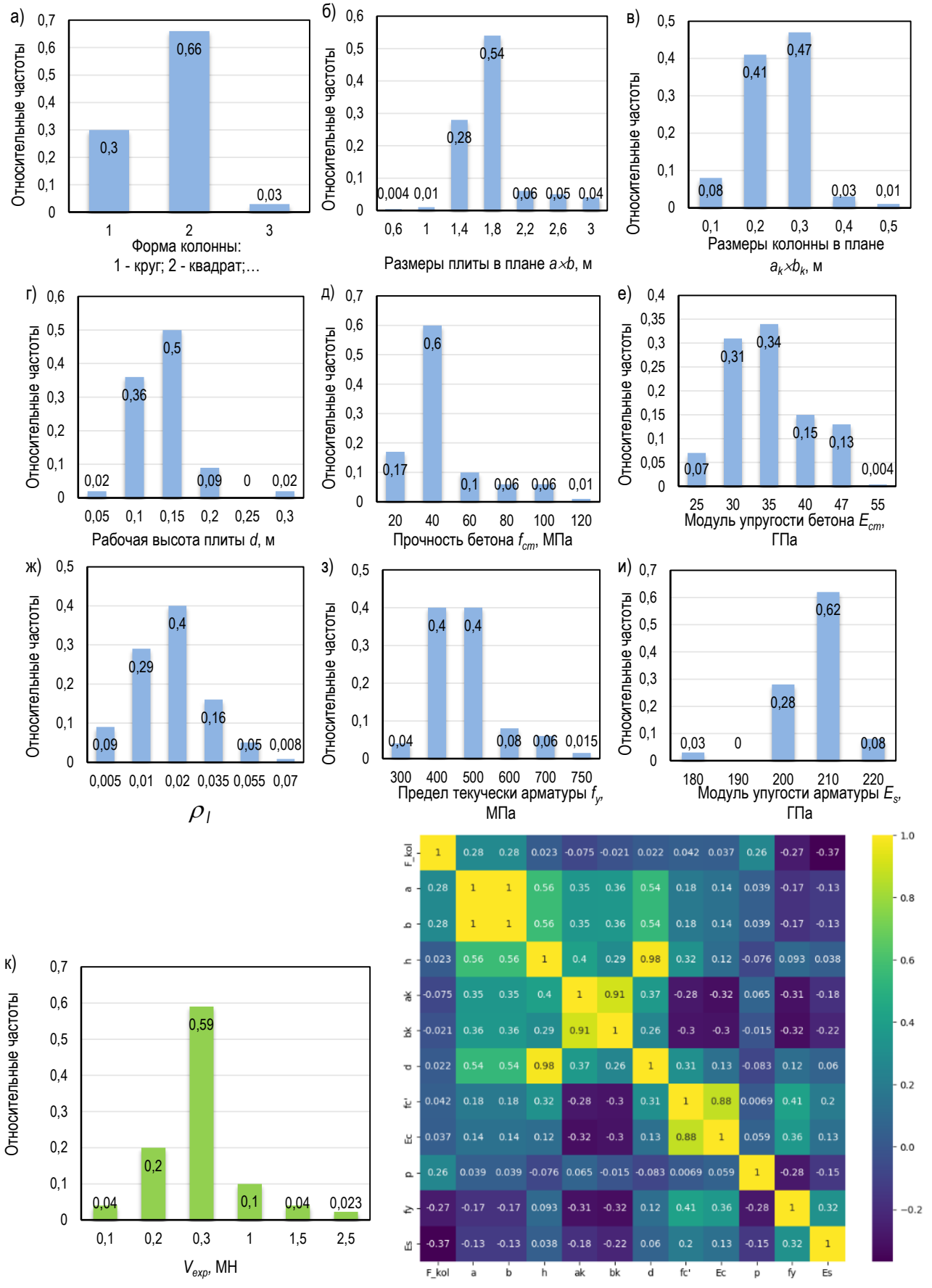


Рисунок 3 – Гистограммы относительных частотных распределений входных переменных и выходных данных (а-к), матрица коэффициентов корреляции входных переменных (л)

В некоторых зарубежных источниках [3, 36, 37] для оценки взаимосвязи (корреляции) между входными переменными, выраженной количественно, опираясь на результаты работы [38], авторы определяют степень линейной корреляции, которую представляют в виде матрицы коэффициентов линейной корреляции Пирсона. Подобная матрица для собранной в данном исследовании базы данных приведена на рисунке 3 л. Коэффициенты, близкие к –1 или 1, представляют собой очевидную отрицательную или положительную линейную корреляцию. Наиболее значимая степень линейной корреляции отмечена между размерами плиты в плане и её фактической и рабочей высотой, между размерами плиты в плане и размерами колонны в плане. В остальных случаях корреляция незначительна.

Таблица 1 – Границы изменения величин входных переменных

№	Параметр	Единицы измерения	Миним.	Среднее	Максим.	Стандарт. отклонение
1.	X_1 (форма колонны)	–	–	–	–	–
2.	X_2 (a)	м	0,6	1,673	3	0,425
3.	X_2 (b)	м	0,6	1,673	3	0,425
4.	X_4 (h)	м	0,036	0,141	0,32	0,048
5.	X_5 (a_k)	м	0,025	0,202	0,5	0,07
6.	X_6 (b_k)	м	0,025	0,208	0,5	0,076
7.	X_7 (d)	м	0,02	0,114	0,275	0,042
8.	X_8 (f_{cm})	МПа	9,1	34,844	118,7	20,781
9.	X_9 (E_{cm})	МПа	21200	32451,1	51800	5903,43
10.	X_{10} (ρ_l)	безразм.	0,001	0,015	0,069	0,01
11.	X_{11} (f_y)	МПа	255	441,54	720	96,454
12.	X_{12} (E_s)	МПа	171680	206303	214000	7270,96
13.	$V_{u,exp}$	МН	0,016	0,392	2,45	0,351

Оценка точности расчётных нейросетевых моделей

В задачи оценки точности нейросетевых моделей входило определение стабильности процесса обучения, устранение возможности переобучения и сравнение совпадения заданных и предсказанных значений сопротивлений.

Анализ изменения ошибок тренировочной (обозначено «*tr*») и валидационной (обозначено «*val*») выборок позволил оценить стабильность процесса обучения и отсутствие переобучения.

Средствами оценивания достоверности изучаемых нейросетевых моделей, иначе говоря средствами сравнения совпадений заданных и предсказанных значений сопротивлений, были выбраны общепринятые и достаточно широко использующиеся в современной практике математические статистики: коэффициент корреляции Пирсона (r), коэффициента детерминации (R^2), нормализованное по среднему значение среднеквадратичной ошибки *CV*(*RMSE*), нормализованное по среднему значение средней абсолютной ошибки *CV*(*MAE*). Кроме этого для предсказанных и тренировочных значений сопротивлений продавливанию были определены величина поправочного коэффициента b, характеризующая насколько среднее предсказанное значение отклоняется от заданного, а также значения средней ошибки моделей (d), полученные по вектору ошибок (δ), и коэффициент вариации (*Vd*) вектора ошибок δ, рассчитанные в соответствии с положениями, приведенной в приложении Д СН 2.01.01 [41].

Авторы работы [42] предлагают следующим образом интерпретировать величину коэффициента линейной корреляции Пирсона: при r = 0,9–1 – очень высокая положительная корреляция, r = 0,7–0,9 – высокая положительная корреляция, r = 0,5–0,7 – умеренная, r = 0,3–0,5 – низкая, r = 0–0,3 – информационный шум. Так как для моделей парной линейной регрессии коэффициент детерминации равен квадрату обычного коэффициента корреляции между предсказанными и фактическими значениями, то величина коэффициента детерминации R^2 соответственно составит: очень высокую зависимость предсказанной величины сопротивления от множества фактических величин при R^2 = 0,81–1; высокую – при R^2 = 0,49–0,81; умеренную – при R^2 = 0,25–0,49; низкую – при R^2 = 0,09–0,25; отсутствие всяческой зависимости при R^2 < 0,09. Для коэффициента вариации, а в данной работе речь идёт о коэффициенте вариации вектора ошибок (*Vd*) и нормализованных по среднему значений среднеквадратичной *CV*(*RMSE*) и средней абсолютной *CV*(*MAE*) ошибок, в [43] предлагаются следующие границы: при *Vd* < 10 % плотность распределения отличная, *Vd* = 10–20 % – хорошая, *Vd* = 20–30 % – удовлетворительная, *Vd* > 30 % – низкая.

Результаты и обсуждение

Построение оптимальной модели нейронной сети

В литературе существует несколько правил выбора оптимального количества скрытых нейронов в ИНС. Однако большинство областей исследований в области прогнозирования носят эвристический характер, и не существует общепринятой теории, позволяющей определить, сколько скрытых слоёв нейронов необходимо для аппроксимации любой заданной функции. Поэтому наиболее универсальным подходом принято считать экспериментальное определение количества промежуточных слоёв и количества нейронов в слое, дающее наилучшее предсказание для конкретной задачи и выборки данных.

В данной работе с целью определения оптимального количества скрытых слоёв и нейронов в каждом из них были выполнены расчёты и анализ результатов, полученных посредством достаточно большого числа нейросетевых моделей, в которых количество промежуточных слоёв варьировалось от 1 до 39 с шагом 3, а количество нейронов в слое – от 6 до 45 также с шагом 3. Имеющаяся база экспериментальных данных, характеристики которой приведены выше, была разделена на две части: 200 образцов были использованы в обучении нейросетевых моделей; 48 оставшихся образцов из базы данных составили тестовую выборку. Обучающая выборка включала 70 % (135 шт.) образцов, предназначенных непосредственно для обучения и 30 % (65 шт.) для валидации нейросетевой модели.

Опираясь на результаты изменения величины среднеквадратичной ошибки тренировочной и валидационной выборок, можно отметить, что обучение нейросетевых моделей было относительно стабильным в моделях с количеством промежуточных слоёв от 1 до 9 и количеством нейронов в слое от 6 до 21. Кривые изменения среднеквадратичной ошибки обучающей и валидационной выборок, приведенные на рисунке 4, для моделей с тремя промежуточными слоями более гладкие, чем для моделей с 9 и 39 промежуточными слоями, что свидетельствует о большей стабильности обучения нейросетевых моделей в первом случае. Аналогичное влияние на стабильность обучения оказывает увеличение нейронов в промежуточном слое. Если для нейросетевых моделей с шестью нейронами в промежуточном слое кривые изменения среднеквадратичной ошибки обучающей и валидационной выборок гладкие, то в слоях, имеющих 24 и 45 нейронов, наблюдаются резкие перепады значений ошибки. Переобучения нейросетевых моделей практически не происходило, так как увеличения среднеквадратичной ошибки валидационной выборки после некоторого количества эпох обучения не наблюдалось (рисунок 4).

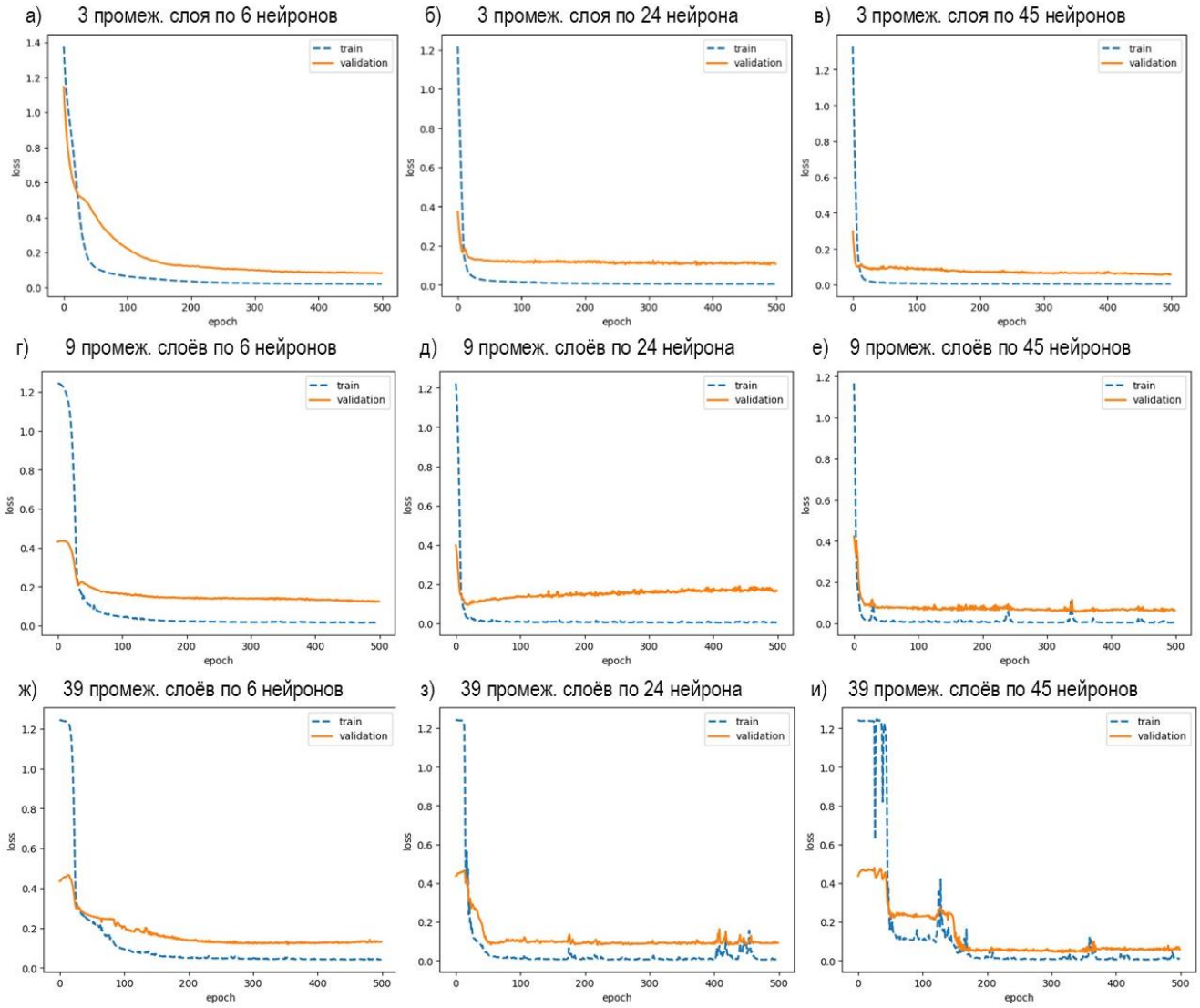


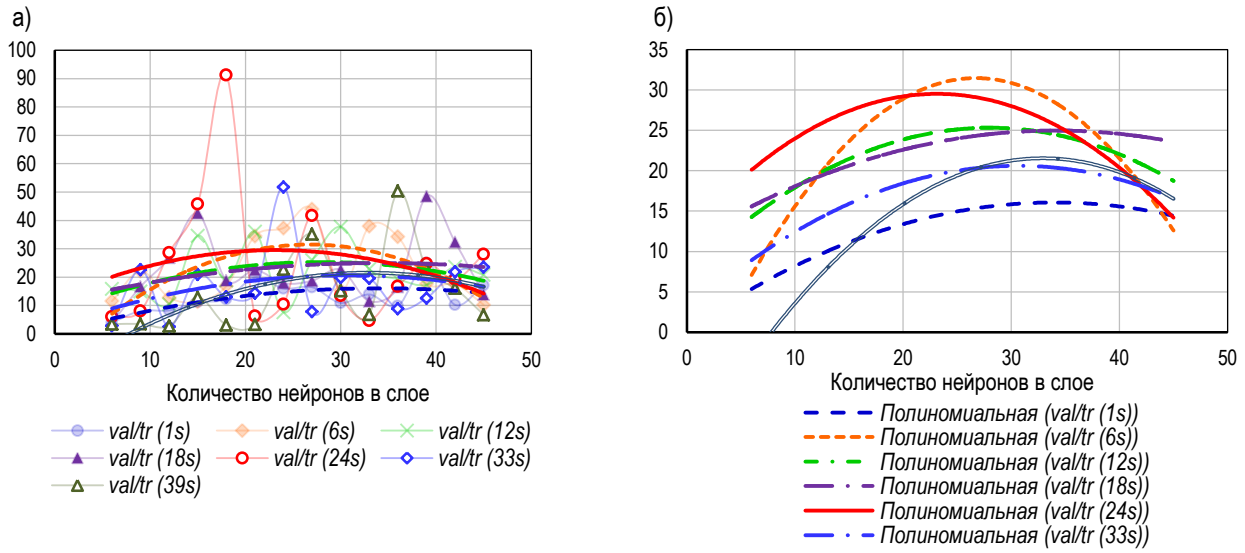
Рисунок 4 – Изменение среднеквадратичной ошибки при обучении нейросетевых моделей

Если судить по результатам изменения среднеквадратичной ошибки нейросетевых моделей (рисунки 5–7), можно отметить, что их обучение было весьма посредственным. Величина среднеквадратичной ошибки моделей, полученной по валидационной выборке, была в среднем в 20 раз больше среднеквадратичной ошибки, полученной по тренировочной выборке (рисунки 5–7). При этом максимальное отличие среднеквадратичных ошибок, полученных по валидационной и тренировочной выборкам, отмечено для нейросетевых моделей с 24–30 нейронами в промежуточном слое, имеющих 6 и 24 промежуточных слоя (рисунки 6, 7). Практически во всех моделях при увеличении количества нейронов в промежуточном слое больше 30, усреднённое отношение между среднеквадратичными ошибками по валидационной и тренировочной выборкам снижалось. Наименьшее значение расхождений среднеквадратичной ошибки по валидационной и тренировочной выборкам было получено в моделях, имеющих 15, 24 и 33 промежуточных слоя по 24–42 нейрона в каждом слое (рисунок 6). При увеличении количества нейронов в промежуточном слое в моделях с любым количеством промежуточных слоёв отношение среднеквадратичных ошибок, полученных по валидационной и тренировочной выборкам, в среднем снижалось. Здесь идёт речь о средней тенденции в изменении, но не о фактическом изменении, так как в большинстве случаев изменения ошибок имели весьма случайный характер, что подтверждают графики на рисунках 6–7, отображающие скачкообразное изменение среднеквадратичной ошибки. Таким образом, анализируя изменение среднеквадратичной ошибки, или какой-либо другой математической статистики (r, R^2, *MAE*, *RMSE*, Δ, *Vd*), что будет показано ниже, целесообразнее говорить о некоторой средней тенденции в изменении, а не о действительном изменении влияния изучаемой статистики. Случайный характер изменения среднеквадратичных ошибок также подтверждает результаты нескольких повторных обучений нейросетевых моделей с одинаковыми исходными данными (рисунок 7).

При увеличении количества нейронов в слое в большинстве расчётных моделей в среднем наблюдалось положительное изменение математических статистик (r, R^2, *MAE*, *RMSE*, Δ, *Vd*): величина коэффициента корреляции Пирсона и коэффициента детерминации увеличивалась и приближалась к единице (рисунок 8), средняя абсолютная ошибка и стандартное отклонение уменьшались (рисунок 9), ошибка модели, коэффициент вариации вектора ошибок, а также случайный разброс результирующих значений всех перечисленных статистик, отмеченный на графиках рисунков 8–10 скачкообразными кривыми линиями в окрестности линии тренда, уменьшались.

В большинстве исследуемых моделей, имеющих 25–30 нейронов в промежуточном слое, при любом количестве промежуточных слоёв в среднем наблюдалось достижение наилучшей величины математических статистик. В моделях с 30 и более нейронами в промежуточном слое улучшение математических статистик в среднем либо было менее значимым, либо не происходило, либо происходило их незначительное ухудшение. Следует отметить, что в исключительных случаях некоторые модели имели наилучшую величину математических статистик при 39 или 42 нейронах в промежуточном слое (рисунки 8–10).

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-64-78



а) плотность распределения и линии тренда отношений; б) линии тренда отношений

Рисунок 5 – Изменение отношений среднеквадратичной ошибки валидационной выборки (*val*) к среднеквадратичной ошибке тренировочной (*tr*) выборки

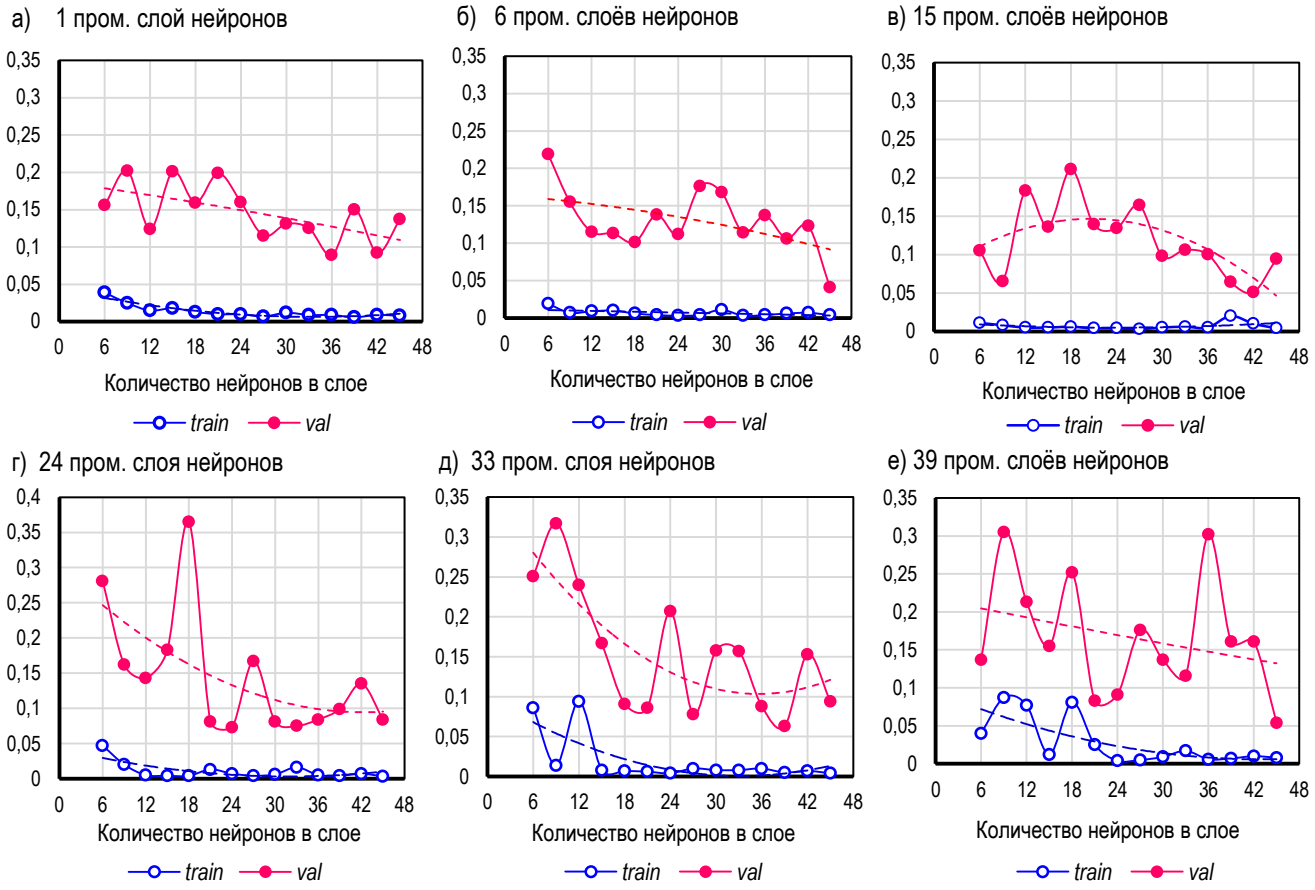


Рисунок 6 – Изменение среднеквадратичной ошибки (*MSE*) тренировочной (*train*) и валидационной (*val*) выборок в зависимости от количества нейронов в слое

На изменение средней ошибки модели (*d*) и коэффициента вариации вектора ошибок (*Vd*) увеличение количества нейронов в слое влияло менее значимо. В моделях с одним промежуточным слоем нейронов увеличение количества нейронов вело к увеличению средней ошибки (*d*) и коэффициента вариации вектора ошибок (*Vd*) (рисунок 11). В моделях с тремя и шестью промежуточными слоями *d* и *Vd* изменялись малозначимо, а в моделях с девятью и более промежуточными слоями увеличение количества нейронов в слое вело к снижению ошибки модели в среднем на 25 %, а коэффициента вариации вектора ошибок на 37,5 %. Следует отметить, что коэффициент вариации вектора ошибок рассчитан не для фактических значений сопротивления продавливанию, а для отношений предсказанных значений к обучающим и поэтому является более чувствительной величиной к размаху значений ошибок.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-64-78

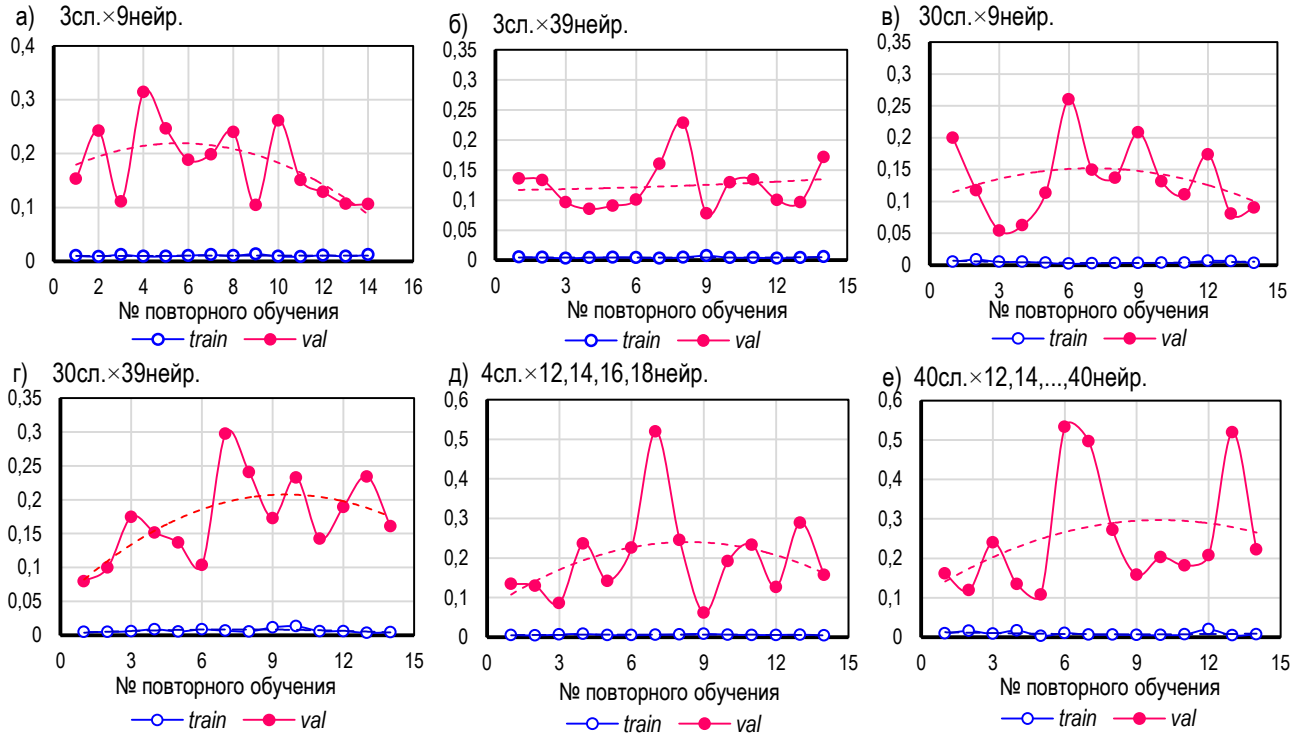


Рисунок 7 – Изменение среднеквадратичной ошибки (*MSE*) тренировочной (*train*) и валидационной (*val*) при нескольких повторных обучениях модели

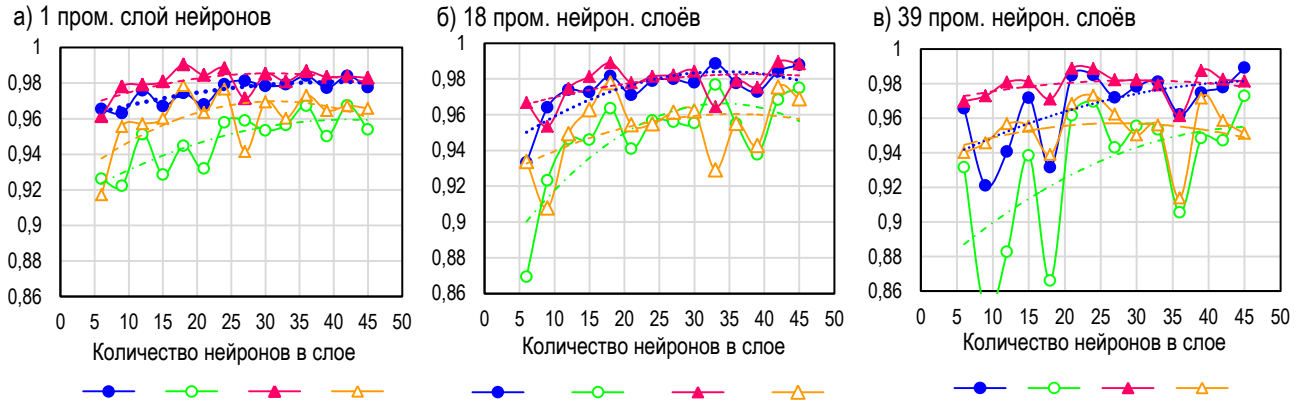


Рисунок 8 – Изменение коэффициента корреляции Пирсона (*r*) и коэффициента детерминации (*R2*) в зависимости от количества нейронов в слое

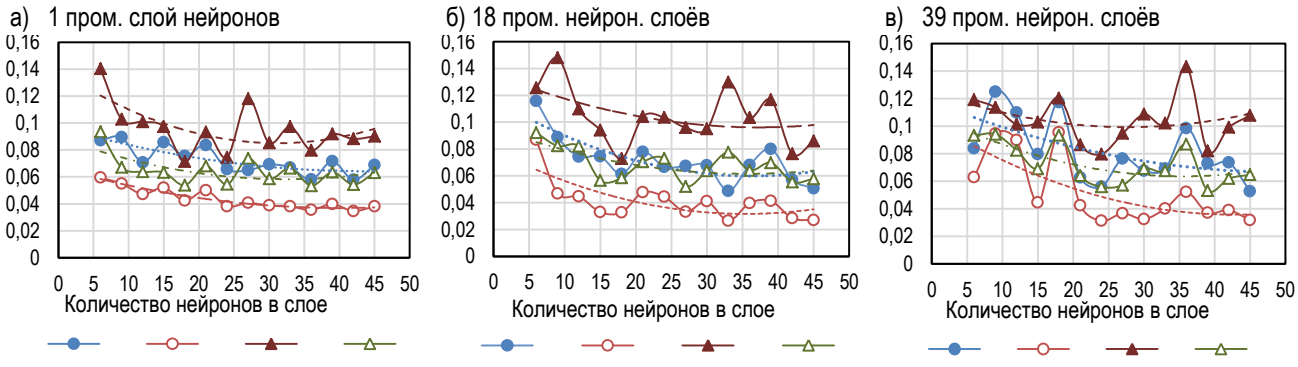


Рисунок 9 – Изменение средней абсолютной ошибки (*MAE*) и стандартного отклонения (*RMSE*) в зависимости от количества нейронов в слое

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-64-78

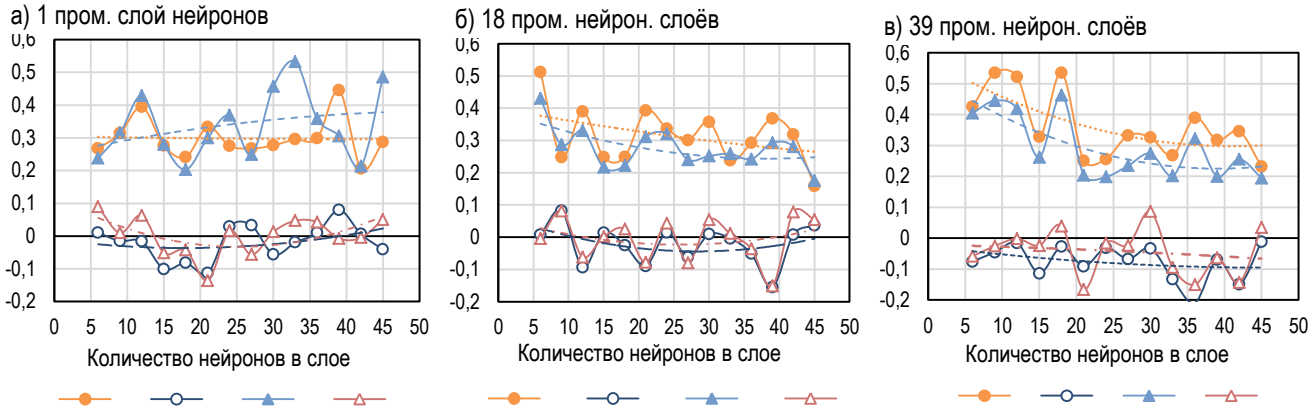


Рисунок 10 – Изменение ошибки модели (*d*) и коэффициента вариации вектора ошибок (*Vd*) в зависимости от количества нейронов в слое

При увеличении количества промежуточных слоёв величина коэффициента корреляции и коэффициента детерминации уменьшалась в среднем до 5 % (рисунок 11). В моделях с количеством нейронов в промежуточном слое до 20 для тренировочной выборки величина средней абсолютной ошибки увеличивалась до 60 %, величина стандартного отклонения увеличилась до 31 %, ошибки модели *d* – в 1,4 раза, коэффициента вариации вектора ошибок – до 40 %, а для тестовой выборки увеличение приведенных параметров соответственно составило до 33 %, до 28 %, в 1,5 раза, до 37 %. В моделях с количеством нейронов в промежуточном слое от 20 до 30 величина *MAE, RMSE, d, Vd* колебались в среднем в пределах ±7 % (рисунок 12). В моделях с количеством промежуточных слоёв 33 и больше величина *MAE, RMSE, d, Vd* в среднем увеличивалась для тренировочной выборки соответственно до 29 %, до 34 %, в 1,5 раза, до 24 %, а для тестовой выборки – до 11 %, до 27 %, в 1,5 раза, в 1,5 раза. Случайный разброс результирующих значений всех перечисленных статистик, отмеченный на графиках рисунков 11, 12, 13 скачкообразными кривыми линиями, увеличивался в 45–50 % моделей, уменьшался в 15–20 % моделей, в остальных моделях сложно дать оценку изменения этой характеристики.

Для большинства нейросетевых моделей результаты расчётов по тестовой выборке были лучше, чем по тренировочной.

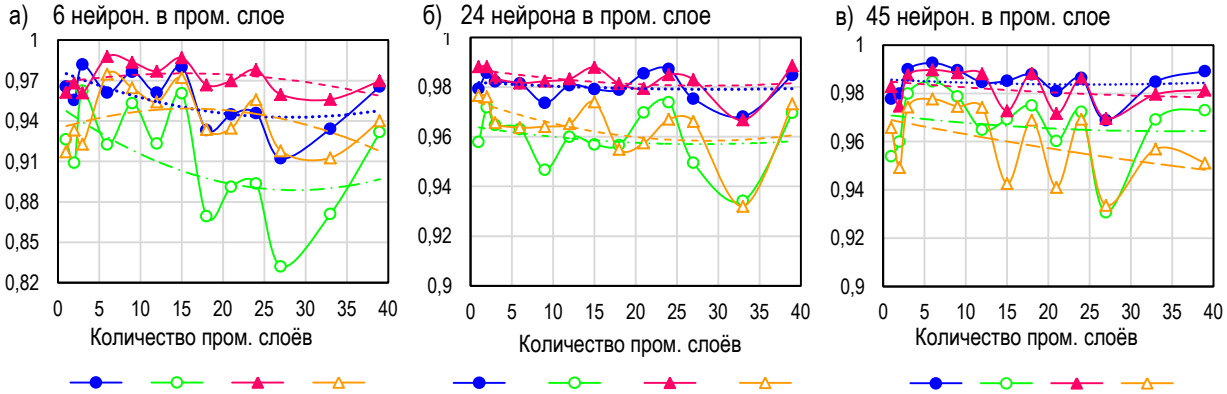


Рисунок 11 – Изменение коэффициента корреляции Пирсона (*r*) и коэффициента детерминации (R^2) в зависимости от количества промежуточных слоёв

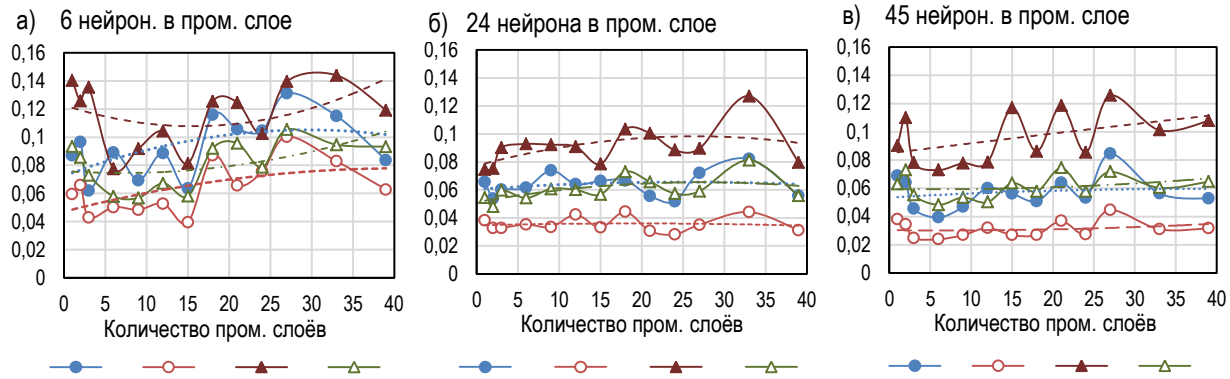


Рисунок 12 – Изменение средней абсолютной ошибки (*MAE*) и стандартного отклонения (*RMSE*) в зависимости от количества промежуточных слоёв

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-64-78

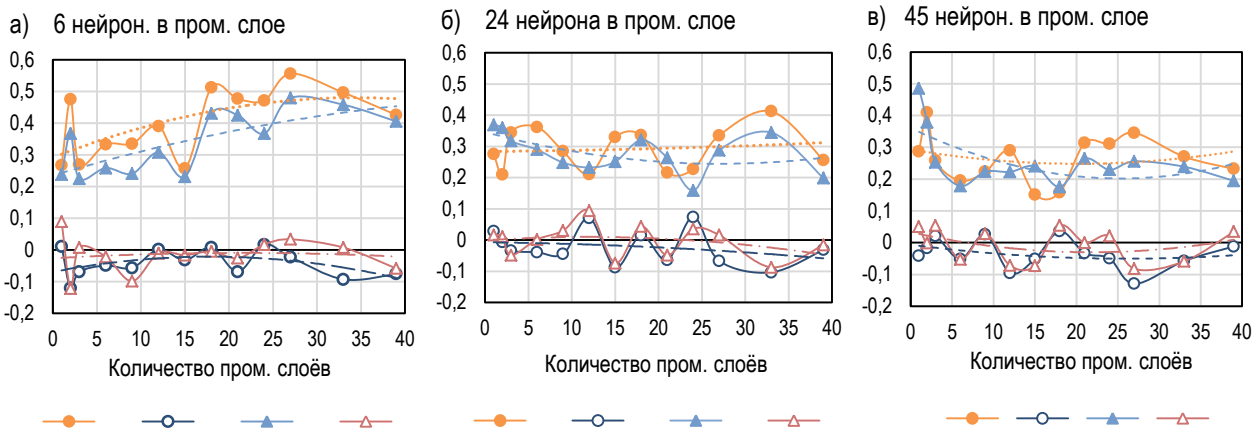


Рисунок 13 – Изменение ошибки модели (*d*) и коэффициента вариации вектора ошибок (*Vd*) в зависимости от количества промежуточных слоёв

Коэффициенты корреляции и детерминации были получены минимальной величины в моделях с 39с × 9н (следует читать: 39 промежуточных слоёв по 9 нейронов в каждом), 33с × 12н и 18с × 6н, а максимальные – в моделях с 15с × 42н, 9с × 27н и 3с × 39н. Значения минимальных, средних и максимальных значений математических статистик (*r*, R^2, *CV*(*MAE*), *CV*(*RMSE*), *d*, *Vd*), полученных по тренировочной и тестовой выборкам, приведены в таблице 1.

Влияние объёма тренировочной выборки на точность нейросетевой модели

Для оценки влияния количества образцов, использованных в обучении нейросетевой модели, из имеющейся базы данных объёмом 248 образцов были сформированы шесть тренировочных и шесть тестовых выборок. Первая пара – из тренировочной и тестовой выборок – соответственно составила, соответственно, 50 и 198 образцов. Вторая пара – 80 и 168 образцов, третья пара, соответственно, включала 110 и 138 образцов, четвёртая – 140 и 108 образцов, пятая – 170 и 78 образцов, шестая – 200 и 48 образцов. Каждая тренировочная выборка формировалась методом случайной генерации номера образца из общей базы объёмом 248 образцов. Оставшиеся образцы из общей базы формировали соответствующую тестовую выборку.

Было установлено, что с увеличением количества образцов в тренировочной выборке среднеквадратичная ошибка в среднем увеличивалась как для тренировочной, так и для валидационной выборок. При этом отношение значений среднеквадратичной ошибки, полученной для валидационной выборки, к среднеквадратичной ошибке, полученной для тренировочной выборки, уменьшалось. На рисунке 14 приведены средние значения среднеквадратичных ошибок, полученные после десяти повторений обучения нейросетевой модели для каждого объёма тренировочной выборки.

Таблица 1 – Минимальные, средние и максимальные значения математических статистик, полученные по тренировочной и тестовой выборкам

Статистика	*r*	R^2	*CV(MAE), %*	*CV(RMSE), %*	*d*	*Vd*
Тренировочная выборка						
Минимальная	0,912	0,832	6,1	10,1	–0,209	0,151
Средняя	0,977	0,952	10,1	17,5	–0,039	0,307
Максимальная	0,993	0,985	26,4	34,6	0,116	0,556
Тестовая выборка						
Минимальная	0,953	0,908	11,3	15,4	–0,175	0,153
Средняя	0,981	0,959	16,7	24,8	–0,016	0,286
Максимальная	0,992	0,985	28	40,5	0,181	1,302

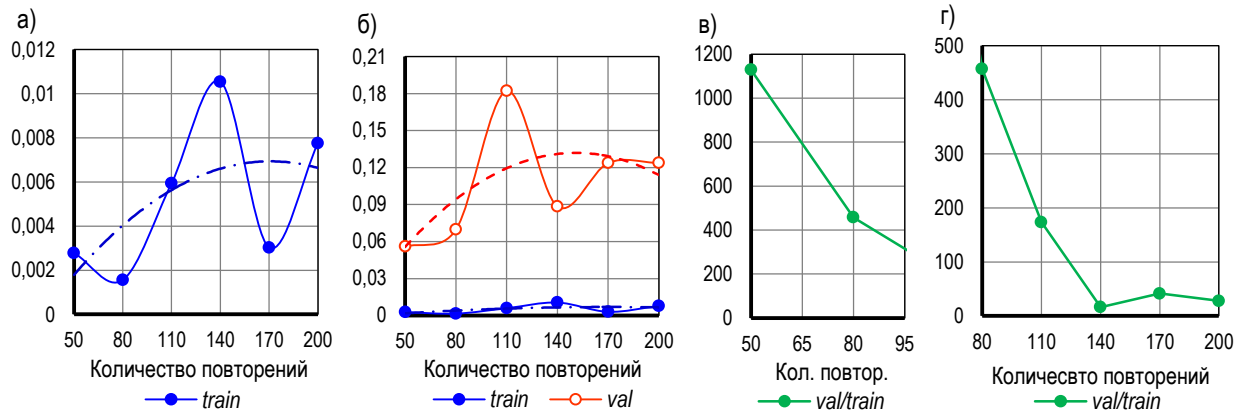


Рисунок 14 – Изменение среднеквадратичных ошибок, полученных для тренировочной (*train*) и валидационной (*val*) выборок в зависимости от количества в них образцов

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-64-78

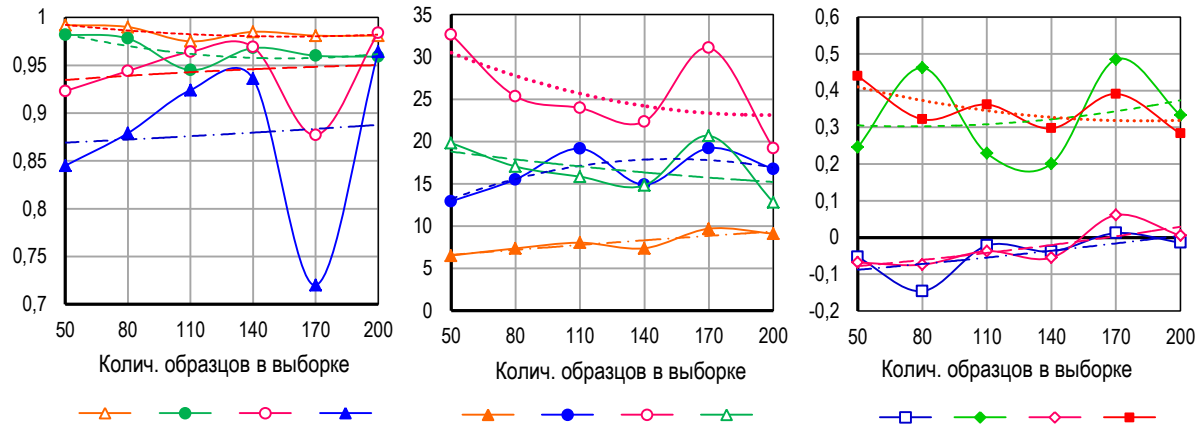


Рисунок 15 – Изменение математических статистик (*r*, R^2, *MAE*, *RMSE*, *d*, *Vd*), полученных по тренировочной (*tr*) и тестовой (*te*) выборкам, в зависимости от количества образцов в выборке

Увеличение количества образцов в тренировочной выборке вело к уменьшению или увеличению математических статистик, характер изменения которых показан на рисунке 16, а процент изменения – в таблице 2.

Значения минимальных, средних и максимальных значений математических статистик, полученных при различном количестве образцов в тренировочной и тестовой выборках, приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Изменение математических статистик при увеличении количества образцов в тренировочной выборке

Статистика	*r*	R^2	*MAE*	*RMSE*	*d*	*Vd*
Тренировочная выборка	–1,1	–2,4	+21,2	+11,9	–89	+26,7
Тестовая выборка	+6,5	+13,6	–28,8	–39,7	–2,6 раза	–45
Примечание – Числовые значения математических статистик приведены в процентах; знак «+» перед значением указывает на увеличение, «–» – на уменьшение.						

Таблица 3 – Минимальные, средние и максимальные значения математических статистик, полученные по тренировочной и тестовой выборкам

Статистика	*r*	R^2	*CV(MAE), %*	*CV(RMSE), %*	*d*	*Vd, %*
Тренировочная выборка						
Минимальная	0,975 (110)	0,945 (110)	6,5 (50)	12,9 (50)	0,012 (170)	20 (140)
Средняя	0,984	0,965	8,0	16,4	-0,044	32,6
Максимальная	0,992 (50)	0,982 (50)	9,7 (170)	19,2 (170)	-0,146 (80)	48,5 (170)
Тестовая выборка						
Минимальная	0,877 (170)	0,72 (170)	12,8 (200)	19,2 (200)	0,061 (170)	28,3 (200)
Средняя	0,944	0,878	16,8	25,8	–0,028	34,9
Максимальная	0,984 (200)	0,964 (200)	20,7 (170)	32,7 (50)	–0,074 (80)	43,9 (50)
Примечание – В скобках указано количество образцов в тренировочной выборке.						

Приведенные результаты свидетельствует о достаточно высокой точности нейросетевых моделей, обученных как на выборке объёмом 50-ти образцов, так и на выборках с большим количеством образцов. При этом увеличение количества образцов в обучающей выборке не имеет прямой корреляции с улучшением точности нейросетевых моделей. Анализируя статистические результаты, можно утверждать, что увеличение количества образцов в обучающей выборке привело скорее к некоторому снижению качества нейросетевых моделей.

Опираясь на критерии оценки моделей с использованием математических статистик, приведенные выше, по оценке средних значений коэффициентов корреляции и детерминации, полученных на тестовой выборке, модели попадают в категорию «модели с высокой положительной корреляцией». Средняя величина нормализованных значений средней абсолютной ошибки *CV*(*MAE*) и среднеквадратичной ошибки *CV*(*RMSE*), а также коэффициента вариации вектора ошибок (*Vd*) свидетельствует об «удовлетворительной» плотности распределения предсказанных значений сопротивления продавливанию, полученным по разработанным нейросетевым моделям.

Можно утверждать с высокой степенью достоверности, что снижение качества нейросетевых моделей при увеличении количества образцов в выборке, достаточно большие значения коэффициента вариации вектора ошибок (*Vd*) и нормализованных значений ошибок [нормализованное значение средней абсолютной ошибки *CV(MAE)* и среднеквадратичной ошибки *CV(RMSE)*], случайный разброс результирующих значений всех математических статистик (*r*, R^2, *MAE*, *RMSE*, *d*, *Vd*), отмеченный скачкообразными кривыми линиями в окрестности линии тренда на графиках их распределений в зависимости от количества нейронов в промежуточном слое, количества промежуточных слоёв и количества повторений обучений, связаны со статистической изменчивостью, вызванной случайной генерацией весовых коэффициентов перед началом обучения. При удачной генерации весовых коэффициентов перед началом обучения модель обучается настолько точно, что в отдельных случаях может попадать в категорию «отличная» или даже «почти идеальная», а при не удачной генерации, соответственно, наоборот. Об этом также свидетельствует изменение величины математических статистик, полученное при повторных переобучениях моделей. Изменение коэффициента корреляции и детерминации при повторных переобучениях моделей по тренировочным выборкам, включающим 50, 110 и 200 образцов, приведены на рисунке 17. Аналогичный характер изменения имели остальные математические статистики.

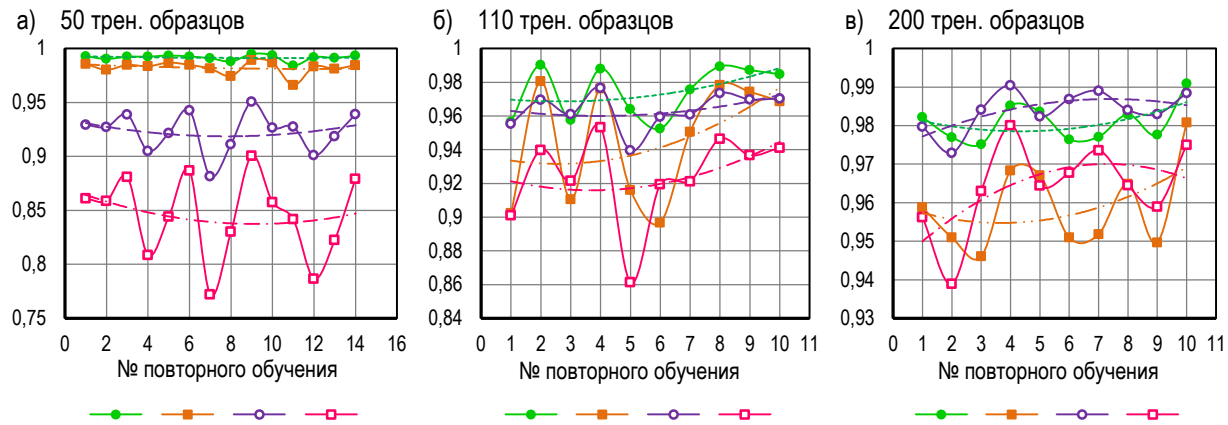


Рисунок 16 – Изменение математических статистик (*r*, R^2, *MAE*, *RMSE*, *d*, *Vd*), полученных по тренировочной (*tr*) и тестовой (*te*) выборкам, на каждом повторении обучения

Заключение

Модели, базирующиеся на применении нейронной сети с полносвязной архитектурой, обладают достаточно высокой способностью к предсказанию величины сопротивления продавливанию. Об этом свидетельствуют полученные в результате исследования для большинства моделей близкие к единице значения коэффициента корреляции Пирсона (средние значения по тренировочной и тестовой выборкам составляют, соответственно, $r_{train,m}$ = 0,984, $r_{test,m}$ = 0,944) и коэффициента детерминации ($R^2_{train,m}$ = 0,965, $R^2_{test,m}$ = 0,878), свидетельствующие о «высокой положительной корреляции» предсказанных и экспериментальных значениях сопротивления продавливанию. Но при этом модели показывают «удовлетворительную» плотность распределения предсказанных значений сопротивления, что подтверждено достаточно большой величиной нормализованных значений средней абсолютной ошибки [$CV(MAE)_{train,m}$ = 8 %, $CV(MAE)_{test,m}$ = 16,8 %], среднеквадратичной ошибки [$CV(RMSE)_{train,m}$ = 16,4 %, $CV(RMSE)_{test,m}$ = 28,8 %] и коэффициента вариации вектора ошибок δ ($Vd_{train,m}$ = 32,6 %, $Vd_{test,m}$ = 34,9 %).

Наилучшая предсказательная способность отмечена для моделей с 12–18 промежуточными слоями по 25–30 нейронов в каждом слое.

Распределение всех параметров имеет весьма случайный характер и очень сильно зависит от удачного подбора весовых коэффициентов перед началом обучения, который осуществляется программой случайным образом. Удачная генерация весовых коэффициентов перед началом обучения может привести к созданию нейросетевой модели, имеющей высокую точность.

Выдвинутая гипотеза цифрового моделирования сопротивления продавливанию на данном этапе должна быть отвергнута. Она может быть принята в том случае, если при обучении нейросетевой модели будут подобраны весовые коэффициенты, при которых для тренировочной и тестовой выборок будут достигнуты значения коэффициента корреляции Пирсона $r > 0,9$, коэффициента детерминации $R^2 > 0,8$, нормализованной по среднему средней абсолютной ошибки $CV(MAE) < 10$ %, нормализованной по среднему среднеквадратичной ошибки $CV(RMSE) < 10$ % и коэффициента вариации вектора ошибок $Vd < 10$ %. Выдвинутая гипотеза может быть также принята после проверки с применением статистических критериев, например, t-критерия Стьюдента.

Список цитированных источников

1. Shen, Y. Interpretable Machine Learning Models for Punching Shear Strength Estimation of FRP Reinforced Concrete Slabs / Y. Shen, J. Sun, S. Liang // Crystals. – 2022. – № 259.
2. The Machine-Learning-Based Prediction of the Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Flat Slabs: An Advanced M5P Model Tree Approach / M. H. Abdallah, Z. A. Thoeny, S. N. Henedy [et al.] // Appl. Sci. – 2023. – Vol. 13. – P. 8325. – DOI: 10.3390/app13148325.
3. Silva Júnior, F. E. S. Machine learning models to predict the punching shear strength of reinforced concrete flat slabs / F. E. S. Silva Júnior, W. J. S. Gomes // Rev. IBRACON Estrut. Mater. – 2023. – Vol. 16, № 4, Art. 16405. – DOI: 10.1590/S1983-41952023000400005.
4. Молош, В. В. Сопротивление срезу при продавливании самонапряженных плоских железобетонных элементов без поперечного армирования : дис. ... канд. тех. наук : 01.07.14 / Виктор Викторович Молош. – Брест, 2014. – 226 л.
5. Kinnunen, S. Punching of concrete slabs without shear reinforcement / S. Kinnunen, H. Nylander. – Stockholm, Sweden : KTH Royal Institute of Technology, 1960. – 112 p.
6. Broms, C. E. Elimination of flat plate punching failure mode / C. E. Broms // ACI Structural Journal. – 2000. – Vol. 97. – P. 94–101.
7. Broms, C. E. Concrete flat slabs and footings-design method for punching and detailing for ductility. Ph. D. Thesis / C. E. Broms. – Stockholm, Sweden : KTH Royal Institute of Technology, 2005. – 114 p.
8. Tian, Y. Strength Evaluation of Interior Slab-Column Connections / Y. Tian, J. O. Jirsa, O. Bayrak // ACI Structural Journal. – 2008. – Vol. 105. – P. 692–700.
9. Stasio, D. Transfer of Bending Moment between Flat Plate Floor and Column / D. Stasio, M. R. V. Buren // ACI Structural Journal. – 1960. – Vol. 57. – P. 299–314.
10. Moe, J. Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings under Concentrated Loads / J. Moe. – Skokie, Illinois : Portland Cement Association, 1961. – 130 p.
11. GB 50010–2010. Code for design of concrete structures : national standard of the People's Republic of China / MOHURD (Ministry of Housing and Urban-Rural Development). – Beijing : China Architecture & Building Press, 2015. — P. 232–236.
12. ACI 318-19. Building code requirements for structural concrete and commentary : American Concrete Institute standard / American Concrete Institute. – Farmington Hills, MI : ACI, 2019. – 624 p.
13. Muttoni, A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement / A. Muttoni // ACI Structural Journal. – 2008. – Vol. 105. – P. 440–450.
14. A Modified Compression Field Theory Based Analytical Model of RC Slab-Column Joint without Punching Shear Reinforcement / L. F. Wu, T. C. Huang, Y. L. Tong, S. X. Liang // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – 226 p.
15. Punching Shear Strengths of RC Slab-Column Connections: Prediction and Reliability / P. Chetchotisak, P. Ruengpim, D. Chetchotsak, S. Yindeesuk // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2018. – Vol. 22. – P. 3066–3076.
16. Mohammed, T. A. Post-Earthquake Fire Punching Shear Behavior of GFRP-Reinforced Slab-Column Connections / T. A. Mohammed, S. Shirtaga // Hindawi Advances in Civil Engineering. – Vol. 23 (February 2023). – Article ID 7596032. – 25 p. – DOI: 10.1155/2023/7596032.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-64-78

17. Geetha, N. K. Overview of machine learning and its adaptability in mechanical engineering / N. K. Geetha, P. Bridjesh // Materials Today. – 2020. – Vol. 4. – P. 395–399.
18. Machine-learning interpretability techniques for seismic performance assessment of infrastructure systems / S. Mangalathu, K. Karthikeyan, D. C. Feng, J. S. Jeon // Engineering Structures. – 2022. – Vol. 250. – Art. 112883.
19. Development of data-driven prediction model for CFRP-steel bond strength by implementing ensemble learning algorithms / S. Z. Chen, D. C. Feng, W. S. Han, G. Wu // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 303. – Art. 124470.
20. Implementing ensemble learning methods to predict the shear strength of RC deep beams with/without web reinforcements / D. C. Feng, W. J. Wang, S. Mangalathu [et al.] // Engineering Structures. – Vol. 2021. – Vol. 235. – Art. 111979.
21. A probabilistic bond strength model for corroded reinforced concrete based on weighted averaging of non-fine-tuned machine learning models / B. Fu, S. Z. Chen, X. R. Liu, D. C. Feng // Construction and Building Materials. – 2022 – Vol. 318. – Art. 125767.
22. Nasiri, S. Machine learning in predicting mechanical behavior of additively manufactured parts / S. Nasiri, M. R. Khosravani // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 14. – P. 1137–1153.
23. Hoang, A. N. D. Estimating punching shear capacity of steel fibre reinforced concrete slabs using sequential piecewise multiple linear regression and artificial neural network / A. N. D. Hoang // Measurement. – 2019. – Vol. 137. – P. 58–70.
24. Nguyen, H. D. Development of extreme gradient boosting model for prediction of punching shear resistance of r/c interior slabs / H. D. Nguyen, G. T. Truong, M. Shin // Engineering Structures. – 2021. – Vol. 235. – Art. 112067.
25. Explainable machine learning models for punching shear strength estimation of flat slabs without transverse reinforcement / S. Mangalathu, H. Shin, E. Choi, J. S. Jeon // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 39. – Art. 102300.
26. Truong, G. T. Assessment of punching shear strength of FRP-RC slab-column connections using machine learning algorithms / G. T. Truong, H. J. Hwang, C. S. Kim // Engineering Structures. – 2022. – Vol. 255. – Art. 113898.
27. A machine learning framework for predicting the shear strength of carbon nanotube-polymer interfaces based on molecular dynamics simulation data / A. Rahman, P. Deshpande, M. S. Radue [et al.] // Composites Science and Technology. – 2021. – Vol. 207. – Art. 108627.
28. Ilawe, N. V. Breaking Badly: DFT-D2 Gives Sizeable Errors for Tensile Strengths in Palladium-Hydride Solids / N. V. Ilawe, J. A. Zimmerman, B. M. J. Wong // Journal of Chemical Theory and Computation. – 2015. – Vol. 11. – P. 5426–5435.
29. Compressive Strength Prediction of High-Strength Concrete Using Long Short-Term Memory and Machine Learning Algorithms / H. G. Chen, X. Li, Y. Q. Wu [et al.] // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – Art. 302.
30. Data-Driven Compressive Strength Prediction of Fly Ash Concrete Using Ensemble Learner Algorithms / M. S. Barkhordari, D. J. Armaghani, A. S. Mohammed, D. V. Ulrikh // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – Art. 132.
31. Shear Strength Prediction of Slender Steel Fiber Reinforced Concrete Beams Using a Gradient Boosting Regression Tree Method / A. Shatnawi, H. M. Alkassar, N. M. Al-Abdaly [et al.] // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – Art. 550.
32. Jiang, Y. M. Compressive Strength Prediction of Fly Ash Concrete Using Machine Learning Techniques / Y. M. Jiang, H. Y. Li, Y. S. Zhou // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – Art. 690.
33. Shen, Y. X. Explainable machine learning-based model for failure mode identification of RC flat slabs without transverse reinforcement / Y. X. Shen, L. F. Wu, S. X. Liang // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Vol. 141. – Art. 106647.
34. Fu, B. A machine learning-based time-dependent shear strength model for corroded reinforced concrete beams / B. Fu, D. C. Feng // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 36. – Art. 102118.
35. Головко, В.А. Нейросетевые технологии обработки данных / В. А. Головко, В. В. Краснопрошин. – Минск : БГУ, 2017. – 264 с.
36. Hou, R. Prediction of the shear capacity of ultrahigh-performance concrete beams using neural network and genetic algorithm / R. Hou, Q. Hou // Scientific Reports. – 2023. – https://www.nature.com/articles/s41598-023-29342-0 (дата обращения: 17.01.2026).
37. Shen, L. Reliability Analysis of RC Slab-Column Joints under Punching Shear Load Using a Machine Learning-Based Surrogate Model / L. Shen, Y. Shen, Sh. Liang // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – Art. 1750. – DOI: 10.3390/buildings12101750.
38. Xu, H. H. Dependent Evidence Combination Based on Shearman Coefficient and Pearson Coefficient / H. H. Xu, Y. Deng // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 11634–11640.
39. Abellan-Garcia, J. Properties prediction of environmentally friendly ultra-high-performance concrete using artificial neural networks / J. Abellan-Garcia, F. Gomez, N. Torres Castellanos // European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2022. – Vol. 26, № 6. – P. 2319–2343.
40. Du, G. Prediction of the compressive strength of high-performance self-compacting concrete by an ultrasonicrebound method based on a GA-BP neural network / G. Du, L. Bu, Q. Hou // PLoS ONE. – 2021. – Vol. 16, № 5. – Art. e0250795. – DOI: 10.1371/journal.pone.0250795.
41. Основы проектирования строительных конструкций = Асновы праектавання будауничых канструкцый : СН 2.01.01. – Введ. 16.19.2019. – Минск : РУП «Стройтехнорм» ; Мин. арх. и стр.-ва Респ. Беларусь, 2020. – 89 с.
42. Hinkle, D. E. Applied statistics for the behavioral sciences / D. E. Hinkle, W. Wiersma, S. G. Jurs. – 5th ed. – Boston ; New York : Houghton Mifflin Company, 2003. – 756 p.
43. Статистика : учеб. для студ. учреждений сред. проф. образования / В.С. Михтарян, В. Г. Минашкин, Р. А. Шмойлова, Н. А. Садовникова ; под ред. В. С. Михтаряна. – 12-е изд. перераб. и доп. – М : Академия, 2013. – 304 с.

References

1. Shen, Y. Interpretable Machine Learning Models for Punching Shear Strength Estimation of FRP Rein-forced Concrete Slabs / Y. Shen, J. Sun, S. Liang // Crystals. – 2022. – № 259.
2. The Machine-Learning-Based Prediction of the Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Flat Slabs: An Advanced M5P Model Tree Approach / M. H. Abdallah, Z. A. Thoeny, S. N. Henedy [et al.] // Appl. Sci. – 2023. – Vol. 13. – P. 8325. – DOI: 10.3390/app13148325.
3. Silva Júnior, F. E. S. Machine learning models to predict the punching shear strength of reinforced con-crete flat slabs / F. E. S. Silva Júnior, W. J. S. Gomes // Rev. IBRACON Estrut. Mater. – 2023. – Vol. 16, № 4, Art. 16405. – DOI: 10.1590/S1983-41952023000400005.
4. Molosh, V. V. Soprotivlenie srezu pri prodavlivanii samonapryazhennyh ploskih zhelezobetonnyh elementov bez poperechnogo armirovaniya : dis. ... kand. tekh. nauk : 01.07.14 / Viktor Viktorovich Molosh. – Brest, 2014. – 226 l.
5. Kinnunen, S. Punching of concrete slabs without shear reinforcement / S. Kinnunen, H. Nylander. – Stockholm, Sweden : KTH Royal Institute of Technology, 1960. – 112 p.
6. Broms, C. E. Elimination of flat plate punching failure mode / C. E. Broms // ACI Structural Journal. – 2000. – Vol. 97. – P. 94–101.
7. Broms, C. E. Concrete flat slabs and footings-design method for punching and detailing for ductility. Ph. D. Thesis / C. E. Broms. – Stockholm, Sweden : KTH Royal Institute of Technology, 2005. – 114 p.
8. Tian, Y. Strength Evaluation of Interior Slab-Column Connections / Y. Tian, J. O. Jirsa, O. Bayrak // ACI Structural Journal. – 2008. – Vol. 105. – P. 692–700.
9. Stasio, D. Transfer of Bending Moment between Flat Plate Floor and Column / D. Stasio, M. R. V. Buren // ACI Structural Journal. – 1960. – Vol. 57. – P. 299–314.
10. Moe, J. Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings under Concentrated Loads / J. Moe. – Skokie, Illinois : Portland Cement Association, 1961. – 130 p.
11. GB 50010–2010. Code for design of concrete structures : national standard of the People's Republic of China / MOHURD (Ministry of Housing and Urban-Rural Development). – Beijing : China Architecture & Building Press, 2015. — P. 232–236.

12. ACI 318-19. Building code requirements for structural concrete and commentary : American Concrete Institute standard / American Concrete Institute. – Farmington Hills, MI : ACI, 2019. – 624 p.
13. Muttoni, A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement / A. Muttoni // ACI Structural Journal. – 2008. – Vol. 105. – P. 440–450.
14. A Modified Compression Field Theory Based Analytical Model of RC Slab-Column Joint without Punching Shear Reinforcement / L. F. Wu, T. C. Huang, Y. L. Tong, S. X. Liang // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – 226 p.
15. Punching Shear Strengths of RC Slab-Column Connections: Prediction and Reliability / P. Chetchotisak, P. Ruengpim, D. Chetchotsak, S. Yindeesuk // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2018. – Vol. 22. – P. 3066–3076.
16. Mohammed, T. A. Post-Earthquake Fire Punching Shear Behavior of GFRP-Reinforced Slab-Column Connections / T. A. Mohammed, S. Shirtaga // Hindawi Advances in Civil Engineering. – Vol. 23 (February 2023). – Article ID 7596032. – 25 p. – DOI: 10.1155/2023/7596032.
17. Geetha, N. K. Overview of machine learning and its adaptability in mechanical engineering / N. K. Geetha, P. Bridjesh // Materials Today. – 2020. – Vol. 4. – P. 395–399.
18. Machine-learning interpretability techniques for seismic performance assessment of infrastructure systems / S. Mangalathu, K. Karthikeyan, D. C. Feng, J. S. Jeon // Engineering Structures. – 2022. – Vol. 250. – Art. 112883.
19. Development of data-driven prediction model for CFRP-steel bond strength by implementing ensemble learning algorithms / S. Z. Chen, D. C. Feng, W. S. Han, G. Wu // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 303. – Art. 124470.
20. Implementing ensemble learning methods to predict the shear strength of RC deep beams with/without web reinforcements / D. C. Feng, W. J. Wang, S. Mangalathu [et al.] // Engineering Structures. – Vol. 2021. – Vol. 235. – Art. 111979.
21. A probabilistic bond strength model for corroded reinforced concrete based on weighted averaging of non-fine-tuned machine learning models / B. Fu, S. Z. Chen, X. R. Liu, D. C. Feng // Construction and Building Materials. – 2022 – Vol. 318. – Art. 125767.
22. Nasiri, S. Machine learning in predicting mechanical behavior of additively manufactured parts / S. Na-siri, M. R. Khosravani // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 14. – P. 1137–1153.
23. Hoang, A. N. D. Estimating punching shear capacity of steel fibre reinforced concrete slabs using sequential piecewise multiple linear regression and artificial neural network / A. N. D. Hoang // Measurement. – 2019. – Vol. 137. – P. 58–70.
24. Nguyen, H. D. Development of extreme gradient boosting model for prediction of punching shear re-sistance of r/c interior slabs / H. D. Nguyen, G. T. Truong, M. Shin // Engineering Structures. – 2021. – Vol. 235. – Art. 112067.
25. Explainable machine learning models for punching shear strength estimation of flat slabs without transverse reinforcement / S. Mangalathu, H. Shin, E. Choi, J. S. Jeon // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 39. – Art. 102300.
26. Truong, G. T. Assessment of punching shear strength of FRP-RC slab-column connections using machine learning algorithms / G. T. Truong, H. J. Hwang, C. S. Kim // Engineering Structures. – 2022. – Vol. 255. – Art. 113898.
27. A machine learning framework for predicting the shear strength of carbon nanotube-polymer interfaces based on molecular dynamics simulation data / A. Rahman, P. Deshpande, M. S. Radue [et al.] // Composites Science and Technology. – 2021. – Vol. 207. – Art. 108627.
28. Ilawe, N. V. Breaking Badly: DFT-D2 Gives Sizeable Errors for Tensile Strengths in Palladium-Hydride Solids / N. V. Ilawe, J. A. Zimmerman, B. M. J. Wong // Journal of Chemical Theory and Computation. – 2015. – Vol. 11. – P. 5426–5435.
29. Compressive Strength Prediction of High-Strength Concrete Using Long Short-Term Memory and Ma-chine Learning Algorithms / H. G. Chen, X. Li, Y. Q. Wu [et al.] // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – Art. 302.
30. Data-Driven Compressive Strength Prediction of Fly Ash Concrete Using Ensemble Learner Algorithms / M. S. Barkhordari, D. J. Armaghani, A. S. Mohammed, D. V. Ulrikh // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – Art. 132.
31. Shear Strength Prediction of Slender Steel Fiber Reinforced Concrete Beams Using a Gradient Boosting Regression Tree Method / A. Shatnawi, H. M. Alkassar, N. M. Al-Abdaly [et al.] // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – Art. 550.
32. Jiang, Y. M. Compressive Strength Prediction of Fly Ash Concrete Using Machine Learning Techniques / Y. M. Jiang, H. Y. Li, Y. S. Zhou // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – Art. 690.
33. Shen, Y. X. Explainable machine learning-based model for failure mode identification of RC flat slabs without transverse reinforcement / Y. X. Shen, L. F. Wu, S. X. Liang // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Vol. 141. – Art. 106647.
34. Fu, B. A machine learning-based time-dependent shear strength model for corroded reinforced concrete beams / B. Fu, D. C. Feng // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 36. – Art. 102118.
35. Golovko, V.A. Nejrosetevye tekhnologii obrabotki dannyh / V. A. Golovko, V. V. Krasnoproshin. – Minsk : BGU, 2017. – 264 s.
36. Hou, R. Prediction of the shear capacity of ultrahigh-performance concrete beams using neural network and genetic algorithm / R. Hou, Q. Hou // Scientific Reports. – 2023. – https://www.nature.com/articles/s41598-023-29342-0 (data obrashcheniya: 17.01.2026).
37. Shen, L. Reliability Analysis of RC Slab-Column Joints under Punching Shear Load Using a Machine Learning-Based Surrogate Model / L. Shen, Y. Shen, Sh. Liang // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – Art. 1750. – DOI: 10.3390/buildings12101750.
38. Xu, H. H. Dependent Evidence Combination Based on Shearman Coefficient and Pearson Coefficient / H. H. Xu, Y. Deng // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 11634–11640.
39. Abellan-Garcia, J. Properties prediction of environmentally friendly ultra-high-performance concrete using artificial neural networks / J. Abellan-Garcia, F. Gomez, N. Torres Castellanos // European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2022. – Vol. 26, № 6. – P. 2319–2343.
40. Du, G. Prediction of the compressive strength of high-performance self-compacting concrete by an ultrasonicrebound method based on a GA-BP neural network / G. Du, L. Bu, Q. Hou // PLoS ONE. – 2021. – Vol. 16, № 5. – Art. e0250795. – DOI: 10.1371/journal.pone.0250795.
41. Osnovy proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij = Asnovy praektavannya budaunichyh kanstrukcyj : SN 2.01.01. – Vved. 16.19.2019. – Minsk : RUP «Strojtekhnorm» ; Min. arh. i str.-va Resp. Belarus', 2020. – 89 s.
42. Hinkle, D. E. Applied statistics for the behavioral sciences / D. E. Hinkle, W. Wiersma, S. G. Jurs. – 5th ed. – Boston ; New York : Houghton Mifflin Company, 2003. – 756 p.
43. Statistika : ucheb. dlya stud. uchrezhdenij sred. prof. obrazovaniya / V.S. Mihtaryan, V. G. Minashkin, R. A. SHmojlova, N. A. Sadovnikova ; pod red. V. S. Mihtaryana. – 12-e izd. pererab. I dop. – M : Akademiya, 2013. – 304 s.

Материал поступил 24.02.2026, одобрен 06.03.2026, принят к публикации 06.03.2026

УДК 691:536.2

ЭМПИРИЧЕСКИЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДИФФУЗИИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. И. Никитин[1], С. К. Никитин[2]

[1]Д. т. н., профессор, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nik_ol40@mail.ru

[2]Инженер-программист кафедры интеллектуальных информационных технологий, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: sniki65@gmail.com

Реферат

С помощью геометрической модели пористого материала показано, что коэффициент сопротивления диффузии μ этой модели зависит только от объемной концентрации проводника диффундирующих частиц и его геометрии. Отмечаются причины, по которым существующие методы измерения коэффициента μ могут давать систематическую ошибку. Были рассмотрены опытные данные четырех выборок малого объема n различных авторов в которых, коэффициент μ измерялся методом электропроводимости. На основе опытных данных одной из выборок, содержащей результаты измерений n = 11 пар коэффициента μ и открытой пористости P для песчаника были рассмотрены особенности эмпирического подхода к построению формул для расчета коэффициента μ. При аппроксимации этих данных были использованы зависимости линейного, логарифмического и степенного видов. Коэффициенты b_0 и b_1 линейной зависимости определялись методом наименьших квадратов (МНК). Этим же методом находились коэффициенты логарифмической и степенной зависимостей после их приведения к линейному виду (линеаризации). Рассмотрены процедуры проверки допущений МНК. Оказалось, что полученные эмпирические формулы не удовлетворяют физической сущности неизвестной зависимости μ=f(P) на границах диапазона P. Поэтому были построены полуэмпирические формулы, коэффициенты которых находились геометрическим путем с использованием граничных условий и средних значений, характеризующих центр выборки. Аналогичным образом были проанализированы остальные выборки. Однако полуэмпирические формулы (как и эмпирические) основанные на различных выборках дают существенно различные результаты при одинаковых значениях пористости. Недостатки эмпирического подхода к построению расчетных формул преодолевались путем использования теоретического подхода, реализованного с помощью методов теории обобщенной проводимости в сочетании с геометрическим моделированием структуры материала. При этом структура материала рассматривалась как изотропная бинарная система, состоящая из диэлектрика (твердого скелета) и проводника диффундирующих частиц. Благодаря теоретическому подходу дана оценка систематической ошибки измерения коэффициента μ при использовании метода электропроводимости.

Ключевые слова: капиллярно-пористый материал, коэффициент сопротивления диффузии, аппроксимация опытных данных, теория проводимости.

EMPIRICAL AND THEORETICAL APPROACHES TO THE CONSTRUCTION OF DEPENDENCIES FOR CALCULATING THE DIFFUSION RESISTANCE COEFFICIENT OF POROUS MATERIALS

V. I. Nikitin, S. K. Nikitin

Abstract

Using a geometrical model of a porous material, it has been shown that the diffusion resistance coefficient μ of this model depends only on the volume concentration of the conductor of the diffusing particles and its geometry. The reasons are noted for which the existing methods of measuring the coefficient μ may yield a systematic error. Based on data from four samples in which the coefficient μ was measured by the electrical conductivity method, the features of constructing empirical and semi-empirical formulas for calculating the coefficient μ as a function of the measured porosity are considered. The advantages of semi-empirical formulas, which take into account the physical nature of the phenomenon, over empirical ones are shown. However, semi-empirical formulas (as well as empirical ones) based on different samples give significantly different results for the same porosity values. The shortcomings of the empirical approach to constructing computational formulas were overcome by using a theoretical approach implemented by means of the methods of the theory of generalized conductivity in combination with geometric modeling of the material structure. In this case, the structure of the material was considered as an isotropic binary system consisting of a dielectric (solid skeleton) and a conductor of diffusing particles. An estimate is given of the systematic error in measuring the coefficient μ when using the electrical conductivity method.

Keywords: capillary-porous material, diffusion resistance coefficient, approximation of experimental data, conductivity theory.

Введение

Результаты многочисленных натурных исследований [1–4 и др.] показывают, что влагосодержание капиллярно-пористых материалов ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий может в разы превышать проектные значения. Это приводит к снижению теплозащитных свойств ограждающих конструкций и другим негативным последствиям. Поэтому при проектировании зданий следует прогнозировать влажностное состояние материалов наружных ограждений. Для получения необходимых данных целесообразен вычислительный эксперимент с использованием компьютерных программ, реализующих математические модели, описывающие сложные, обычно одномерные процессы взаимного переноса тепла и влаги. Один из примеров использования такого подхода к расчету нестационарных температурно-влажностных полей в газосиликатной стеновой панели здания рассмотрен в [3].

Точность вычислительного эксперимента во многом зависит от принимаемых значений многочисленных физических и структурных показателей, характеризующих пористые материалы с точки зрения переноса вещества и энергии. Одним из таких показателей является так называемый коэффициент сопротивления диффузии μ. Согласно О. Кришеру, (цитируется по [5, с. 55]) и Европейской норме [6], при диффузии водяного пара в пористом материале этот коэффициент показывает, во сколько раз диффузионное сопротивление слоя материала больше диффузионного сопротивления слоя неподвижного воздуха при одинаковой толщине и температуре этих слоев.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-79-87

Определить коэффициент μ можно с помощью многочисленных эмпирических и полуэмпирических формул построенных с использованием опытных данных, которые, как правило, получены двумя методами [7–9].

Один из этих методов основан на определении паропроницаемости материала $\boldsymbol{\delta_p}$ и воздуха $\boldsymbol{\delta_o}$ при стационарном процессе молекулярной диффузии водяного пара. Отношение $\boldsymbol{\delta_o/\delta_p}$ даст значение коэффициента сопротивления μ, который сильно зависит от относительной влажности воздуха $\boldsymbol{\varphi}$. По данным работы [5, с. 57] для образцов строительных материалов различной пористости (бетоны, строительные растворы, глиняные кирпичи) с уменьшением относительной влажности воздуха $\boldsymbol{\varphi}$ с 65 % до 40 % при одинаковой температуре 20 °С коэффициент сопротивления μ возрастает в 1,34–2,66 раз. Это соотношение тем больше, тем меньше пористость. Основным недостатком этого метода считается очень большая длительность измерения $\boldsymbol{\delta_p}$ [8–10]. В зависимости от вида материала и размеров образца, время наступления стационарного режима диффузии пара в образце может изменяться от 50 до 100 суток [10, с. 199]. Отмечается очень большой размах измерений [5].

В другом методе с помощью специального оборудования [8, 9, 11] измеряется удельная электропроводность пористого материала $\boldsymbol{\sigma_e}$, насыщенного жидким электролитом, и самого электролита $\boldsymbol{\sigma_o}$. При этом твердый скелет материала рассматривается в качестве диэлектрика. В качестве электролитов используются водные растворы некоторых солей, кислот и щелочей с высокой степенью диссоциации близкой к единице. Отношение $\boldsymbol{\sigma_o/\sigma_e}$ даст значение коэффициента сопротивления μ при ионной проводимости. Иногда его называют электрообразующим коэффициентом F (electrical formation factor) [12, 13]. Как и Карман (Carman) [7], первый способ измерения коэффициента сопротивления будем называть методом диффузии, а второй – методом электропроводимости.

Бесспорно, значение коэффициента сопротивления диффузии зависит от относительного объема открытого порового пространства материала (пористости Р) и его геометрии. Обоснуем характер этой зависимости, используя модель пористого материала в виде элементарного кубического объема $\boldsymbol{V = L^3}$, пронизанного извилистым поровым каналом постоянного поперечного сечения S и длиной $\boldsymbol{l > L}$. Извилистость канала будем определять общепринятым отношением $\boldsymbol{\tau = l/L}$ [7, 14, 15]. Поскольку объем порового канала $\boldsymbol{V_p = S \cdot l}$, то пористость принятой модели материала равна: $\boldsymbol{P = V_p/V = S \cdot l/L^3}$. Согласно теории обобщенной проводимости [16, 17] по аналогии с термическим, электрическим и другими сопротивлениями диффузионное сопротивление рассматриваемого порового канала определяется по формуле $\boldsymbol{R = l/(k \cdot S)}$, где k – коэффициент проводимости. Если поровый канал заполнен паровоздушной смесью, то $\boldsymbol{k = \delta_o}$. При насыщении этого же канала электролитом $\boldsymbol{k = \sigma_o}$. Если элементарные объем $\boldsymbol{V = L^3}$ заполнен только проводником, то имеем сопротивление самого проводника $\boldsymbol{R_o = L/(k \cdot L^2)}$. Отношение $\boldsymbol{R/R_o}$ даст значение коэффициента сопротивления $\boldsymbol{\mu}$. После несложных преобразований приходим к зависимости, связывающей три структурных параметра

$$\boldsymbol{\mu = \tau^2/P}, \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\tau^2}$, как и в [7, 14], будем называть коэффициентом извилистости, который обычно определяется после измерения $\boldsymbol{\mu}$ и Р.

Соотношение вида (1) приведено в многочисленных публикациях, например [7–9, 13, 14]. Из вывода формулы (1) следует, что в рамках принятых допущений коэффициент сопротивления $\boldsymbol{\mu}$ зависит только от объемной концентрации проводника (Р) и его геометрии $\boldsymbol{(\tau^2)}$ и можно говорить о равенстве коэффициентов сопротивлений, найденных по первому и второму методам измерений. В работе [7] также предполагается такое равенство. Однако, согласно работам [6, 18, 19], следует учитывать, что с повышением сорбционного увлажнения пор материала наряду с молекулярной диффузией водяного пара имеет место перенос влаги в жидкой фазе. В результате, как свидетельствуют опытные данные работ [5, 14] и расчеты по теоретическим зависимостям работы [19], может оказаться, что в некоторых случаях найденный коэффициент паропроницаемости материала $\boldsymbol{\delta_p}$ превышает коэффициент паропроницаемости воздуха $\boldsymbol{\delta_o}$ и, следовательно, коэффициент сопротивления диффузии $\boldsymbol{\mu}$ не превышает единицу. Такой случай наступает тогда, когда сорбционное влагосодержание пор достигает граничного (критического) значения [18, 20], при котором происходит переход от изолированных включений жидкости к непрерывным и начинает действовать механизм капиллярного переноса. Следует отметить, что при измерении коэффициента сопротивления методом электропроводимости не удается полностью заполнить открытое поровое пространство электролитом даже в вакууме (образуются замкнутые газовые включения) и вместо пористости Р имеет место объемная концентрация проводника $\boldsymbol{m < P}$. Тем не менее, соотношение $\boldsymbol{\mu \leq 1}$ с большой вероятностью не будет соблюдаться. В силу упомянутых обстоятельств, приводящих к систематическим ошибкам, говорить о равенстве результатов измерений коэффициента $\boldsymbol{\mu}$ по первому и второму методам измерений, чаще всего, не совсем корректно. Представляется, что при экспериментальном определении значения коэффициента сопротивления диффузии целесообразно использовать метод электропроводимости.

Анализ опытных данных о взаимосвязанных соотношением (1) геометрических параметрах $\boldsymbol{\mu}$ или $\boldsymbol{\tau^2}$ представленных в работах [7–10, 12, 13] показывает, что значения коэффициента сопротивления диффузии могут существенно отличаться даже для одних и тех же материалов. В этих же работах приведены многочисленные эмпирические и полуэмпирические формулы, аппроксимирующие зависимость $\boldsymbol{\mu}$ или $\boldsymbol{\tau^2}$ от пористости рассмотренных материалов. Результаты расчетов коэффициента сопротивления диффузии по этим формулам при одинаковых значениях пористости могут отличаться в разы. В такой ситуации выбор обобщенной зависимости необходимой для расчета коэффициента $\boldsymbol{\mu}$ при проведении вычислительных экспериментов является проблематичным. Представляется, что построение такой зависимости возможно на основе теоретического подхода, позволяющего изучать явления, которые нельзя воспроизвести при эмпирическом подходе.

В данной работе рассмотрены взаимосвязанные эмпирический и теоретический подходы к построению аппроксимаций $\boldsymbol{\hat{\mu} = f(P)}$ для неизвестной зависимости $\boldsymbol{\mu = f(P)}$. Особенности эмпирического подхода были продемонстрированы с использованием данных четырех выборок малого объема [7, 9, 12], в которых значения коэффициента сопротивления $\boldsymbol{\mu}$ определялись методом электропроводимости. По данным каждой выборки были получены эмпирические и полуэмпирические формулы для расчета коэффициента $\boldsymbol{\mu}$. Для последующих расчетов рекомендовались полуэмпирические формулы, которые с точки зрения физической сущности зависимости $\boldsymbol{\mu = f(P)}$ и экстраполяционных возможностей значительно превосходили эмпирические формулы. Как и ожидалось расчеты по полуэмпирическим формулам показали, что значения коэффициента $\boldsymbol{\mu}$ найденные по разным формулам при одинаковой пористости существенно отличаются. Теоретический подход был реализован с помощью методов теории обобщенной проводимости в сочетании с геометрическим моделированием структуры материала. При выборе такого подхода к решению задач мы опирались на мнения ряда исследователей, в частности [16, 17, 20–23], о том, что теория обобщенной проводимости является достаточно надежным и универсальным инструментом для построения моделей переноса тепла и массы. В результате были получены формулы для расчета коэффициента $\boldsymbol{\mu}$ пористых сред, когда открытое поровое пространство заполнено жидким проводником (недостижимая в физическом опыте двухкомпонентная система), и когда оно заполнено проводником до критического уровня, при котором образуются замкнутые газовые включения, являющиеся диэлектриком (реальная трехкомпонентная система). Дана оценка систематической ошибки измерения $\boldsymbol{\mu}$ методом электропроводимости, связанной с наличием замкнутых газовых включений. Поэтому при расчете коэффициента $\boldsymbol{\mu}$ рекомендуется использовать формулы, полученные для двухкомпонентой системы.

Особенности эмпирического подхода к построению формул для расчета коэффициента сопротивления диффузии

Очевидно, что на точность предсказания опытных данных с помощью аппроксимирующей зависимости, построенной по этим данным, влияет ее математическое выражение. Рассмотрим решение задачи

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-79-87

выбора математического выражения, которое с точки зрения интерполяции и экстраполяции удовлетворительно аппроксимирует неизвестную зависимость коэффициента сопротивления диффузии $\boldsymbol{\mu}$ от открытой пористости материала P на основе опытных данных (выборки) работы [7, с. 52–53]. При этом рассматривались образцы песчаника, имеющие однородную структуру пор. В таблице 1 приведены результаты измерений $\boldsymbol{n = 11}$ пар $\boldsymbol{\mu}$ и P для песчаника, а на рисунке 1 показана их графическая интерпретация (поле корреляций).

Таблица 1 – Измеренные значения пористости P и коэффициента сопротивления μ для песчаника

P	μ
0,200	12,50
0,225	11,69
0,218	13,07
0,163	20,06
0,181	14,03
0,195	13,90
0,205	12,98
0,185	16,92
0,201	17,46
0,209	13,59
0,208	12,60

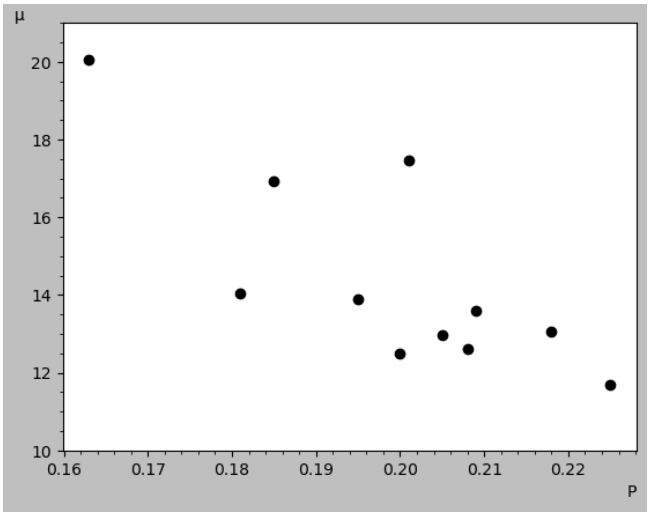


Рисунок 1 – Поле корреляции, характеризующее связь между коэффициентом сопротивления μ и пористостью P песчаника

Статистическими оценками этих данных являются: выборочные средние $\bar{\boldsymbol{\mu}} = \boldsymbol{14,436}$ и $\bar{\boldsymbol{P}} = \boldsymbol{0,1991}$; дисперсии относительно этих средних $\boldsymbol{s_{\mu}^2 = 6,676}$ и $\boldsymbol{s_p^2 = 3,091 \cdot 10^{-3}}$ со степенью свободы $\boldsymbol{v = n - 1 = 10}$ и выборочный коэффициент ковариации $\boldsymbol{cov(\mu, P) = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\mu_i - \bar{\mu})\,(P_i - \bar{P}) = -3,54785 \cdot 10^{-2}}$.

По виду поля корреляций, представленному на рисунке 1, можно качественно судить о наличии отрицательной корреляции между величинами $\boldsymbol{\mu}$ и P. Выборочный коэффициент корреляции, измеряющий степень тесноты линейной статистической связи между $\boldsymbol{\mu}$ и P, равен $\boldsymbol{\hat{r} = cov\,(\mu, P)\big/\sqrt{s_{\mu}^2 \cdot s_p^2} = -0,781}$. Его абсолютное значение $\boldsymbol{|\hat{r}|}$ при обычно принимаемом в инженерных исследованиях уровне значимости $\boldsymbol{\alpha = 0,05}$ (доверительная вероятность $\boldsymbol{0,95 = 1 - \alpha}$) превышает критическое значение $\boldsymbol{r_{\alpha,n-2} = r_{0,05;9} = 0,602}$ [24, 25] и, следовательно, выборочный коэффициент корреляции статистически значим.

Несомненно, ошибки измерения пористости P пренебрежимо малы по сравнению с ошибками измерения показателя $\boldsymbol{\mu}$ В таком случае рекомендуется анализировать регрессионную зависимость случайной величины $\boldsymbol{\mu}$ от неслучайной переменной P [24]. Регрессионный анализ начинается с выбора вида (типа, класса) функций, в рамках которого предполагается вести поиск подходящей аппроксимации для неизвестной функции регрессии. Так, если опираться только на результаты упомянутого корреляционного анализа, то в качестве допустимого решения можно использовать линейную функцию

$$\hat{\boldsymbol{\mu}} = \boldsymbol{b_0 + b_1 P}. \qquad (2)$$

При выборе зависимости, претендующей на весь возможный диапазон пористости $\boldsymbol{(0 < P < 1)}$ принципиально важно опираться на физическую (содержательную) сущность искомой зависимости. Исходя из формулы (1), которая отражает физику явления, представляется, что искомая зависимость будет иметь вертикальную асимптоту $\boldsymbol{lim_{p\to 0}\,\mu\,(P) = +\infty}$ и проходить через точку $\boldsymbol{(P = 1, \mu = 1)}$. Линейная зависимость (2) может проходить через указанную точку, но не имеет асимптоты. Зато при использовании зависимостей, например, логарифмического

$$\hat{\boldsymbol{\mu}} = \boldsymbol{b_0 + b_1 lnP} \qquad (3)$$

или степенного

$$\hat{\boldsymbol{\mu}} = \boldsymbol{b_0 + P^{b_1}} \qquad (4)$$

видов можно удовлетворить указанным условиям.

Определение неизвестных значений коэффициентов (параметров) $\boldsymbol{b_0}$ и $\boldsymbol{b_1}$ линейной аппроксимации (2) обычно выполняется с помощью метода наименьших квадратов (МНК), при котором найденные назначения коэффициентов минимизируют сумму квадратов остатков $\boldsymbol{e_i = \mu_i - \hat{\mu}_i (i = 1, 2, \ldots, n)}$, где $\boldsymbol{\mu_i}$ и $\boldsymbol{\hat{\mu}_i}$ – экспериментальное и вычисленное по формуле (2) значения показателя $\boldsymbol{\mu}$ в i-том опыте. При этом соблюдается условие симметрии остатков $\boldsymbol{\sum_{i=1}^{n} e_i = 0}$. Кроме того, постулируется, что в статистически обследованном диапазоне пористости остатки имеют нормальное распределение с однородными дисперсиями. Чтобы использовать процедуру МНК для определения коэффициентов $\boldsymbol{b_0}$ и $\boldsymbol{b_1}$ зависимостей (3) и (4) они путем соответствующих преобразований приводились к линейному виду (линеаризовались).

Для зависимости (2) были найдены МНК-оценки коэффициентов парной линейной регрессии $\boldsymbol{b_1 = cov\,(\mu, P)/s_P^2 = -114,78}$ и $\boldsymbol{b_0 = \bar{\mu} - b_1 \bar{P} = 37,277}$, которые по критерию Стьюдента при уровне значимости $\boldsymbol{\alpha = 0,05}$ и $\boldsymbol{n - 2 = 9}$ степенях свободы являются статистически значимыми. Из соотношения для $\boldsymbol{b_0}$ следует, что между коэффициентами $\boldsymbol{b_0}$ и $\boldsymbol{b_1}$ существует корреляционная зависимость.

Итак, по данным выборки построена эмпирическая линейная зависимость

$$\hat{\boldsymbol{\mu}} = \boldsymbol{37,277 - 114,78P (0,163 \le P \le 0,225)}, \qquad (5)$$

которая проходит через точку $\boldsymbol{(\bar{P}, \bar{\mu})}$ и является формальной аппроксимацией для неизвестной функции регрессии.

Для оценки эффективности линейной регрессии (5) была определена остаточная дисперсия $\boldsymbol{s_e^2 = \frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n} e_i^2 = 2,894}$, имеющая $\boldsymbol{v_2 = n - 2 = 9}$ степеней свободы и характеризующая рассеяние опытных данных относительно линии регрессии, и выборочный критерий Фишера $\boldsymbol{F = s_{\mu}^2/s_e^2 = 2,307}$, который показывает во сколько раз рассеяние $\boldsymbol{s_{\mu}^2}$ относительно среднего $\boldsymbol{\bar{\mu}}$ превышает рассеяние $\boldsymbol{s_e^2}$ относительно линии регрессии (5). Полученное значение F сравнивается с табличным $\boldsymbol{F_{\alpha,\nu_1,\nu_2}}$ для выбранного уровня значимости $\boldsymbol{\alpha}$ и чисел степеней свободы $\boldsymbol{v_1}$ и $\boldsymbol{v_2}$. Имеем табличные значения F-критерия $\boldsymbol{F_{0,05;10,9} = 3,14}$ и $\boldsymbol{F_{0,10;10,9} = 2,42}$. Видим, что выборочный F-критерий не превышает табличного даже при уровне значимости $\boldsymbol{\alpha = 0,10}$, и с точки зрения интерполяции говорить об эффективности уравнения регрессии (5) не приходится. Кроме того, его нельзя использовать с целью экстраполяции, так как уже при пористости $\boldsymbol{P \ge 0,316}$ вычисленный показатель $\boldsymbol{\hat{\mu} \le 1}$.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-79-87

Исходя из физической сущности линейная зависимость (2) должна проходить не только через условный центр выборки $(\bar{P} = \mathbf{0,1991}; \bar{\mu} = \mathbf{14,436})$, но и точку $(\boldsymbol{P = 1, \mu = 1})$. Тогда из геометрических соображений находим коэффициент $\boldsymbol{b_1 = -(\bar{\mu} - 1)/(1 - \bar{P}) = -16,77}$ и коэффициент $\boldsymbol{b_0 = \bar{\mu} - b_1\bar{P} = 17,77}$. В результате приходим к следующей полуэмпирической линейной зависимости

$$\hat{\mu} = 17{,}77 - 16{,}77P(0 < P < 1), \qquad (6)$$

которая делает возможной экстраполяцию. Однако в этом случае остаточная дисперсия $\boldsymbol{s_e^2 = 6,193}$ приблизилась к дисперсии относительно среднего $\boldsymbol{s_\mu^2}$ и качество интерполяции ухудшилось. Таким образом, как формальная (5), так и неформальная (6) аппроксимации не дали желаемых результатов.

Обратимся к зависимости логарифмического вида (3), которая с помощью преобразования $\boldsymbol{P' = lnP}$ приводится к линейному виду $\boldsymbol{\hat{\mu} = b_0 + b_1P'}$. Для этой линеаризованной зависимости были найдены МНК-оценки коэффициентов: $\boldsymbol{b_0 = -21,749}$ и $\boldsymbol{b_1 = -22,37}$, при которых не была нарушена симметрия остатков $(\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{e_i = 0})$. В результате имеем эмпирическую зависимость логарифмического вида

$$\hat{\mu} = -21{,}749 - 22{,}37lnP(0{,}163 \le P \le 0{,}225). \qquad (7)$$

Для этой зависимости была определена дисперсия $\boldsymbol{s_e^2 = 2,795}$ и критерии Фишера $\boldsymbol{F = s_\mu^2/s_e^2 = 2,388}$, который при уровне значимости $\boldsymbol{\alpha = 0,10}$ не превышает табличного $\boldsymbol{F_{0,10;10,9} = 2,42}$. Следовательно, эмпирическую формулу (7) нельзя признать эффективной даже для целей интерполяции. Не годится она и для решения экстраполяционных задач, так как при $\boldsymbol{P \ge 0,362}$ коэффициент $\boldsymbol{\hat{\mu} \le 1}$ и условие $(\boldsymbol{P = 1, \mu = 1})$ не выполняется.

Возможность экстраполяции можно обеспечить, если линеаризованная зависимость будет иметь такие значения коэффициентов $\boldsymbol{b_0}$ и $\boldsymbol{b_1}$, при которых она проходит через точки $(\bar{P}', \bar{\mu})$ и (0,1). Тогда из геометрических соображений находим коэффициент $\boldsymbol{b_1 = (\bar{\mu} - 1)/\bar{P}' = -8,307}$, а затем коэффициент $\boldsymbol{b_0 = \bar{\mu} - b_1\bar{P}' = 1}$. В результате имеем следующую полуэмпирическую зависимость

$$\bar{\mu} = 1 - 8{,}307lnP(0 < P < 1), \qquad (8)$$

для которой остаточная дисперсия $\boldsymbol{s_e^2 = 4,622}$ превышает остаточную дисперсию $\boldsymbol{s_e^2 = 2,796}$, полученную при использовании эмпирической формулы (7), и качество интерполяции ухудшилось. В итоге, логарифмическое приближение, как эмпирическое (7), так и полуэмпирическое (8), не дали удовлетворительного результата.

И наконец, была рассмотрена зависимость степенного вида (4). Путем логарифмирования она была преобразована к линейному виду $\boldsymbol{\mu' = b'_0 + b_1P'}$, где $\boldsymbol{\mu' = ln\mu, b_0' = lnb_0}$ и $\boldsymbol{P' = lnP}$. Выборочные средние преобразованных переменных имели значения: $\boldsymbol{\bar{\mu}' = 2,6565}$ и $\boldsymbol{\bar{P}' = -1,6175}$. Найденные МНК-оценки коэффициентов минимизирующих сумму квадратов остатков преобразованного показателя $\boldsymbol{\mu'}$ равнялись: $\boldsymbol{b_0' = 0,320424}$ и $\boldsymbol{b_1 = -1,4442}$. Для линеаризованного уравнения соблюдалось условие симметрии остатков $\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{e_i = 0}$.

Далее определили коэффициент $\boldsymbol{b_0 = e^{b_0'} = 1,3777}$ степенной зависимости (4) (e – основание натурального логарифма, принятое равным 2,7183). При коэффициентах $\boldsymbol{b_0 = 1,3777}$ и $\boldsymbol{b_1 = -1,4442}$ зависимость (4) имела асимметрию остатков. Сумма положительных остатков превышала сумму отрицательных на +11,5 % (следствие процедуры линеаризации). Поэтому рекомендуется [24] производить уточнение оценок коэффициентов. Итеративным путем были подобраны коэффициенты $\boldsymbol{b_0 = 1,378}$ и $\boldsymbol{b_1 = -1,447}$, при которых симметрия остатков соблюдалась. В результате искомая эмпирическая зависимость приобрела вид

$$\hat{\mu} = 1{,}378P^{-1{,}447}(0{,}163 \le P \le 0{,}225). \qquad (9)$$

Зависимость (9) характеризуется самой низкой остаточной дисперсией $\boldsymbol{s_e^2 = 2,679}$ и средним квадратичным (или стандартным) отклонением $\boldsymbol{s_e = \sqrt{s_e^2} = 1,637}$, которое является основной оценкой точности аппроксимационного варианта регрессионной модели. Выборочный критерий Фишера $\boldsymbol{F = 2,492}$ оказался больше табличного $\boldsymbol{F_{0,10;10;9} = 2,42}$. При таком соотношении с доверительной вероятностью $\boldsymbol{1 - \alpha = 1 - 0,10 = 0,90}$ зависимость (9) можно считать эффективной с точки зрения интерполяции несмотря на довольно узкий диапазон изменения пористости.

Проверку допущений о характере распределения остатков выполнили по рекомендациям Дэниела [26] согласно которым были построены графики эмпирического кумулятивного распределения $\boldsymbol{n = 11}$ остатков $(\boldsymbol{e_i = \mu_i - \hat{\mu}_i; i = 1, 2, \dots, n})$ уравнения (9) на нормальной сетке и зависимости тех же остатков от предсказанных значений показателя $\boldsymbol{\hat{\mu}}$, представленные на рисунках 2 и 3. Построение графика эмпирического кумулятивного распределения (рисунок 2) осуществляется с помощью табличных значений q-квантилей $\boldsymbol{U_q}$ стандартного нормального распределения [24, 25]. Например, для шестого остатка, лежащего на вертикальной оси симметрии, $\boldsymbol{q = 0,5}$ и квантиль $\boldsymbol{U_{0,5} = 0}$. Все остатки имеют одинаковую вероятность $\boldsymbol{q = 1/n = 0,091}$. Тогда для седьмого остатка $\boldsymbol{q = 0,5 + 0,091 = 0,591}$ и квантиль $\boldsymbol{U_{0,591} = 0,23}$, для восьмого остатка $\boldsymbol{q = 0,5 + 2 \cdot 0,091 = 0,682}$ и $\boldsymbol{U_{0,682} = 0,4733}$ и т. д. При нахождении q-квантилей для значений $\boldsymbol{q < 0,5}$ используется соотношение $\boldsymbol{U_q = -U_{1-q}}$. Например, для пятого остатка $\boldsymbol{q = 0,5 - 0,091 = 0,409}$ и $\boldsymbol{U_{0,409} = -U_{1-0,409} = -U_{0,591} = -0,23}$ и т. д. Пунктирные вертикальные линии имеют квантили: $\boldsymbol{U_{0,84134} = 1}$ и $\boldsymbol{-U_{0,84134} = -1}$. Наклонная прямая пересекает пунктирные линии при $\boldsymbol{\pm s_e = \pm 1,637}$.

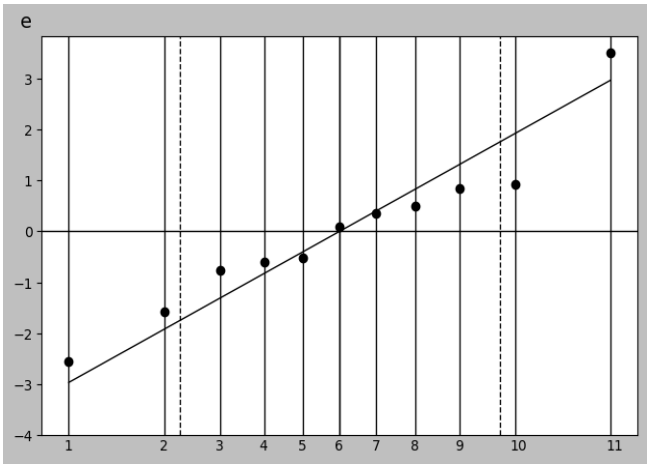


Рисунок 2 – Эмпирическое кумулятивное распределение 11 остатков уравнения (9) на нормальной сетке

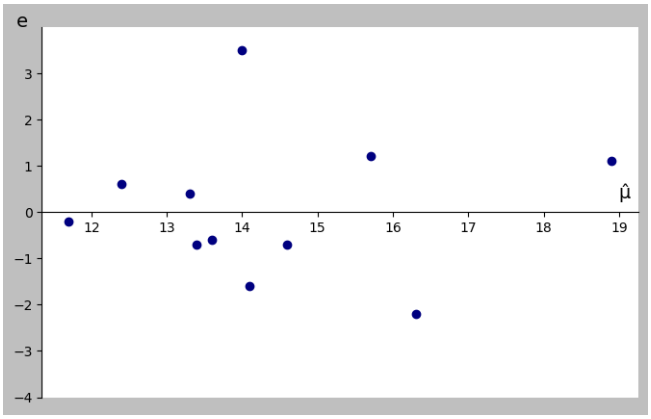


Рисунок 3 – Зависимость остатков e от предсказанного значения $\boldsymbol{\hat{\mu}}$

Из рисунка 2 видно, что остатки не имеют существенных (аномальных) отклонений от наклонной прямой и допущение о нормальности их распределения можно принять. На рисунке 3 графически

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-79-87

представлена зависимость остатков от предсказанных значений $\hat{\mu}$ (диаграмма Энскомба-Тьюки [26]) и видно, что остатки не выявляют тенденции к изменению с изменением значений $\hat{\mu}$ и поэтому допущение об однородности дисперсий также можно принять. Таким образом, соблюдены все условия необходимые для получения оптимальных оценок коэффициентов $\boldsymbol{b_0}$ и $\boldsymbol{b_1}$ степенной зависимости (9). Однако ее экстраполяционные возможности в какой-то мере сомнительны, так как не выполняется условие $(\boldsymbol{P = 1, \mu = 1})$. Зависимость (9) при P=1 дает смещенное значение $\hat{\mu} = \mathbf{1,378}$.

Устраним это смещение геометрическим путем, используя координаты центра выборки преобразованных переменных $(\bar{P}' = -\mathbf{1,6175}$ и $\bar{\mu}' = \mathbf{2,6565})$ и начало координат $(\boldsymbol{ln(P = 1) = 0}$ и $\boldsymbol{ln(\mu = 1) = 0})$. Тогда имеем коэффициенты линеаризованного уравнения $\boldsymbol{b_1 = \bar{\mu}'/\bar{P}' = -1,642}$ и $\boldsymbol{b_0' = \bar{\mu}' - b_1\bar{P}' = 0}$. Следовательно, коэффициенты степенного уравнения (4) равны $\boldsymbol{b_1 = -1,642}$ и $\boldsymbol{b_0 = e^{b_0'} = 1}$. При такой аппроксимации имеем асимметрию остатков (+7,3%), которая устраняется после уточнения значения коэффициента $\boldsymbol{b_1 = -1,644}$. В итоге получим полуэмпирическое приближение, претендующее на весь возможный диапазон пористости,

$$\hat{\mu} = P^{-1,644} (0 < P < 1). \qquad (10)$$

Для этой зависимости остаточная дисперсия $\boldsymbol{s_e^2 = 2,719}$, стандартное отклонение $\boldsymbol{s_e = \sqrt{s_e^2} = 1,649}$ и выборочный критерий Фишера $\boldsymbol{F = 2,455}$, превышающий табличное значение $\boldsymbol{F_{0,10;10;9} = 2,42}$, остались практически такими же, как и для эмпирического уравнения (9). Анализ эмпирического кумулятивного распределения остатков уравнения (10) на нормальной сетке и диаграммы Энскомба-Тьюки привел к выводам, которые были сделаны в отношении эмпирического уравнения регрессии (9). Таким образом, из построенных трех полуэмпирических зависимостей (6), (8) и (10) степенная зависимость (10), обоснованная физически и статистически, дала лучшие результаты.

Аналогичным образом были проанализированы еще три выборки. Первая из них содержала $\boldsymbol{n = 9}$ пар измерений пористости P и коэффициента сопротивления диффузии $\boldsymbol{\mu}$ для песчаника [12]. Во второй и третьей выборках одинакового объема $\boldsymbol{n = 8}$ рассматривались различные типы осадочных пород [9]. Во всех случая измерение показателя $\boldsymbol{\mu}$ выполнялось методом электропроводимости.

На основе данных каждой из выборок были построены полуэмпирические зависимости, наиболее точно аппроксимирующие измеренные значения показателя $\boldsymbol{\mu}$. При этом использовались процедуры и принципы, описанные при построении полуэмпирической степенной зависимости (10). В результате данные первой выборки были аппроксимированы полуэмпирический зависимостью степенного типа

$$\hat{\mu} = P^{-1,76} (0 < P < 1), \qquad (11)$$

которая близка другой степенной зависимости (10).

Данные второй выборки аппроксимированы полуэмпирической зависимостью логарифмического типа

$$\hat{\mu} = 1 - 8,175 lnP (0 < P < 1), \qquad (12)$$

которая практически совпала с логарифмической зависимостью (8).

Полуэмпирическая логарифмическая зависимость оказалась лучшей и при аппроксимации данных третьей выборки

$$\hat{\mu} = 1 - 4,136 lnP (0 < P < 1). \qquad (13)$$

Основные статистические характеристики рассмотренных выборок объема n и соответствующих полуэмпирических зависимостей приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Статистические характеристики выборок и полуэмпирических зависимостей: n – объем выборки, $[\mathrm{P_{min}}, \mathrm{P_{max}}]$ – интервал открытой пористости, $\bar{\mathrm{P}}$ и $\bar{\mu}$ – средние значения пористости и коэффициента сопротивления, s_μ^2 – дисперсия относительно $\bar{\mu}$ со степенью свободы $\mathrm{v_1 = n - 1}$, s_e^2 – остаточная дисперсия со степенью свободы $\mathrm{v_2 = n - 2}$, $\mathrm{F = s_\mu^2 / s_e^2}$ – выборочный критерий Фишера, $\mathrm{F_{\alpha,v_1,v_2}}$ – табличный критерий Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и степенях свободы числителя $\mathrm{v_1}$ и знаменателя $\mathrm{v_2}$

№ выборки	n	$[P_{min}, P_{max}]$	$\bar{P}$	$\bar{\mu}$	s_μ^2	Зависимость	s_e^2	F	F_{α,v_1,v_2}
1	9	[0,122; 0,209]	0,173	23,755	89,320	(11)	4,619	21,425	3,73
2	8	[0,27; 0,90]	0,551	6,511	19,383	(12)	1,758	11,026	4,21
3	8	[0,42; 0,93]	0,648	2,976	1,642	(13)	0,087	18,874	4,21

Из таблицы 2 следует, что при переходе от одной выборки к другой значения рассмотренных статистических характеристик (кроме F-критерия) отличаются в разы. Можно с уверенностью утверждать, что увеличение пористости P приводит к существенному уменьшению остаточной дисперсии $\boldsymbol{s_e^2}$. Выборочные значения F-критерия в разы превышают табличные значения $\boldsymbol{F_{\alpha,v_1,v_2}}$, что свидетельствует о высокой эффективности аппроксимации опытных данных приведенными зависимостями. Наиболее эффективной оказалась степенная зависимость (11).

Таким образом, построенные зависимости успешно решают задачу интерполяции. Такой вывод подтверждается рисунком 4, за пределами которого есть еще две опытных точки первой выборки, предсказываемые зависимостью (11) с высокой точностью. При пористости $\boldsymbol{P = 0,122}$ имеем остаток $\boldsymbol{\mu - \hat{\mu} = 40,58 - 40,55 = -0,03}$, а при $\boldsymbol{p = 0,129}$ получим $\boldsymbol{\mu - \hat{\mu} = 36,57 - 36,76 = -0,19}$. Однако задачу экстраполяции построенные модели решают поразному. Из рисунка 4 видно, что зависимость (11) довольно точно аппроксимирует опытные данные не только первой выборки (низкая пористость), которые использовались при ее построении, но и опытные данные третьей выборки (высокая пористость). Однако все опытные точки второй выборки $(\boldsymbol{0,27 \le P \le 0,90})$, аппроксимированные зависимостью (12), находятся значительно выше кривой зависимости (11). Например, опытному значению $\boldsymbol{\mu = 11,08}$ при $\boldsymbol{P = 0,39}$ из второй выборки соответствует рассчитанное по формуле (11) значение $\boldsymbol{\hat{\mu} = 5,24}$, а при $\boldsymbol{P = 0,6}$ имеем $\boldsymbol{\mu = 4,44}$ и $\boldsymbol{\hat{\mu} = 2,45}$.

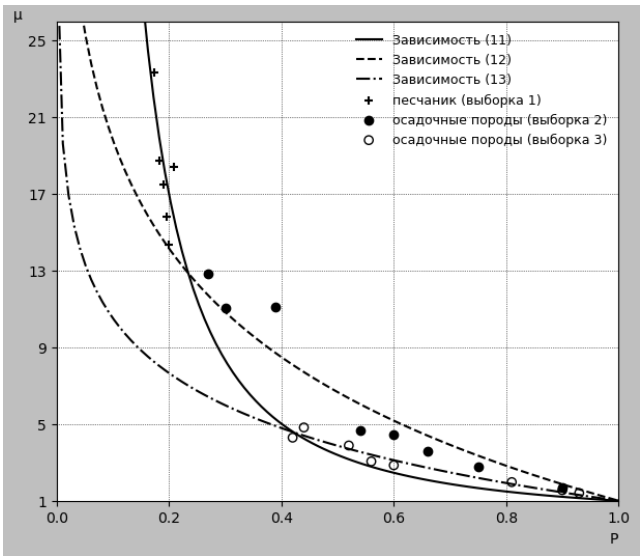


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента сопротивления зии $\boldsymbol{\mu}$ от пористости P

Наихудшую экстраполяционную способность демонстрирует зависимость (13). Так, опытные значения $\boldsymbol{\mu}$ первой и второй выборок,

находящиеся в интервале пористости [0,122; 0,39], в разы превышают расчетные значения $\hat{\mu}$. На левой границе этого интервала $\boldsymbol{P = 0,122}$ имеем $\boldsymbol{\mu = 40,58}$, что в 4,18 раз превышает значение $\hat{\mu} = \mathbf{9,70}$, найденное по формуле (13). На правой границе $\boldsymbol{P = 0,39}$ отношение $(\boldsymbol{\mu = 11,08})/(\hat{\mu} = \mathbf{4,89})$ равно 2,27. Подобная ситуация складывается при рассмотрении опытных данных, приведенных в таблице 1 или на рисунке 1 и аппроксимированных степенной зависимостью (10).

Таким образом, при эмпирическом подходе трудно рекомендовать какую-либо из построенных эмпирических и полуэмпирических зависимостей для расчета коэффициента сопротивления $\hat{\mu}$, которая бы удовлетворительно предсказывала опытные значения $\boldsymbol{\mu}$ во всем возможном диапазоне пористости $(\mathbf{0 < P < 1,0})$. Кроме того, опытные данные имеют неизвестную систематическую ошибку, связанную с наличием замкнутых газовых включений. Попытаемся решить эту задачу с помощью теоретического подхода.

Теоретический подход к построению формул для определения коэффициента сопротивления диффузии

При построении зависимостей для определения коэффициента сопротивления диффузии $\boldsymbol{\mu}$ будем использовать методы теории обобщенной проводимости в сочетании с геометрическим моделированием структуры материала [16, 17], которую можно рассматривать как изотропную бинарную систему из взаимопроникающих компонент (твердый скелет и открытое поровое пространство, заполненное проводником). При этом считаем, что только вторая компонента участвует в переносе вещества. Реальная структура материала заменяется адекватной ей моделью с упорядоченной структурой, состоящей из одинаковых элементарных ячеек кубической формы. Симметрия элементарной ячейки позволяет проводить описание исследуемого процесса в 1/8 ее части, изображенной на рисунке 5.

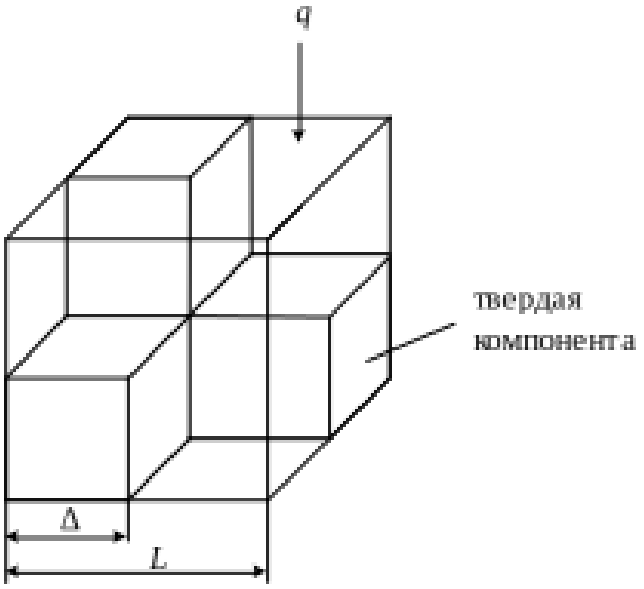


Рисунок 5 – Восьмая часть кубической элементарной ячейки и направление потока диффундирующих частиц q

Поскольку твердая компонента ячейки имеет стержни постоянного поперечного сечения $\boldsymbol{\Delta^2}$, то ее объем равен

$$V_1 = 3\Delta^2(L - \Delta) + \Delta^3, \tag{14}$$

а объемная концентрация

$$m_1 = V_1/L^3 = 3c^2(1 - c) + c^3 = c^2(3 - 2c), \tag{15}$$

где $c = \Delta/L$ – относительный размер твердого стержня равный положительному корню кубического уравнения (15)

$$\mathrm{c} = 0{,}5 + sin\left[\frac{arcsin(2m_1 - 1)}{3}\right]. \tag{16}$$

По определению объемная концентрация открытых пор (пористость) равна

$$m_2 = 1 - m_1 = 1 - c^2(3 - 2c). \tag{17}$$

Рассмотрим поток диффундирующих частиц сквозь элементарную ячейку поделенную адиабатическими (непроницаемыми) плоскостями параллельно потоку. Из рисунка 5 следует, что этот поток возможен только по прямолинейному каналу, имеющему длину L и постоянную площадь поперечного сечения $S = (L - \Delta)^2$. В таком случае, согласно [16,17], сопротивление потоку диффундирующих частиц определяется по формуле

$$R = \frac{L}{k \cdot S} = \frac{1}{kL(1-c)^2}, \tag{18}$$

где k – коэффициент проводимости, который может быть равен коэффициенту паропроницаемости воздуха δ_0, либо удельной электропроводности электролита σ_o.

При отсутствии твердого скелета сопротивление потоку q ячейки объема L^3 равно

$$R_0 = \frac{L}{kL^2} = \frac{1}{kL}. \tag{19}$$

Отношение $\boldsymbol{R/R_0}$ дает верхнюю оценку коэффициента сопротивления диффузии элементарной ячейки при ее адиабатическом делении

$$\mu_a = \frac{1}{(1-c)^2}. \tag{20}$$

Далее покажем вывод зависимости для определения коэффициента сопротивления диффузии той же элементарной ячейки при ее делении изопотенциальными плоскостями перпендикулярными потоку q. В таком случае элементарная ячейка, приведенная на рисунке 5, будет поделена на два слоя различной толщины. Сопротивление потоку q верхнего слоя толщиной $L - \Delta$ с поперечным сечением $S_1 = L^2 - \Delta^2$ равно

$$R_1 = \frac{L - \Delta}{k(L^2 - \Delta^2)} = \frac{1 - c}{kL(1 - c^2)} \tag{21}$$

и нижнего слоя толщиной Δ с поперечным сечением $S_2 = (L - \Delta)^2$

$$R_2 = \frac{\Delta}{k(L-\Delta)^2} = \frac{c}{kL(1-c)^2}. \tag{22}$$

С учетом формул (19), (21) и (22) находим нижнюю оценку коэффициента сопротивления диффузии элементарной ячейки при ее изопотенциальном делении

$$\mu_u = (R_1 + R_2)/R_o = \frac{1-c}{1-c^2} + \frac{c}{(1-c)^2}. \tag{23}$$

Опираясь на данные работы [17, с. 29], в качестве окончательной оценки коэффициента сопротивления диффузии для элементарной ячейки (материала) принимаем среднеарифметическое значение

$$\hat{\mu} = 0{,}5(\mu_a + \mu_u). \tag{24}$$

При сравнении рассчитанных по этим формулам значений коэффициента $\hat{\mu}$ с опытными μ следует учитывать, что измеренная существующими методами открытая пористость P несколько меньше фактической пористости P_a. Как правило, объем образца материала и его открытая пористость, согласно закону Архимеда, определяются путем взвешивания водонасыщенных в вакууме образцов на воздухе и в воде. Этот метод описан, например, в работе [27, с. 36]. Из данного описания следует, что в качестве открытой пористости P принимается влагосодержание образцов $\psi_{vac} = \left(V_{w,vac}/V\right)$, полученное в результате их водонасыщения в вакууме. Здесь V и $V_{w,vac}$ – объем образца и объем воды, впитанной образцом в условиях вакуума, соответственно. В этой же работе [27, с. 46] установлено, что при длительном насыщении образцов песчаника водой их влагосодержание достигает значений ψ_{vac}. Представляется, что при замене воды на электролит (водный раствор некоторых солей) измеренные значения объема и пористости образцов материала будут в обоих случаях одинаковыми.

Как известно [16, 22], при водонасыщении пористого материала влагосодержание его пор ψ_p может достигнуть критического значения ψ_p'', при котором образуются замкнутые паровоздушные включения. Критическое значение влагосодержания пор ψ_p'' зависит от угла смачивания θ жидкостью твердого скелета. На основе

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-79-87

приведенных в [16, с. 134] геометрических моделей элементарной ячейки заполненной жидкостью до критического влагосодержания пор ψ_p'' были получены формулы для расчета объемной концентрации замкнутых газовых включений m_{cr} при углах смачивания $\theta = 0°, 45°$ и $90°$.

При угле смачивания $\theta = 0°$ имеем

$$m_{cr} = \frac{\pi(1-c)^3}{6}, \quad (25)$$

при $\theta = 45°$

$$m_{cr} = \frac{(1-c)^3}{6} \quad (26)$$

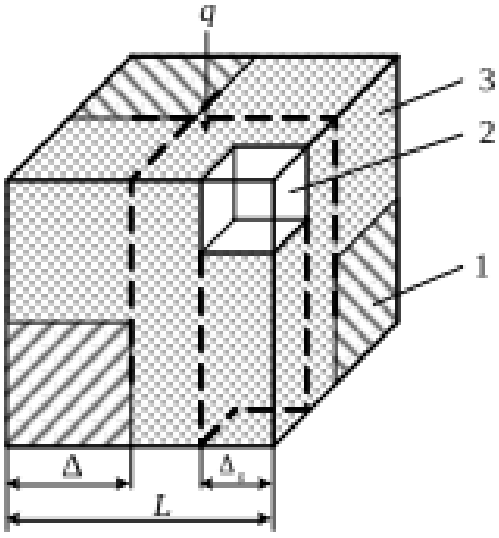
и, наконец, при $\theta = 90°$

$$m_{cr} = \frac{(4-\pi)}{20}(1-c)^3. \quad (27)$$

После вычисления m_{cr} можно в какой-то мере уточнить фактическое значение открытой пористости $P_a = P + m_{cr}$.

Таким образом, пористый материал насыщенный в вакууме жидкостью (электролитом) является трехкомпонентной системой состоящей из твердого скелета, жидкости (взаимопроникающие компоненты) и замкнутых газовых включений со своими объемными концентрациями: $m_1, m_2 = P, m_3 = m_{cr}$. Замкнутые газовые включения следует рассматривать в качестве диэлектрика. В результате объемная концентрация диэлектрика возрастает, а проводника уменьшается и усложняется его геометрия. Это, согласно формуле (1), приведет к завышенной оценке коэффициента сопротивления как в опыте μ, так и при расчете $\hat{\mu}$.

Представляло интерес оценить систематическую ошибку измерения коэффициента μ методом электропроводимости. Для этого необходимо было описать процесс переноса диффундирующих частиц в упомянутой трехкомпонентной системе. Как и ранее реальную структуру материала заменим моделью, состоящей из одинаковых элементарных ячеек кубической формы. Восьмая часть этой ячейки представлена на рисунке 6. Далее такую модель будем использовать при выводе зависимостей для определения коэффициента сопротивления $\hat{\mu}$.



1, 2, 3 – твердая, газовая и жидкая компоненты, соответственно
Рисунок 6 – Восьмая часть кубической элементарной ячейки и направление потока диффундирующих частиц q

Из рисунка 6 видно, что при делении элементарной ячейки адиабатическими плоскостями поток диффундирующих ионов возможен только по прямолинейному каналу поперечного сечения $S = (L-\Delta)^2 - \Delta_g^2$. Повторив преобразования, выполненные при выводе формулы (20), пришли к зависимости, дающей верхнюю оценку коэффициента сопротивления μ элементарной ячейки (см. рисунок 6) при ее делении адиабатическими плоскостями

$$\mu_a = \frac{1}{(1-c)^2 - c_g^2}, \quad (28)$$

где $c_g = \Delta_g / L = \sqrt[3]{m_{cr}}$.

При делении той же элементарной ячейки изопотенциальными плоскостями перпендикулярными потоку q получим три слоя разной толщины равной длине соответствующего прямолинейного канала. Сопротивление потоку q верхнего канала длиной $\boldsymbol{\Delta_g}$ с поперечным сечением $\boldsymbol{S_1 = L^2 - \Delta^2 - \Delta_g^2}$ равно

$$R_1 = \frac{\Delta_g}{\sigma_o(L^2 - \Delta^2 - \Delta_g^2)} = \frac{c_g}{\sigma_o L(1 - c^2 - c_g^2)}, \quad (29)$$

где σ_o – электропроводность электролита.

Сопротивление потоку q среднего канала длиной $\boldsymbol{L - \Delta - \Delta_g}$ с поперечным сечением $\boldsymbol{S_2 = L^2 - \Delta^2}$ равно

$$R_2 = \frac{L - \Delta - \Delta_g}{\sigma_o(L^2 - \Delta^2)} = \frac{1 - c - c_g}{\sigma_o L(1 - c^2)}. \quad (30)$$

И, наконец, определим сопротивление потоку q нижнего канала длиной Δ с поперечным сечением $S_3 = (L - \Delta)^2$:

$$R_3 = \frac{\Delta}{\sigma_o(L-\Delta)^2} = \frac{c}{\sigma_o L(1-c)^2}. \quad (31)$$

В результате получили нижнюю оценку коэффициента сопротивления диффузии элементарной ячейки (см. рисунок 6) при ее изопотенциальном делении

$$\mu_u = (R_1 + R_2 + R_3)/R_o = \frac{c_g}{1 - c^2 - c_g^2} + \frac{1 - c - c_g}{1 - c^2} + \frac{c}{(1-c)^2}, \quad (32)$$

где $\boldsymbol{R_o}$ находится в соответствии с формулой (19).

Окончательная оценка коэффициента сопротивления диффузии принимается равной

$$\hat{\mu} = 0{,}5(\mu_a + \mu_u), \quad (33)$$

Зависимость расчетного коэффициента сопротивления $\hat{\mu}$ трехкомпонентной системы от измеренной пористости $P = m_2$ при различных углах смачивания θ представлена на рисунке 7, из которого видно, что построенные формулы способны достаточно точно предсказывать опытные данные, полученные с помощью метода электропроводимости различными авторами [7–9, 12]. Это лишний раз свидетельствует об эффективности использования подхода, рассмотренного в работах [16, 17], для описания процессов переноса вещества и энергии.

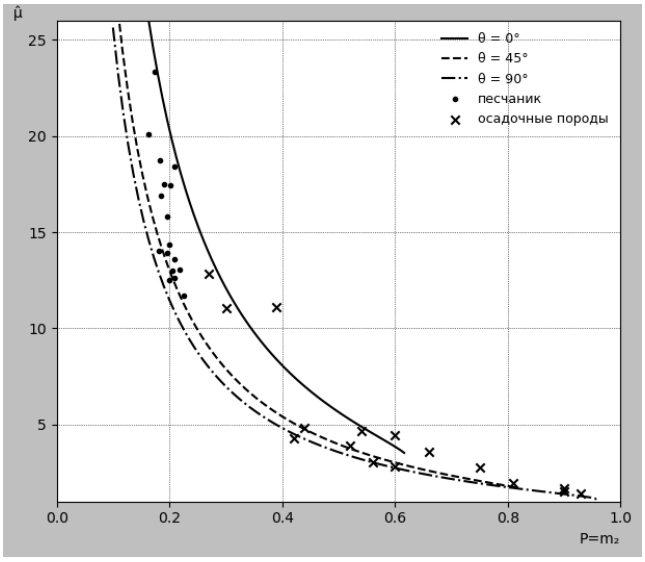


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента сопротивления диффузии $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ от измеренной пористости $\mathbf{P = m_2}$ и принятого угла смачивания $\boldsymbol{\theta}$ для трехкомпонентной системы

Путем расчетов по формулам, полученным для двухкомпонентной и трехкомпонентной систем, можно оценить систематическую ошибку измерения коэффициента $\boldsymbol{\mu}$ методом электропроводимости,

которая связана с наличием замкнутых газовых включений. Например, при фактической открытой пористости $\boldsymbol{P_a = 0,5}$ формулы для двухкомпонентной системы дали значение коэффициента $\hat{\boldsymbol{\mu}} = \boldsymbol{3,3333}$. При пористости $\boldsymbol{P = m_2 = P_a - m_{cr}}$ по формулам для трехкомпонентной системы при угле смачивания $\boldsymbol{\theta = 90°}$ получим значение $\hat{\boldsymbol{\mu}} = \boldsymbol{3,6171}$; при $\boldsymbol{\theta = 45°}$, $\hat{\boldsymbol{\mu}} = \boldsymbol{4,40}$; при $\boldsymbol{\theta = 0°}$, $\hat{\boldsymbol{\mu}} = \boldsymbol{7,117}$. Разделив три значения $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ при разных углах смачивания $\boldsymbol{\theta}$ на $\hat{\boldsymbol{\mu}} = \boldsymbol{3,3333}$, получим три относительные разницы 1,085; 1,320 и 2,135, которые характеризуют систематическую погрешность измерения коэффициента $\boldsymbol{\mu}$. При других значениях пористости $\boldsymbol{P_a}$ получаются практически такие же относительные разницы, свидетельствующие о существенной систематической ошибке измерения коэффициента $\boldsymbol{\mu}$ методом электропроводности.

С учетом сказанного будем считать, что фактическая пористость материала полностью заполнена проводником (паровоздушной смесью или электролитом) и при расчете коэффициента сопротивления $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ использовать формулы (20), (23) и (24), полученные на основе геометрической модели двухкомпонентной системы. При этом в первом приближении можно принять, что фактическая пористость $\boldsymbol{P_a}$ равна измеренной P. Затем, задав угол смачивания $\boldsymbol{\theta}$, с помощью формул (25)–(27) определить $\boldsymbol{m_{cr}}$ и уточнить значение $\boldsymbol{P_a = P + m_{cr}}$. Далее уточненное значение $\boldsymbol{P_a}$ использовать для окончательного расчета коэффициента $\hat{\boldsymbol{\mu}}$.

Заключение

С помощью геометрической модели пористого материала показано, что значение коэффициента сопротивления диффузии $\boldsymbol{\mu}$ зависит только от объемной концентрации проводника диффундирующих частиц и его геометрии. Рассмотрены опытные данные четырех выборок малого объема, которые были получены различными авторами и характеризовали неизвестную зависимость коэффициента $\boldsymbol{\mu}$ капиллярно-пористых материалов от их измеренной открытой пористости P. Измерение коэффициента $\boldsymbol{\mu}$ выполнялось методом электропроводимости, дающим неизвестную систематическую ошибку связанную с наличием замкнутых газовых включений. По данным каждой выборки строились эмпирические и полуэмпирические формулы линейного, логарифмического и степенного видов. Коэффициенты эмпирических формул определялись путем формальной аппроксимации опытных данных с проверкой соблюдения условий необходимых для получения оптимальных оценок этих коэффициентов. Однако эмпирические формулы решали лишь задачу интерполяции. Коэффициенты полуэмпирических формул находились с учетом физической сущности искомой зависимости и опытных данных. Это давало возможность экстраполяции. Из полученных двенадцати полуэмпирических формул были выбраны четыре, которые эффективнее остальных решали задачу как интерполяции, так и экстраполяции. Оказалось, что результаты расчетов по этим формулам при одинаковой пористости P могут отличаться в разы, как и при использовании многочисленных формул других исследователей.

Упомянутый недостаток полуэмпирических формул преодолевался с помощью теоретических формул, построенных на основе теории обобщенной проводимости. При этом реальная структура материала была заменена адекватной ей моделью, состоящей из элементарных ячеек кубической формы. Рассмотрев поток диффундирующих частиц через эту ячейку, поровое пространство которой полностью заполнено проводником, были получены формулы для определения коэффициента $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ двухкомпонентной системы. Для оценки систематической ошибки измерения коэффициента $\boldsymbol{\mu}$ методом электропроводимости была рассмотрена трехкомпонентная система в виде элементарной ячейки, в поровом пространстве которой наряду с жидким проводником содержалось замкнутое газовое включение, и получены формулы для расчета коэффициента $\hat{\boldsymbol{\mu}}$. После сравнения результатов расчета коэффициента $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ по формулам для двух- и трехкомпонентных систем выявлена существенная систематическая ошибка измерения этого коэффициента методом электропроводимости. Поэтому расчет коэффициента $\hat{\boldsymbol{\mu}}$ рекомендуется выполнять по формулам, полученным для двухкомпонентной системы.

Список цитированных источников

1. Blocken, B. J. A review of wind-driven raint research in building science / B. J. Blocken, J. E. Carmeliet // Journal of Wind Engineering and Indistrial Aerodynamics. – 2004. – № 92 (13). – P. 1079–1130.
2. Blocken, B. J. On the validity of the cosine projection in wind-driven rain calculations on buildings / B. J. Blocken, J. E. Carmeliet // Building and Environment. — 2006. – № 41 (9). – P. 1182–1189.
3. Evaluation of the influence of wind-driven rain on moisture in celluar concrete wall boards / A. Alsabry, V. Nikitsin, V. A. Kofanov, B. Backiel-Brzozowska // Int. J. Appl. Mech. Eng. – 2017. – Vol. 22, No. 3. – P. 509–519.
4. Künzel, H. M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameter / H. M. Künzel. – Stuttgart : IRB Verlag, 1995. – 66 p.
5. Ploński, W. Problem wilgoci w przegrodach budowlanych / W. Ploński. – Warszawa : Arkady, 1968. – 156 s.
6. Hygrothermal performance of buildings and materials. Physical quantities for mass transfer : ISO 9346: 2007.– Vocabulary.
7. Carman, P. C. Flow of Gases Through Porous Media / P. C. Carman // Butterworth's London. – 1956. – 179 p.
8. Boudreau, B. P. The diffusive tortuosity of fine-grained unlithified sediments / B. P. Boudreau // Geeochimica et Cosmochimica Acta. – 1996. – Vol. 60, No. 16. – P. 3139–3142.
9. Shen, L. Critical review of the impact of tortuosity on diffusion / L. Shen, Z. Chen // Chemical Eng. Science. – 2007. – No. 62. – P. 3748–3755.
10. Гурьев, В. В. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет / В. В. Гурьев, В. С. Жолудов, В. Г. Петров-Денисов. – М. : Стройиздат, 2003. – 416 с.
11. Abdulsada, S. A. Badania opornosci elektrycznej zbrojonego betonu klasy XD3 a azotatnem wapnia i superplastyfikatorami pod kątem korozji zbrojenia powodowanej przez chlorki / S. A. Abdulsada, T. I. Török // Cement, Wapno, Beton. – 2020. – No. 25. – S. 330–343.
12. Pore-Size Distributions and Tortuosity in Heterogeneous Porous Media / L. L. Latour, R. L Kleinberg, P. P. Mitra, C. H. Sotak // Journal of Magnetic Resonance. – 1995. – Series A112. – P. 83–91.
13. Sevostianova, E. Quantative characterization of the microstructure of a porous material in the context of tortuosity / E. Sevostianova, B. Leinauer, I. Sevostianov // Int. Journal of Engineering Science. – 2010. – No. 48. – P. 1693–1701.
14. Epstein, N. On tortuosity and tortuosity factor in flow and diffusion through porous media / N. Epstein // Chemical Eng. Science. – 1989. – No. 44 (3). – P. 777–779.
15. Nikitsin, V. I. Determination of capillary tortuosity coefficient in calculations moisture transfer in building materials / V. I. Nikitsin, B. Backiel-Brzozowska // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2013. – No. 56. – P. 30–34.
16. Дульнев, Г. Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г. Н. Дульнев, В. В. Новиков. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
17. Дульнев, Г. Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.
18. Budownictwo ogólne: praca zbiorowa. Fizyka budowli / pod. kier. P. Klemma. – Warszawa : Arkady, 2005. – Vol. 2. – 1152 s.
19. Афонин, А. В. Вычисление паропроницаемости капиллярно-пористых материалов с учетом течения сорбционных пленок и конденсата / А. В. Афонин, В. И. Никитин // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2003. – № 1. – С. 34–40.
20. A Model of Moist Polymer Foam and a Scheme for the Calculation of its Thermal Conductivity / V. I. Nikitsin, V. A. Kofanov, A. Alsabry, B. Backiel-Brzozowska // Energies. – 2020. – Vol. 13. – P. 520. – DOI: 10.3390/en13030520.
21. An analysis of relations for determining the tyhermal conductivity of rigid polymer foams / A. Alsabry, V. I. Nikitsin, V. A. Kofanov, B. Backiel-Brzozowska // Int. J. of Applied Mechanics and Engineering. – 2018. – Vol. 23, No. 4. – P. 1015–1023.

22. Alsabry, A. Dependencies for Determining the Thermal Conductivity of Moist Capillary-Porous Materials / A. Alsabry, B. Backiel-Brzozowska, V. I. Nikitsin // Energies. – 2020. – Vol. 13. – P. 3211. – DOI: 10.3390/en13123211.
23. Васильев, Л. Л. Теплофизические свойства пористых материалов / Л. Л. Васильев, С. А. Танаева. – Минск : Наука и техника, 1971. – 266 с.
24. Айвазян, С. А. Прикладная статистика: Исследование зависимостей / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М. : Финансы и статистика, 1985. – 487 с.
25. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы обработки данных ; пер. с англ. / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М. : Мир, 1980. – 510 с.
26. Дэниел, К. Применение статистики в промышленном эксперименте ; пер. с англ. / К. Дэниел. – М. : Мир, 1979. – 300 с.
27. Janz, M. Methods of measuring the moisture diffusitivity of high moisture levels. Report TVBM-3076, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials / M. Janz. – Lund, Sweden, 1997. – 73 p.
28. Equations for Calculating the Thermal Conductivity of Capillary-Porous Materials with over Sorption Moisture Content / A. Alsabry, V. I. Nikitsin, S. K. Nikitsin, B. Backiel-Brzozowska // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – P. 5796. – DOI: 10.3390/su14105796.

References

1. Blocken, B. J. A review of wind-driven raint research in building science / B. J. Blocken, J. E. Carmeliet // Journal of Wind Engineering and Indistrial Aerodynamics. – 2004. – № 92 (13). – P. 1079–1130.
2. Blocken, B. J. On the validity of the cosine projection in wind-driven rain calculations on buildings / B. J. Blocken, J. E. Carmeliet // Building and Environment. — 2006. – № 41 (9). – P. 1182–1189.
3. Evaluation of the influence of wind-driven rain on moisture in celluar concrete wall boards / A. Alsabry, V. Nikitsin, V. A. Kofanov, B. Backiel-Brzozowska // Int. J. Appl. Mech. Eng. – 2017. – Vol. 22, No. 3. – P. 509–519.
4. Künzel, H. M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameter / H. M. Künzel. – Stuttgart : IRB Verlag, 1995. – 66 p.
5. Płoński, W. Problem wilgoci w przegrodach budowlanych / W. Płoński. – Warszawa : Arkady, 1968. – 156 s.
6. Hygrothermal performance of buildings and materials. Physical quantities for mass transfer : ISO 9346: 2007.– Vocabulary.
7. Carman, P. C. Flow of Gases Through Porous Media / P. C. Carman // Butterworth's London. – 1956. – 179 p.
8. Boudreau, B. P. The diffusive tortuosity of fine-grained unlithified sediments / B. P. Boudreau // Geeochimica et Cosmochimica Acta. – 1996. – Vol. 60, No. 16. – P. 3139–3142.
9. Shen, L. Critical review of the impact of tortuosity on diffusion / L. Shen, Z. Chen // Chemical Eng. Science. – 2007. – No. 62. – P. 3748–3755.
10. Gur'ev, V. V. Teplovaya izolyaciya v promyshlennosti. Teoriya i raschet / V. V. Gur'ev, V. S. ZHoludov, V. G. Petrov-Denisov. – M. : Strojizdat, 2003. – 416 s.
11. Abdulsada, S. A. Badania opornosci elektrycznej zbrojonego betonu klasy XD3 a azotatnem wapnia i superplastyfikatorami pod kątem korozji zbrojenia powodowanej przez chlorki / S. A. Abdulsada, T. I. Török // Cement, Wapno, Beton. – 2020. – No. 25. – S. 330–343.
12. Pore-Size Distributions and Tortuosity in Heterogeneous Porous Media / L. L. Latour, R. L Kleinberg, P. P. Mitra, C. H. Sotak // Journal of Magnetic Resonance. – 1995. – Series A112. – P. 83–91.
13. Sevostianova, E. Quantative characterization of the microstructure of a porous material in the context of tortuosity / E. Sevostianova, B. Leinauer, I. Sevostianov // Int. Journal of Engineering Science. – 2010. – No. 48. – P. 1693–1701.
14. Epstein, N. On tortuosity and tortuosity factor in flow and diffusion through porous media / N. Epstein // Chemical Eng. Science. – 1989. – No. 44 (3). – P. 777–779.
15. Nikitsin, V. I. Determination of capillary tortuosity coefficient in calculations moisture transfer in building materials / V. I. Nikitsin, B. Backiel-Brzozowska // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2013. – No. 56. – P. 30–34.
16. Dul'nev, G. N. Processy perenosa v neodnorodnyh sredah / G. N. Dul'nev, V. V. Novikov. – L. : Energoatomizdat, 1991. – 248 s.
17. Dul'nev, G. N. Teploprovodnost' smesej i kompozicionnyh materialov / G. N. Dul'nev, YU. P. Zarichnyak. – L. : Energiya, 1974. – 264 s.
18. Budownictwo ogólne: praca zbiorowa. Fizyka budowli / pod. kier. P. Klemma. – Warszawa : Arkady, 2005. – Vol. 2. – 1152 s.
19. Afonin, A. V. Vychislenie paropronicaemosti kapillyarno-poristyh materialov s uchetom techeniya sorbcionnyh plenok i kondensata / A. V. Afonin, V. I. Nikitin // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2003. – № 1. – S. 34–40.
20. A Model of Moist Polymer Foam and a Scheme for the Calculation of its Thermal Conductivity / V. I. Nikitsin, V. A. Kofanov, A. Alsabry, B. Backiel-Brzozowska // Energies. – 2020. – Vol. 13. – P. 520. – DOI: 10.3390/en13030520.
21. An analysis of relations for determining the tyhermal conductivity of rigid polymer foams / A. Alsabry, V. I. Nikitsin, V. A. Kofanov, B. Backiel-Brzozowska // Int. J. of Applied Mechanics and Engineering. – 2018. – Vol. 23, No. 4. – P. 1015–1023.
22. Alsabry, A. Dependencies for Determining the Thermal Conductivity of Moist Capillary-Porous Materials / A. Alsabry, B. Backiel-Brzozowska, V. I. Nikitsin // Energies. – 2020. – Vol. 13. – P. 3211. – DOI: 10.3390/en13123211.
23. Vasil'ev, L. L. Teplofizicheskie svojstva poristyh materialov / L. L. Vasil'ev, S. A. Tanaeva. – Minsk : Nauka i tekhnika, 1971. – 266 s.
24. Ajvazyan, S. A. Prikladnaya statistika: Issledovanie zavisimostej / S. A. Ajvazyan, I. S. Enyukov, L. D. Meshalkin. – M. : Finansy i statistika, 1985. – 487 s.
25. Dzhonson, N. Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke: Metody obrabotki dannyh ; per. c angl. / N. Dzhonson, F. Lion. – M. : Mir, 1980. – 510 s.
26. Deniel, K. Primenenie statistiki v promyshlennom eksperimente ; per. s angl. / K. Deniel. – M. : Mir, 1979. – 300 s.
27. Janz, M. Methods of measuring the moisture diffusitivity of high moisture levels. Report TVBM-3076, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials / M. Janz. – Lund, Sweden, 1997. – 73 p.
28. Equations for Calculating the Thermal Conductivity of Capillary-Porous Materials with over Sorption Moisture Content / A. Alsabry, V. I. Nikitsin, S. K. Nikitsin, B. Backiel-Brzozowska // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – P. 5796. – DOI: 10.3390/su14105796.

Материал поступил 11.11.2025, одобрен 17.12.2025, принят к публикации 26.01.2026

УДК 044.942+624.01

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЕРИФИКАЦИИ И ВАЛИДАЦИИ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. В. Тур[1], В. В. Надольский[2]

[1]Д. т. н., профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: tur.s320@mail.ru
[2]К. т. н., доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции имени доктора технических наук, профессора Т. М. Пецольда», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: Nadolski@mail.ru

Реферат

Численные методы анализа, применяемые для имитационного моделирования конструкций, становятся ключевым инструментом проектирования и оценки строительных объектов, особенно при разработке новых и сложных инженерных конструктивных систем. Однако достоверность и точность результатов численных методов анализа напрямую определяет уровень надёжности строительных сооружений. В статье представлена комплексная методология тестирования достоверности и точности имитационных моделей при применении процедур верификации и валидации. Уточнены и систематизированы основные термины и их определения, относящихся к выполнению процедур верификации и валидации применительно к задачам теории сооружений. Рассмотрены основные этапы разработки численной оценки – от концептуальной и математической формулировок до построения численной модели. Детально описаны процессы верификации, направленные на подтверждение корректности численной реализации математической модели и оценку точности получаемых решений, и валидации, обеспечивающей подтверждение адекватности модели реальным физическим процессам и её прогностической способности. Особое внимание уделено количественной оценке неопределённостей моделирования, а также определению минимально необходимого количества экспериментальных данных для эффективной валидации. На основе статистического анализа метрики точности показано, что для новых типов конструкций требуется не менее четырёх независимых результатов валидации, при этом оптимальный эффект достигается в диапазоне от четырёх до шести экспериментов. Полученные результаты формируют концептуальную основу и практическое руководство для исследователей и инженеров, использующих численное моделирование при проектировании строительных конструкций.

Ключевые слова: верификация, валидация, компьютерное моделирование, численные методы анализа, численная модель, несущая способность, метод конечных элементов, точность модели, неопределённость.

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF VERIFICATION AND VALIDATION OF NUMERICAL MODELS OF BUILDING STRUCTURES

V. V. Tur, V. V. Nadolski

Abstract

Numerical modeling is becoming a key tool in the design and assessment of building structures, especially for innovative and complex engineering solutions. However, the credibility of simulation results directly affects the safety and reliability of structures. This paper presents a comprehensive methodology for ensuring the credibility of computational models through the processes of verification and validation. The fundamental terms and definitions related to V&V are refined and systematized in the context of structural mechanics. The stages of model development – from conceptual and mathematical formulations to the creation of a computational implementation – are described in detail. The study focuses on verification processes aimed at confirming the correctness of numerical implementation and evaluating solution accuracy, as well as validation procedures intended to confirm the adequacy of the model to physical reality and assess its predictive capability. Special attention is given to the quantitative assessment of modeling and experimental uncertainties and to determining the minimum number of experimental data points required for effective validation. Based on statistical analysis of the accuracy metric, it is shown that at least four validation results are required for new structural systems, with optimal reliability achieved within the range of four to six experiments. The findings form a conceptual and methodological foundation as well as a practical guideline for researchers and engineers applying numerical modeling in the design of building structures.

Keywords: verification, validation, computer modeling, numerical model, load-bearing capacity, finite element method, model accuracy, uncertainty.

Введение

Современное проектирование строительных конструкций все в большей степени опирается на результаты, полученные с помощью численных методов анализа, применяемых для имитационного моделирования конструкций или конструктивных систем [1, 2]. Сложные и новые конструктивные элементы – тонкостенные, гофрированные, перфорированные балки, пространственные узлы – требуют применения современных численных методов анализа, позволяющих прогнозировать их *поведение* и несущую способность на основе имитационного моделирования. [3, 4]. Несмотря на это, достоверность и точность таких моделей и их результатов, полученных численными методами зачастую не подвергается достаточной критической оценке со стороны проектировщиков, экспертов и заказчиков, базируясь во многом на вере в возможности программного обеспечения и квалификацию инженера [5].

Доверие к «разноцветным» визуализациям результатов анализа методом конечных элементов (МКЭ) не может заменять собой строгих процедур установления точности и адекватности модели. Численные методы, применяемые для имитационного моделирования, в отличие от аналитических методов, по своей природе являются приближениями к реальности, ограниченными доступными знаниями и данными, принятыми приближениями и решениями с помощью вычислительных алгоритмов. Примерами таких приближений являются моделирование материала как однородного континуума, использование билинейных диаграмм деформирования материала, идеализация граничных условий и т. д. [6]. Применение этих допущений может быть приемлемым, однако инженер обязан гарантировать, что выбранные приближения адекватны для конкретной задачи и целей моделирования (предполагаемого использования модели).

Ключевыми процессами, позволяющими установить и продемонстрировать достоверность численной модели, являются верификация и валидация [7, 8]. С 2017 года в Российской Федерации действует серия национальных стандартов ГОСТ Р 57700, посвящённых компьютерному моделированию, которые устанавливают определения и базовые принципы верификации и валидации [9].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-88-93

Согласно ГОСТ Р 57700.21-2020, *«верификация модели – это проверка корректности компьютерного моделирования, подтверждающая соответствие компьютерной реализации её исходной математической модели. Валидация модели – это проверка адекватности компьютерной модели моделируемому объекту»* [9].

Таким образом, верификация отвечает на вопрос: *«Правильно ли решены уравнения?»,* а валидация – *«Те ли самые уравнения решены?»* [10].

Международные и отечественные стандарты (ASME V&V 10, ISO 23555, ГОСТ Р 57700) определяют эти процедуры как обязательные элементы жизненного цикла численных моделей, однако в строительной отрасли их применение всё ещё носит крайне ограниченный характер. Целью данного исследования является разработка комплексной методики верификации и валидации компьютерных численных моделей, применяемых для оценки несущей способности строительных конструкций, устраняющая терминологические противоречия и предоставляющая количественные рекомендации по объёму выборки экспериментальных данных для валидации. Задачи работы включают: систематизацию и адаптацию терминологии валидации и верификации применительно к задачам теории сооружений; формирование чёткой последовательности этапов разработки и проверки численной модели; разработку практических рекомендаций по проведению верификации и валидации, включая оценку неопределённостей и определение необходимого объёма выборки экспериментальных данных; анализ влияния количества валидационных экспериментов на значения коэффициента надёжности.

В данной статье обобщены результаты системных исследований в данном направлении, которые представлены в работах [11–16].

Обзор литературы

Проблематике верификации и валидации численных моделей посвящено значительное количество работ как зарубежных, так и отечественных авторов. Основополагающие принципы и руководства были сформулированы в документах AIAA G-077-1998 [17] и ASME V&V 10-2006 [18], которые легли в основу многих последующих исследований.

В области строительных конструкций вопросы верификации и валидации активно исследуются применительно к физически и геометрически нелинейному анализу и работе стальных элементов при сложных напряженных состояниях. Так, в работах [3, 4, 14] рассматривается верификация и валидация моделей тонкостенных балок при совместном действии сдвига и локальной нагрузки. В исследовании [13] представлен статистический анализ погрешностей численных моделей несущей способности стальных элементов, что является важным шагом на пути к количественной оценке точности. В работе [8] подробно анализируются процедуры верификации и валидации численных моделей, а в [14, 15] предлагаются подходы к оценке расчётного значения несущей способности на основе численных моделей с учётом неопределённостей. Вопросы подтверждения качества программного обеспечения и тестирования численных алгоритмов рассматриваются в [12, 20, 21].

Несмотря на наличие существенного задела, отмечается недостаток комплексных методик, адаптированных для задач проектирования строительных конструкций, которые бы объединяли терминологию, этапы моделирования и рекомендации по учёту неопределённостей в расчётах надёжности. Представленное исследование направлено на восполнение этого пробела.

Материалы и методы

Терминологическая основа. В основе методики лежит система терминов (Таблица 1), адаптированная из ГОСТ Р 57188-2016 [22], ГОСТ Р 57700.21-2020 [9] и международных руководств [17, 18].

Таблица 1 – Ключевые термины и определения

Термин	Определение
Верификация	Процесс подтверждения того, что компьютерная численная модель представляет лежащую в основе математическую модель и её решение с установленной точностью
Верификация программного обеспечения	Процесс исключения ошибок и минимизации погрешностей в алгоритме численного решения и его компьютерном коде при любых обстоятельствах, при которых будет применяться программное обеспечение
Верификация компьютерной численной модели	Процесс исключения ошибок и оценки погрешности, связанной с особенностями дискретизации и численного решения для рассматриваемой модели
Валидация	Процесс подтверждения того, что компьютерная численная модель в заявленной области применения позволяет с определённой точностью моделировать реальные процессы (обладает прогностической способностью)
Концептуальная модель	Совокупность допущений и описаний физических явлений, представляющих поведение объекта моделирования
Математическая модель	Математические уравнения (управляющие, определяющие), граничные и начальные условия, описывающие концептуальную модель
Компьютерная численная модель	Численная реализация математической модели в форме дискретизации, алгоритмов решения и критериев сходимости
Ошибка	Признанный недостаток, не связанный с недостатком знаний или упрощениями (например, опечатка в значении свойства материала). Цель верификации и валидации – исключение
Погрешность	Признанный недостаток, связанный с преднамеренными упрощениями (например, размер сетки КЭ, билинейная диаграмма). Цель верификации и валидации – оценка и уменьшение
Неопределённость	Потенциальный недостаток, связанный с недостатком знаний или изменчивостью (например, разброс предела текучести). Цель верификации и валидации – оценка и учёт

Этапы разработки и проверки имитационной компьютерной модели. Процесс компьютерного моделирования разбит на последовательные этапы [16]:

1. Формулировка концептуальной модели: определение объекта моделирования, предполагаемого использования, интересующих характеристик поведения (несущая способность, жёсткость, форма потери устойчивости). Идентификация и ранжирование физических явлений, влияющих на эти характеристики. Формирование допущений и идеализаций.

2. Переход к математической модели или выбор и параметризация готовой математической модели (как правило перевод концептуальной модели в систему уравнений уже выполнен разработчиками программного обеспечения): граничных и начальных условий, определяющих соотношений для материалов.

3. Создание компьютерной численной модели: выбор типа и плотности пространственной дискретизации (сетки КЭ), временных шагов, алгоритмов решения, критериев сходимости. Задание физических параметров, параметров дискретизации и параметров численного решения.

4. Верификация модели:

- *верификация программного обеспечения* – проверка разработчиком программного обеспечения корректности реализации численных алгоритмов на основе тестовых задач с известными аналитическими или высокоточными численными решениями;

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-88-93

○ *верификация численной модели* – оценка погрешностей, связанных с дискретизацией (размер сетки, тип КЭ) и настройками решателя для конкретной модели. Основной метод – анализ сходимости на серии расчётов с последовательным измельчением сетки. Определяется наблюдаемый порядок сходимости и конвергентное (асимптотическое) значение интересующей характеристики.

5. Валидация модели: сравнение результатов верифицированной численной модели с эталонными данными. Этапы валидации:

○ *качественное сравнение* – сопоставление общего поведения и форм разрушения/деформирования модели и экспериментального образца для исключения грубых ошибок концептуальной модели;

○ *количественное сравнение* – выбор метрики точности (например, $\theta = F_{модель} / F_{эксперимент}$) и оценка ее статистических характеристик (математическое ожидание μ_θ, коэффициент вариации V_θ);

○ *анализ неопределённостей* – оценка неопределённостей как экспериментальных данных, так и моделирования (погрешности дискретизации, изменчивость свойств материалов).

6. Обеспечение надёжности: полученные статистические характеристики метрики точности используются совместно с неопределённостью базисных переменных для определения расчётного значения несущей способности с требуемым уровнем надёжности [13, 14].

7. Документирование: обязательный этап, включающий описание всех моделей, допущений, параметров, процедур верификации и валидации, результатов и установленных ограничений на применение модели.

Методы оценки численной погрешности при верификации. Для верификации численной модели применяются апостериорные методы оценки погрешности:

- экстраполяция Ричардсона: Метод, позволяющий оценить конвергентное значение и погрешность решения на основе расчётов на нескольких сетках с разной плотностью. Критически важно, чтобы решения находились в режиме асимптотической сходимости;
- индекс сходимости сетки (GCI): Развитие метода Ричардсона, включающее эмпирический коэффициент безопасности для более надёжной оценки границы погрешности [18, 23].

Методы валидации и анализа неопределённостей. Для валидации используются:

- метрики точности: точечные (сравнение в конкретной точке, например, максимальной нагрузки) и интегральные (сравнение кривых «нагрузка-перемещение»);
- статистический анализ – оценка среднего значения и коэффициента вариации метрики точности по выборке результатов сравнения с экспериментами;
- байесовское обновление – метод уточнения статистических характеристик метрики точности (μ_θ, V_θ) по мере поступления новых экспериментальных данных, позволяющий учесть априорную информацию [14, 24].

Результаты исследования

1. Рекомендации по объёму экспериментальных данных для валидации. Для определения минимально необходимого и оптимального количества экспериментальных результатов, применяемых при выполнении процедуры валидации, был проведён параметрический анализ зависимости коэффициента надёжности γ_R от числа n (количества экспериментов при валидации) при различных коэффициентах вариации V_θ метрики точности [11]. Анализ выполняли для двух сценариев: при неизвестном и априорно известном стандартном отклонении, с использованием байесовского обновления статистических характеристик [14]. Исследование выполняли при репрезентативных для стальных конструкций коэффициентах вариации метрики точности V_θ (5–11 %) и неопределённости базисных переменных ~7 % [13, 14, 15, 25, 26].

Результаты исследования [11] показывают, что для новых типов конструкций необходимо не менее четырех результатов валидации (рисунок 1). Наибольший эффект от увеличения количества экспериментов, выражающийся в значимом снижении требуемого коэффициента надёжности, наблюдается в диапазоне от четырех до шести результатов. При числе валидационных испытаний n ≥ 4 дисперсия метрики θ снижается на 25 %, при n ≥ 6 – на 35 %. Увеличение числа экспериментов свыше 10 даёт лишь незначительное улучшение достоверности, но резко повышает затраты. При $n < 4$ статистическая неопределённость оценок V_θ становится неприемлемо высокой, что вынуждает применять консервативные (завышенные) коэффициенты надёжности, а прогностическая способность модели приобретает в значительной степени интуитивный, а не математически обоснованный характер.

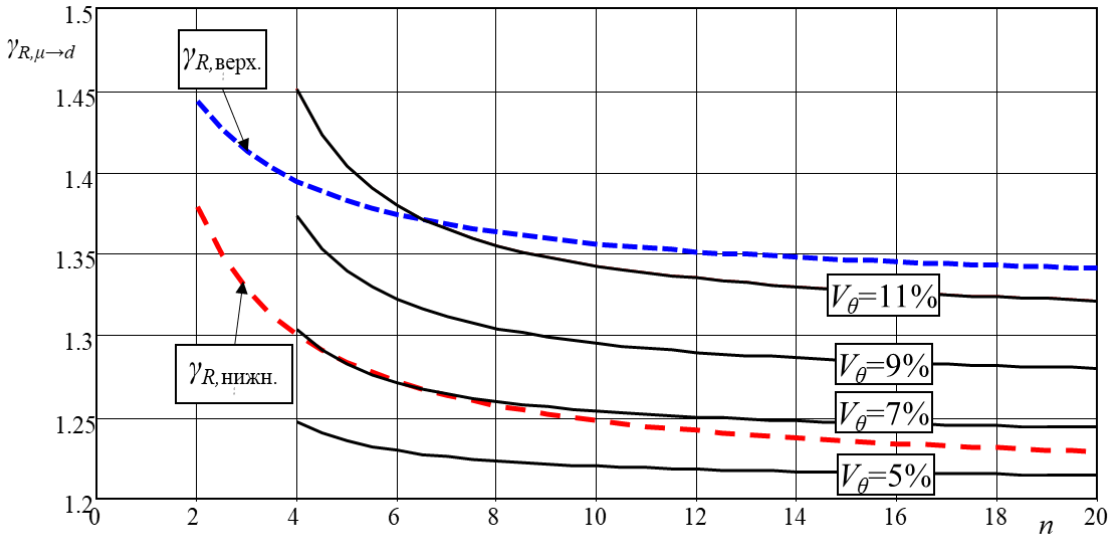


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента надёжности от количества экспериментальных результатов при различных коэффициентах вариации метрики точности (V_θ) [11]

Верхняя граница коэффициента надежности (синяя штриховая линия) соответствует наиболее консервативному значению коэффициент вариации меры точности (принят равным 12 %), при этом уточнение статистических характеристик выполнено байесовским методом в предположении известного стандартного отклонения. Нижняя граница (красная штриховая линия) получена при минимальном коэффициенте вариации 5 % и также с использованием байесовского подхода.

2. Классификация и учёт неопределенностей, погрешностей, ошибок. Процессы верификации и валидации численных

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-88-93

моделей требуют системного подхода к выявлению, классификации и количественному учёту неопределённостей, погрешностей, ошибок. В инженерной практике данные факторы оказывают существенно влияют на результаты моделирования и принимаемые проектные решения, поэтому корректная их классификация является ключевым элементом обеспечения достоверности расчётных результатов. В настоящей работе предлагается структурированная классификация неопределённостей, обеспечивающая их различение по природе возникновения и определяющая методологию последующего количественного учёта.

Неопределённость (англ. *uncertainty*) представляет собой *потенциальный недостаток* имитационной модели или данных, обусловленный либо естественной вариабельностью параметров, либо недостатком знаний. В отличие от ошибок и погрешностей, неопределённость не является следствием некорректного моделирования, а отражает *объективные и познавательные ограничения*. Примеры неопределённостей включают разброс механических свойств, вариабельность геометрических параметров, неполноту данных о реальном нагружении и т. д. Основные задачи верификации и валидации заключаются в выявлении неопределённостей, количественной оценке их влияния на результаты моделирования и правильном выборе методов обеспечения надёжности. Дополнительно проводится разделение на неустранимую (случайную) и устранимую (эпистемическую) неопределённость.

Неустранимая или случайная неопределённость (англ. *aleatory uncertainty*) обусловлена естественной вариабельностью физических свойств и параметров системы. Она отражает объективную случайность процессов и не может быть уменьшена за счёт дополнительных исследований. К типичным источникам случайной неопределённости относятся разброс механических характеристик материалов (например, предела текучести), геометрические несовершенства элементов, а также вариации нагрузок и внешних условий. Основная задача верификации и валидации в данном случае состоит в корректной идентификации статистических характеристик неопределённости и включении их влияния в расчёт несущей способности.

Устранимая или эпистемическая неопределённость (англ. *epistemic uncertainty*) связана с недостаточностью знаний о системе и отражает ограниченность доступной информации о механизмах работы конструкции, параметрах материалов или точных условиях применения модели. В отличие от случайной неопределённости, эпистемическая неопределённость может быть уменьшена за счёт проведения дополнительных экспериментов, улучшения модели или получения более точных исходных данных. Примерами эпистемической неопределённости являются статистическая неопределённость при малых объёмах выборки, неполная информация о параметрах модели или неопределённость концептуальной модели (например, при выборе диаграмм деформирования или упрощённых граничных условий). Для учёта эпистемической неопределённости применяются Байесовские методы обновления параметров, расширение выборки экспериментальных данных и уточнение численных моделей. Цель верификации и валидации – минимизация эпистемической составляющей до уровня, обеспечивающего стабильность и предсказуемость результатов моделирования.

Погрешности (англ. errors) представляют собой *признанные недостатки*, *возникающие вследствие намеренных упрощений или ограничений численной модели*. Погрешности являются неизбежным элементом любой вычислительной модели и поддаются количественной оценке. Основные источники погрешностей включают влияние дискретизации (погрешность сетки метода конечных элементов), упрощённые диаграммы деформирования материалов, линейные или идеализированные граничные условия и ограничения выбранных конститутивных моделей. Верификация модели направлена на выявление и оценку погрешностей путём анализа сходимости, применения апостериорных оценок точности и сравнения решений разных уровней моделирования. Цель верификации и валидации – уменьшение погрешности до приемлемого уровня и учёт её влияния на итоговые результаты расчётов.

Ошибки (англ. *mistakes*) представляют собой *признанные недостатки, не связанные ни со случайной, ни с эпистемической неопределённостью, ни с преднамеренными упрощениями*. Они возникают вследствие человеческого фактора или организационных нарушений и не являются частью модели в строгом смысле. Примерами ошибок служат некорректный ввод исходных данных, опечатки в значениях свойств материалов, ошибочное задание граничных условий или использование неверных единиц измерения. Ошибки должны быть полностью исключены на этапе верификации посредством процедур контроля качества, независимо проведённых расчётов, экспертной оценки, автоматизированных проверок и т. д. В отличие от неопределённостей, ошибки не подлежат вероятностному учёту.

Предложенная классификация позволяет систематизировать процессы верификации и валидации компьютерных численных моделей и обеспечивает основу для выбора методов их количественного учёта. Отделение ошибок и погрешностей от случайных и эпистемических неопределённостей позволяет корректно формировать вероятностные модели, определять вклад различных источников в общую вариабельность результата и обеспечивать требуемый уровень достоверности расчётных моделей при проектировании стальных конструкций.

Выводы

1. Разработана и систематизирована комплексная методика верификации и валидации имитационных моделей для строительных конструкций, объединяющая терминологическую базу, этапы разработки модели и практические процедуры оценки точности. Процедуры верификации и валидации являются обязательной частью жизненного цикла численных моделей строительных конструкций и обеспечивают доказательную достоверность и точность инженерных расчётов.

2. Верификация программного обеспечения должна включать тестирование алгоритмов и апостериорную оценку численных погрешностей. Верификация численной модели направлена на определение влияния параметров дискретизации и численных схем на точность решений. Установлено, что верификация численной модели должна выполняться на основе анализа сходимости (например, с использованием экстраполяции Ричардсона) и предшествовать валидации.

3. Валидация должна проводиться путём сравнения с экспериментальными или аналитическими эталонными данными с обязательным определением статистических метрик μ_θ и V_θ. Доказано, что для эффективной валидации новых конструктивных решений и получения статистически значимых оценок точности необходимо не менее четырех экспериментальных результатов. Наиболее целесообразным является проведение от четырех до шести валидационных экспериментов.

4. Верификация должна обязательно предшествовать валидации. Без проведения верификации любое расхождение между моделью и экспериментом невозможно однозначно отнести либо к ошибкам численной реализации (зона верификации), либо к неадекватности концептуальной модели (зона валидации). Это может привести к ложным выводам и некорректной калибровке модели.

5. Байесовский подход к уточнению параметров позволяет адаптивно повышать достоверность статистических характеристик меры точности по мере накопления данных и уменьшать неопределённость.

6. Обоснована необходимость количественной оценки неустранимых (изменчивость свойств) и устранимых (статистическая, концептуальная) неопределённостей, так и погрешностей для последующего учёта их влияния на расчётные значения несущей способности. Неопределённости в большей мере влияют на стандартное отклонение меры точности, а погрешности на среднее значение меры точности (преимущественно систематическая погрешность).

7. Для эффективной и достоверной верификации и валидации сложных систем рекомендован структурированный иерархический подход «от простого к сложному». Последовательная валидация на возрастающих уровнях детализации (компонент → элемент → узел → система) является методически обоснованной, так как позволяет:

○ локализовать источники погрешностей и неадекватности модели;

○ поэтапно накапливать базу знаний и проверенных подмоделей;

○ снизить стоимость верификации и валидации, повторно используя валидированные модели компонентов на более высоких уровнях иерархии.

Разработка отечественного стандарта верификации и валидации, аналогичного ASME V&V 10-2006, с включением количественных критериев точности, является необходимым условием перехода к проектированию на основе численных моделей. Перспективой дальнейших исследований является создание стандартизированных баз данных тестовых задач для верификации и эталонных экспериментальных данных для валидации моделей типовых строительных конструкций и узлов, что повысит воспроизводимость расчётов, доверие к результатам моделирования и общий уровень безопасности строительных конструкций. Дальнейшее развитие этого направления неразрывно связано с общими трендами в области вычислительных методов, подробно рассмотренными в обзорной работе Krzywanski et al. [27]. Авторы отмечают, что современное моделирование сложных систем всё чаще опирается не только на классические численные методы (например, МКЭ), но и на их симбиоз с методами искусственного интеллекта (ИИ).

Список цитированных источников

1. Graciano, C. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear / C. Graciano, A. Ayestarán // Journal of Constructional Steel Research. – 2013. – Vol. 80. – P. 202–212. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading / V. Nadolski, J. Markova, V. Podymako, M. Sykora // Proceedings of conference Modelling in Mechanics 2022, Ostrava, 26–27 May 2022. – Ostrava : VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering. – 2022. – P. 21–29. – DOI: 10.35181/tces-2023-0003.
3. Надольский, В. В. Оценка несущей способности стальной балки методом конечных элементов при совместном действии локальных и сдвиговых усилий / В. В. Надольский, В. И. Подымако // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 2 (100). – С. 26–43. – DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-26-43.
4. Sinur, F. Moment–shear interaction of stiffened plate girders—Tests and numerical model verification / F. Sinur, D. Beg // Journal of Constructional Steel Research. – 2013. – Vol. 85. – P. 116–129. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
5. Перельмутер, А. В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? / А. В. Перельмутер, В. В. Тур // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Vol. 13, Iss. 3. – P. 86–102.
6. Тур, В. В. Концепция проектирования строительных конструкций на основе численных моделей сопротивления / В. В. Тур, В. В. Надольский // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 6 (104). – С. 78–90. – DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90.
7. Бритов, Г. С. Верификация, валидация и тестирование компьютерных моделей линейных динамических систем / Г. С. Бритов // Информационно-управляющие системы. – 2013. – № 2 (63). – С. 75–82.
8. Верификация и валидация компьютерных моделей / А. В. Сальников, М. С. Французов, К. А. Виноградов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 9 (750). – С. 100–115. – DOI: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115.
9. Компьютерное моделирование в процессах разработки, производства и обеспечения эксплуатации изделий. Термины и определения : ГОСТ Р 57700.21-2020 ; введ. 01.06.2021. – М. : Стандартинформ, 2020. – 15 с.
10. Oberkampf, W. L. Verification and Validation in Scientific Computing / W. L. Oberkampf, C. J. Roy. – Cambridge University Press, 2010. – 767 p.
11. Надольский, В. В. Верификация и валидация компьютерной вычислительной модели для проектирования строительных конструкций / В. В. Надольский // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2024. – № 2. – С. 42–50.
12. Надольский, В. В. Верификация программного обеспечения для компьютерного вычислительного моделирования / В. В. Надольский // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : электрон. сб. ст. VI междунар. науч. конф., Новополоцк, 30–31 окт. 2024 г. / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой ; редкол.: Д. Н. Лазовский (председ.) [и др.]. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой. – 2025. – С.154–158.
13. Надольский, В. В. Статистические характеристики погрешности численных моделей несущей способности для стальных элементов / В. В. Надольский // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 3 (107). – С. 17–34. – DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34.
14. Надольский, В. В. Оценка расчетного значения несущей способности стальных элементов, проектируемых на основе численных моделей / В. В. Надольский // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, Вып. 3. – С. 367–378. – DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378.
15. Надольский, В. В. Коэффициенты надежности для нелинейных моделей несущей способности балок с гибкой стенкой / В. В. Надольский // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, Вып. 6. – С. 852–863.
16. Надольский, В. В. Этапы разработки компьютерной вычислительной модели для оценки несущей способности стальных конструкций / В. В. Надольский // Перспективные направления инновационного развития и подготовки кадров : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Брест, 31 окт. – 2 нояб. 2024 г. : в 2 ч. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: Н. Н. Шалобыта (гл. ред.) [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2024. – Ч. 2. – С. 271–280.
17. AIAA G-077-1998. Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations. – Reston : AIAA, 1998. – Vol. 77. – 19 p.
18. ASME V&V 10-2006. Guide for verification and validation in computational solid mechanics. – New York : ASME, 2006.
19. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders / B. Kövesdi, J. Alcaine, L. Dunai [et al.] // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. – Vol. 103. – P. 327–343. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
20. Борисов, Е. А. Особенности проверки качества программного обеспечения / Е. А. Борисов, А. В. Теплов // Наука через призму времени. – 2020. – № 1 (34). – С. 27–29.
21. Караханова, А. А. Рассмотрение принципов проведения тестирования программного обеспечения / А. А. Караханова, А. С. Маликова // Синергия Наук. – 2019. – № 41. – С. 264–270.
22. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения : ГОСТ Р 57188-2016 ; введ. 01.05.2017. – М. : Стандартинформ, 2016. – 23 с.
23. Roache, P. J. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies / P. J. Roache // Journal of Fluids Engineering. – 1994. – Vol. 116 (3). – P. 405–413.
24. Соловьева, А. А. Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 5. – С. 587–607. – DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607.
25. Kala, Z. Sensitivity assessment of steel members under compression / Z. Kala // Engineering Structures. – 2009. – Vol. 31. – P. 1344–1348. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.001.
26. Nadolski, V. Uncertainty in resistance models for steel members / V. Nadolski, M. Sykora // Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series – 2014. – Vol. 14. – P. 119–130. – DOI: 10.2478/tvsb-2014-0028.
27. Statistical evaluation of the lateral–torsional buckling resistance of steel I-beams, Part 2: Variability of steel properties / L. Simões da Silva, C. Rebelo, D. Nethercot [et al.] // Journal of Constructional Steel Research. – 2009. – Vol. 65 (4). – P. 832–849. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.017.
28. Advanced Computational Methods for Modeling, Prediction and Optimization – A Review / J. Krzywanski, M. Sosnowski, K. Grabowska [et al.] // Materials. – 2024. – Vol. 17. – Art. 3521. – DOI: 10.3390/ma17143251.

References

1. Graciano, C. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear / C. Graciano, A. Ayestarán // Journal of Constructional Steel Research. – 2013. – Vol. 80. – P. 202–212. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading / V. Nadolski, J. Markova, V. Podymako, M. Sykora // Proceedings of conference Modelling in Mechanics 2022, Ostrava, 26–27 May 2022. – Ostrava : VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering. – 2022. – P. 21–29. – DOI: 10.35181/tces-2023-0003.
3. Nadol'skij, V. V. Ocenka nesushchej sposobnosti stal'noj balki metodom konechnyh elementov pri sovmestnom dejstvii lokal'nyh i sdvigovyh usilij / V. V. Nadol'skij, V. I. Podymako // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2022. – № 2 (100). – S. 26–43. – DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-26-43.
4. Sinur, F. Moment–shear interaction of stiffened plate girders—Tests and numerical model verification / F. Sinur, D. Beg // Journal of Constructional Steel Research. – 2013. – Vol. 85. – P. 116–129. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
5. Perel'muter, A. V. Gotovy li my perejti k nelinejnomu analizu pri proektirovanii? / A. V. Perel'muter, V. V. Tur // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Vol. 13, Iss. 3. – P. 86–102.
6. Tur, V. V. Koncepciya proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij na osnove chislennyh modelej soprotivleniya / V. V. Tur, V. V. Nadol'skij // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2022. – № 6 (104). – S. 78–90. – DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90.
7. Britov, G. S. Verifikaciya, validaciya i testirovanie komp'yuternyh modelej linejnyh dinamicheskih sistem / G. S. Britov // Informacionno-upravlyayushchie sistemy. – 2013. – № 2 (63). – S. 75–82.
8. Verifikaciya i validaciya komp'yuternyh modelej / A. V. Sal'nikov, M. S. Francuzov, K. A. Vinogradov [i dr.] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie. – 2022. – № 9 (750). – S. 100–115. – DOI: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115.
9. Komp'yuternoe modelirovanie v processah razrabotki, proizvodstva i obespecheniya ekspluatacii izdelij. Terminy i opredeleniya : GOST R 57700.21-2020 ; vved. 01.06.2021. – M. : Standartinform, 2020. – 15 s.
10. Oberkampf, W. L. Verification and Validation in Scientific Computing / W. L. Oberkampf, C. J. Roy. – Cambridge University Press, 2010. – 767 p.
11. Nadol'skij, V. V. Verifikaciya i validaciya komp'yuternoj vychislitel'noj modeli dlya proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij / V. V. Nadol'skij // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. – 2024. – № 2. – S. 42–50.
12. Nadol'skij, V. V. Verifikaciya programmnogo obespecheniya dlya komp'yuternogo vychislitel'nogo modelirovaniya / V. V. Nadol'skij // Arhitekturno-stroitel'nyj kompleks: problemy, perspektivy, innovacii : elektron. sb. st. VI mezhdunar. nauch. konf., Novopolock, 30–31 okt. 2024 g. / Poloc. gos. un-t im. Evfrosinii Polockoj ; redkol.: D. N. Lazovskij (predsed.) [i dr.]. – Novopolock : Poloc. gos. un-t im. Evfrosinii Polockoj. – 2025. – S.154–158.
13. Nadol'skij, V. V. Statisticheskie harakteristiki pogreshnosti chislennyh modelej nesushchej sposobnosti dlya stal'nyh elementov / V. V. Nadol'skij // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2023. – № 3 (107). – S. 17–34. – DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34.
14. Nadol'skij, V. V. Ocenka raschetnogo znacheniya nesushchej sposobnosti stal'nyh elementov, proektiruemyh na osnove chislennyh modelej / V. V. Nadol'skij // Vestnik MGSU. – 2023. – T. 18, Vyp. 3. – S. 367–378. – DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378.
15. Nadol'skij, V. V. Koefficienty nadezhnosti dlya nelinejnyh modelej nesushchej sposobnosti balok s gibkoj stenkoj / V. V. Nadol'skij // Vestnik MGSU. – 2023. – T. 18, Vyp. 6. – S. 852–863.
16. Nadol'skij, V. V. Etapy razrabotki komp'yuternoj vychislitel'noj modeli dlya ocenki nesushchej sposobnosti stal'nyh konstrukcij / V. V. Nadol'skij // Perspektivnye napravleniya innovacionnogo razvitiya i podgotovki kadrov : sb. st. mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 31 okt. – 2 noyab. 2024 g. : v 2 ch. / Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: N. N. SHalobyta (gl. red.) [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2024. – CH. 2. – S. 271–280.
17. AIAA G-077-1998. Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations. – Reston : AIAA, 1998. – Vol. 77. – 19 p.
18. ASME V&V 10-2006. Guide for verification and validation in computational solid mechanics. – New York : ASME, 2006.
19. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders / B. Kövesdi, J. Alcaine, L. Dunai [et al.] // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. – Vol. 103. – P. 327–343. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
20. Borisov, E. A. Osobennosti proverki kachestva programmnogo obespecheniya / E. A. Borisov, A. V. Teplov // Nauka cherez prizmu vremeni. – 2020. – № 1 (34). – S. 27–29.
21. Karahanova, A. A. Rassmotrenie principov provedeniya testirovaniya programmnogo obespecheniya / A. A. Karahanova, A. S. Malikova // Sinergiya Nauk. – 2019. – № 41. – S. 264–270.
22. CHislennoe modelirovanie fizicheskih processov. Terminy i opredeleniya : GOST R 57188-2016 ; vved. 01.05.2017. – M. : Standartinform, 2016. – 23 s.
23. Roache, P. J. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies / P. J. Roache // Journal of Fluids Engineering. – 1994. – Vol. 116 (3). – P. 405–413.
24. Solov'eva, A. A. Issledovanie razvitiya modelej sluchajnyh velichin v raschetah nadezhnosti stroitel'nyh konstrukcij pri nepolnoj statisticheskoj informacii / A. A. Solov'eva, S. A. Solov'ev // Vestnik MGSU. – 2021. – T. 16, № 5. – S. 587–607. – DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607.
25. Kala, Z. Sensitivity assessment of steel members under compression / Z. Kala // Engineering Structures. – 2009. – Vol. 31. – P. 1344–1348. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.001.
26. Nadolski, V. Uncertainty in resistance models for steel members / V. Nadolski, M. Sykora // Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series – 2014. – Vol. 14. – P. 119–130. – DOI: 10.2478/tvsb-2014-0028.
27. Statistical evaluation of the lateral–torsional buckling resistance of steel I-beams, Part 2: Variability of steel properties / L. Simões da Silva, C. Rebelo, D. Nethercot [et al.] // Journal of Constructional Steel Research. – 2009. – Vol. 65 (4). – P. 832–849. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.017.
28. Advanced Computational Methods for Modeling, Prediction and Optimization – A Review / J. Krzywanski, M. Sosnowski, K. Grabowska [et al.] // Materials. – 2024. – Vol. 17. – Art. 3521. – DOI: 10.3390/ma17143251.

Материал поступил 12.02.2026, одобрен 15.02.2026, принят к публикации 17.02.2026

УДК 72.025.4(476.7)

КОМПЛЕКСНЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЯ БЫВШЕГО ИЕЗУИТСКОГО КОЛЛЕГИУМА XVII ВЕКА В ГОРОДЕ ПИНСКЕ КАК ОБЪЕКТА ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Э. А. Тур[1], Е. Ю. Русак[2]

[1] К. т. н., доцент кафедры инженерной экологии и химии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: tur.elina@mail.ru

[2] Студентка факультета инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь

Реферат

Важнейшей частью проекта по реставрации объектов, включенных в Перечень недвижимых объектов историко-культурного наследия, является раздел «Комплексные научные изыскания». Авторами были проведены физико-химические исследования строительных растворов и окрасочных составов, отобранных с фасадов и внутренних поверхностей стен здания бывшего коллегиума иезуитов в г. Пинске. Целью данных исследований являлось определение аутентичных строительных растворов и аутентичных окрасочных составов. Для анализа представленных образцов применялись микрохимический, гранулометрический и петрографический методы исследований. Объект был обследован должным образом, определены аутентичные строительные растворы и окрасочные составы. Установлено, что аутентичные штукатурные известково-песчаные растворы фасадов здания отличаются соотношением компонентов и гранулометрическим составом заполнителя. Аутентичное цветовое решение фасадов здания кардинально отличается от последних современных ремонтов. Первоначально стены всех фасадов здания были окрашены составами светло-бежевого цвета на минеральной основе. Стены башни-контрфорса западного фасада первоначально были окрашены составом бежевого цвета на несколько тонов темнее. Все декоративные элементы фасадов здания были окрашены составами белого цвета на минеральной основе. Сохранение культурного наследия в нашей стране – одна из самых важных проблем. Проведенные исследования и накопленный опыт работы на недвижимых объектах историко-культурного наследия позволяют формулировать основные принципы решения инженерных задач в реставрационном строительстве для конкретного объекта.

Ключевые слова: историко-культурное наследие, физико-химические исследования, штукатурные растворы, окрасочные составы.

COMPLEX SCIENTIFIC RESEARCH OF THE 17TH-CENTURY JESUIT COLLEGE BUILDING IN THE CITY OF PINSK AS AN OBJECT OF THE HISTORICAL AND CULTURAL HERITAGE OF THE REPUBLIC OF BELARUS

E. A. Tur, E. U. Rusak

Abstract

The most important part of the project for the restoration of objects included in the List of immovable historical and cultural heritage sites is the "Comprehensive scientific research" section. The authors conducted physical and chemical studies of building mortars and paint compositions taken from the facades and interior walls of the former Jesuit college building in Pinsk. The purpose of these studies was to determine the authenticity of the building mortars and the authenticity of the painting compositions. Microchemical, granulometric and petrographic research methods were used to analyze the samples presented. The object was properly examined, the authenticity of the building mortars and the authenticity of the painting compositions were determined. It has been established that the authentic plaster lime-sand solutions of the building's facades differ in their component ratios and the granulometric composition of the filler. The authentic color scheme of the building's facades is significantly different from the latest modern renovations. Initially, the walls of all the building's facades were painted with light beige mineral-based paints. The walls of the buttress tower on the western facade were initially painted with a slightly darker shade of beige. All the decorative elements of the building's facades were painted with white mineral-based paints. Preserving our country's cultural heritage is one of the most important issues. The conducted research and accumulated experience of working on immovable historical and cultural heritage sites allow us to formulate the basic principles for solving engineering problems in restoration construction for a specific site.

Keywords: historical and cultural heritage, physical and chemical research, plaster solutions, painting compositions.

Введение

Проблеме сохранения и реставрации исторических зданий во всем мире уделяется огромное внимание, о чем свидетельствует создание специальных программ и органов ЮНЕСКО под эгидой ООН. В нашей стране сложившаяся за долгие годы практика инженерной реставрации зданий историко-культурного наследия носила, в основном, фрагментарный характер, была недостаточно ориентирована на конечные цели, не имела системно сформулированных критериев оценки и, в итоге, не обеспечивала оптимальной результативности реставрационно-строительных работ. В последние годы получил развитие системотехнический подход к решению проблемы сохранения памятников истории и культуры, основанный на применении понятия «природно-техническая система». Это обстоятельство предопределило пути поиска новых подходов к определению и формулированию целей и задач инженерной реставрации, методов и сценариев их решения. Историко-культурные ценности в настоящее время включаются в охранный реестр – Государственный список историко-культурных ценностей Республики Беларусь [1]. В последние годы в Республике Беларусь проведена большая работа по реставрации и восстановлению сотен объектов историко-культурного наследия с целью поддержания их надлежащего технического состояния. На государственном уровне эти задачи решаются в рамках ряда государственных программ и локальных инвестиционных проектов. Кроме того, мероприятия по охране историко-культурного наследия, в том числе ремонтно-реставрационные работы на историко-культурных ценностях, финансируются за счет средств фонда Президента Республики Беларусь по поддержке культуры.

В соответствии с Кодексом Республики Беларусь о культуре, Национальной стратегией устойчивого социального-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года, сохранение и приумножение историко-культурного наследия страны является важным фактором национальной идентичности и белорусской государственности, играет значительную роль в формировании гражданственности и патриотизма личности [1, 2].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-94-102

Краткая историческая справка

Одним из значимых объектов историко-культурного наследия является здание бывшего коллегиума иезуитов XVII века, находящееся на площади Ленина, 22 в г. Пинске. С 1996 года в здании находится музей Белорусского Полесья, который является вторым по значимости во всей Беларуси, уступающим лишь Национальному художественному музею в г. Минске.

Здание коллегиума иезуитов было построено в середине XVII века. Строительство с перерывами продолжалось до 1675 года. Коллегиум был крупным и популярным учебным заведением, здесь обучались будущие монахи-иезуиты. В 1773 году Ватикан временно распустил иезуитский орден. В здании коллегиума была размещена обычная светская школа. Затем оно перешло к униатам, а вскоре было передано православному Богоявленскому монастырю. Лишь в 1919 году иезуиты вернулись в Пинск и вновь открыли в коллегиуме учебное заведение – духовную семинарию. После вхождения Пинщины в состав БССР здание передали различным организациям и учреждениям. Советские власти решили полностью снести комплекс и в 1953 г. взорвали собор Святого Станислава. Он так и не был восстановлен. На его месте сейчас находится площадь Ленина с довольно невыразительным ансамблем, который оживляется только зданием коллегиума. Его тоже планировали снести. Помешало то, что в здании действовало много организаций, для них пришлось бы подыскивать новое место.

На рисунке 1 представлено здание бывшего коллегиума иезуитов в г. Пинске в настоящее время.



Рисунок 1 – Здание бывшего коллегиума иезуитов в г. Пинске в настоящее время

Здание бывшего коллегиума смотрится очень монументальным и обладает довольно скупым декором. Оно трехэтажное, но благодаря мансардному этажу и французской «ломаной» крыше кажется куда более высоким. Построено сооружение в форме буквы Г, одна перекладина которой идет параллельно реке, а другая – перпендикулярно.

В облике здания доминирует барокко, но в оформлении оконных проемов и некоторых других деталях проглядывают и черты архитектуры ренессанса. Окна коллегиума прямоугольные, различаются размером на разных этажах; некоторые декорированы наличниками. Стены оформлены пилястрами. Интересная деталь – башенка-контрфорс, подпирающая угол здания и напоминающая маяк. Еще одна особенность – толщина стен первых двух ярусов: она достигает двух метров, усиливая впечатление тяжеловесности и монументальности всего здания.

В декоре оконных обрамлений и простенков первого и второго этажей здания прослеживаются позднеренессансные черты, которые могли возникнуть в первой половине XVII века. Третий этаж отделен от нижних развитым карнизом, накрыт кровлей с фигурным фронтоном и волютными завершениями. Подобные элементы, а также отсутствие декора на стенах характерны для периода барокко, которое утвердилось в Беларуси в середине XVII века. Отсутствие стилистической целостности здания позволяет сделать вывод о неодновременности возведения его различных частей. На разновременность возведения различных частей коллегиума указывают также и особенности использованного строительного материала. Ренессансная его часть от основания фундамента построена из кирпича размером 33 × 17 × 9 сантиметров, который был распространен в Беларуси с конца XVI века. В середине XVII века ему на смену приходит кирпич меньшего размера – 27 × 12 × 5 сантиметров. Именно из него и построена угловая башня-контрфорс, отдельные части третьего этажа и стены чердачной части. Фундамент этого памятника архитектуры имел глубину в пять метров, что на полметра больше чем аналогичное сооружение в знаменитом Мирском замке. Необходим он был для того, чтобы удерживать мощные стены коллегиума, толщина которых на нижнем этаже достигала двух метров. Архитектурное решение фасадов коллегиума тоже довольно уникально. Для Беларуси всегда был характерен синтез нескольких стилевых направлений. В данном случае, это достаточно редкое объединение отдельных отличительных черт, характерных для ренессанса и барокко. Так, прямоугольные окна, своеобразная форма наличников и открытая галерея-аркада на первом этаже со стороны двора целиком соответствуют признакам ренессанса. А от барокко архитекторы заимствовали пилястры и так называемую французскую "ломаную крышу". Именно последняя придаёт зданию оригинальный вид и делает его композицию более динамичной. Определённый же вертикализм конструкции коллегиума, свойственный позднему барокко и рококо, достигается благодаря 24 высоким печным трубам. Представляют интерес и уцелевшие большие часы-куранты, размещённые в центре фронтона торца здания, обращённого к костёлу. Под коллегиумом находились большие подвалы, которые сейчас частично засыпаны землёй [3].

Внутри коллегиум имеет коридорную систему. В период его процветания на первом этаже были учебные и хозяйственные помещения и столовая, а на остальных этажах – спальни преподавателей и учащихся, библиотека, лаборатория и другие помещения. В декоре использовались фрески и майолика, печи и камины были декорированы изразцами. Помещения украшались иконами, картинами и скульптурами. К сожалению, интерьеры здания безвозвратно утрачены.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-94-102

Результаты физико-химических исследований и их обсуждение

Здание бывшего Иезуитского коллегиума XVII века, находящееся в г. Пинске, на площади Ленина, 22, является недвижимым объектом историко-культурного наследия 2 категории (историко-культурная ценность, имеющая национальное значение) и включено в охранный реестр – Государственный список историко-культурных ценностей Республики Беларусь [1, 2].

3 февраля 2017 г. вступил в силу Кодекс Республики Беларусь о культуре, которым регулируются вопросы охраны историко-культурного и археологического наследия Республики Беларусь [2]. Кодексом установлена процедура, после выполнения, которой разрешается производить работы на историко-культурной ценности**.** В составе научно-проектной документации разрабатывается раздел «Комплексные научные изыскания», который состоит из фотофиксации, обмеров, исторических, археологических и химико-физических исследований. Обязательное проведение химико-физических исследований, помогает принять правильные проектные решения по применению отделочных материалов на историко-культурных ценностях.

Авторами были проведены физико-химические исследования строительных растворов и окрасочных составов, отобранных с фасадов и внутренних поверхностей стен здания. Целью данных исследований являлось определение аутентичных строительных растворов и аутентичных окрасочных составов. Для анализа представленных образцов применялись микрохимический, гранулометрический и петрографический методы исследований [4, 5, 6, 7, 8, 9]. Гранулометрический состав заполнителей определялся стандартным методом: путем просеивания через сита с размером ячеек 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, 0,063 мм согласно рекомендациям ОАО «Белреставрация» Министерства культуры Республики Беларусь (для исследования аутентичных строительных растворов недвижимых объектов историко-культурного наследия категории «0», «1» и «2»). Цвета лакокрасочных покрытий и отделочных составов указаны по каталогу «3D plus» компании CAPAROL, применяемым в настоящее время архитекторами-реставраторами в Республике Беларусь. Цвет покрытия определялся путём визуального сравнения образца с эталонной типографской выкраской. Для устранения метаметрии определение цвета проводилось при рассеянном естественном освещении [10, 11, 12]. Инструментальная цветометрия в настоящее время на исторических объектах не используется в силу особенностей проведения исследований (во многих случаях – крайне малые площади сохранности аутентичных составов (следы)) и невозможности использования данного метода.

Статистическая обработка данных не проводилась ввиду отсутствия требований Министерства культуры Республики Беларусь.

Места отбора образцов – проб штукатурного слоя (далее – ПШС) для проведения физико-химических исследований – представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Места отбора образцов – проб штукатурного слоя для проведения физико-химических исследований

Наименование образца	Место отбора образца
Пробы штукатурного слоя с фасадов здания	
ПШС-1	Основная плоскость стены полуподвала западного фасада
ПШС-2	Основная плоскость стены башни-контрфорса западного фасада
ПШС-3	Декоративный элемент – пилястра – западного фасада
ПШС-4	Основная плоскость стены 1-го этажа западного фасада
ПШС-5	Декоративный элемент – сандрик – над оконным проемом западного фасада
ПШС-6	Междуэтажный карниз между 1-м и 2-м этажами западного фасада
ПШС-7	Основная плоскость стены 2-го этажа западного фасада
ПШС-8	Междуэтажный карниз между 2-м и 3-м этажами западного фасада
ПШС-9	Основная плоскость стены 3-го этажа западного фасада
ПШС-10	Венчающий карниз западного фасада
ПШС-11	Декоративная овальная деталь фронтона западного фасада
ПШС-12	Основная плоскость стены фронтона западного фасада
ПШС-13	Декоративный элемент – пилястра – фронтона западного фасада
ПШС-14	Основная плоскость стены фронтона южного фасада
ПШС-15	Венчающий карниз фронтона южного фасада
ПШС-16	Основная плоскость стены 1-го этажа южного фасада
ПШС-17	Основная плоскость стены портала входа фасада
ПШС-18	Арка над входом
ПШС-19	Колонна справа от портала входа
ПШС-20	Основная плоскость стены 2-го этажа над порталом входа фасада
ПШС-21	Декоративный элемент 2-го этажа над порталом входа
ПШС-22	Основная плоскость стены 1-го этажа западного фасада с торца здания
ПШС-23	Основная плоскость стены 1-го этажа южного фасада с торца здания
Пробы штукатурного слоя с внутренних поверхностей здания	
ПШС-24	Основная плоскость стены 1-го этажа
ПШС-25	Основная плоскость стены 2-го этажа
ПШС-26	Основная плоскость стены 3-го этажа
ПШС-27	Арка 1-го этажа
ПШС-28	Обрамление окна 1-го этажа (внутри здания)
ПШС-29	Арка 2-го этажа (внутренняя поверхность)
ПШС-30	Обрамление окна 2-го этажа (внутри здания)
ПШС-31	Обрамление окна 3-го этажа (внутри здания)
ПШС-32	Арка 3-го этажа (внутренняя поверхность)

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-94-102

В результате проведенных исследований были выявлены основные аутентичные штукатурные растворы и окрасочные составы. Основные аутентичные штукатурные растворы представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные аутентичные штукатурные растворы

Наименование образца	Результаты исследований
Аутентичные штукатурные растворы фасадов здания	
ПШС-1; ПШС-3; ПШС-10; ПШС-18	Известково-песчаный штукатурный раствор желтовато-песочного цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,7 – 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (0,25–0,125 мм) фракции. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 21,5 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 28,0 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 47,0 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм – около 3,5 %. Фракция с размером частиц более 2 мм – отсутствует. Минеральный состав заполнителя: полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. Раствор легко разрушается, отсутствует связь между компонентами раствора. pH водной вытяжки – около 8,08
ПШС-2; ПШС-19	Известково-песчаный штукатурный раствор светло-оранжевого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,75 – 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 30,0 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 41,0 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 26,0 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм – около 2,0 %, фракции с размером частиц более 2 мм – около 1,0 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. Раствор легко разрушается, отсутствует связь между компонентами раствора. pH водной вытяжки – около 8,23
ПШС-4	Известково-песчаный штукатурный раствор желтовато-песочного цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,5. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 26,0 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 44,0% от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 24,0 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм – около 2,0 %, фракции с размером частиц более 2 мм – около 4,0 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. Отмечено присутствие отдельных крупных частиц полевого шпата размером 4–5 мм, а также наличие отдельных вкраплений извести размером 1–2 мм. pH водной вытяжки – около 8,17
ПШС-5; ПШС-6; ПШС-8	Известково-песчаный штукатурный раствор светло-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,5. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (0,25–0,125 мм) фракции. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 9,0 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 33,0 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 57,0 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм – около 1,0 %, фракция с размером частиц более 2 мм – отсутствует. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. pH водной вытяжки – около 8,0
ПШС-7	Известково-песчаный штукатурный раствор светло-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (0,25–0,125 мм) и средней (0,5–0,25 мм) фракций в примерно одинаковом соотношении. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 7,0 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 46,0 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 47,0 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм и фракция с размером частиц более 2 мм – отсутствуют. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. pH водной вытяжки около 7,9
ПШС-9	Известково-песчаный штукатурный раствор светло-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,5 – 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 30,0 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 38,0 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 26,0 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм – около 5,0 %, фракция с размером частиц более 2 мм – около 1,0 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. pH водной вытяжки – около 8,5
ПШС-11	Известково-песчаный штукатурный раствор желтовато-песочного цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:5 – 1:6. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно крупной (1–0,5 мм) фракции. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 49,0 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 29,0 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 15,0 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм – около 6,0 %. Фракция с размером частиц более 2 мм – около 1,0 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. Раствор легко разрушается, отсутствует связь между компонентами раствора. pH водной вытяжки – около 8,20
ПШС-12; ПШС-13; ПШС-14; ПШС-15 (фронтон)	Известково-песчаный штукатурный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:5. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 38,0 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 42,0 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 17,0 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм – около 3,0 %, фракция с размером частиц более 2 мм – отсутствует. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. pH водной вытяжки – около 8,82

Продолжение таблицы 2

Наименование образца	Результаты исследований
Аутентичные штукатурные растворы фасадов здания	
ПШС-16; ПШС-17	Известково-песчаный штукатурный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,5. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 19,0 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 44,0 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25-0,125 мм – около 35,0 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм – около 2,0 %, фракция с размером частиц более 2 мм – отсутствует. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. pH водной вытяжки – около 8,2
ПШС-20; ПШС-21; ПШС-22; ПШС-23	Известково-песчаный штукатурный раствор светло-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2 – 1:2,5. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 22,0 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 48,0 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 28,0 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм – около 1,5 %, фракции с размером частиц более 2 мм – около 0,5 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. Встречаются отдельные фрагменты извести размером 2–3 мм. pH водной вытяжки – около 8,3
Аутентичные штукатурные растворы внутренних поверхностей стен здания	
ПШС-24; ПШС-27; ПШС-28 (1 этаж)	Известково-песчаный штукатурный раствор «кирпично»-коричневато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:5. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно крупной (1–0,5 мм) фракции. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 37,0 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 33,0 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 23,0 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм – около 6,0 %, фракции с размером частиц более 2 мм – около 1,0 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. Встречаются отдельные фрагменты извести размером 2–3 мм. pH водной вытяжки – около 8,06. Раствор очень хорошо сохранился. Толщина слоя около 10–12 мм
ПШС-25 (2 этаж)	Известково-песчаный штукатурный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:4. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) и мелкой (0,25–0,125 мм) фракций в примерно равном соотношении. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 21,0 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 38,5 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25–0,125 мм - около 37,5 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм - около 2,0 %, фракции с размером частиц более 2 мм – около 1,0 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. В большом количестве встречаются отдельные мелкие фрагменты черной сажи размером около 0,5 мм. pH водной вытяжки – около 8,07. Раствор очень хорошо сохранился
ПШС-29; ПШС-30 (2 этаж)	Известково-песчаный штукатурный раствор светло-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,3 – 1:2,5. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 28,5 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 40,0 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 29,5 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм – около 1,0 %, фракции с размером частиц более 2 мм – отсутствует. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. pH водной вытяжки – около 8,40. Раствор очень хорошо сохранился
ПШС-26 (3 этаж)	Известково-песчаный штукатурный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:4. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) и мелкой (0,25–0,125 мм) фракций в примерно равном соотношении. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 21,0 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 38,5 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 37,5 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм – около 2,0 %, фракции с размером частиц более 2 мм – около 1,0 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. В большом количестве встречаются отдельные мелкие фрагменты черной сажи размером около 0,5 мм. pH водной вытяжки – около 8,07. Раствор очень хорошо сохранился
ПШС-31; ПШС-32 (3 этаж)	Известково-песчаный штукатурный раствор светло-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:3,5 – 1:3,6. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции. Особенности раствора: крупная фракция с размером зерна 1–0,5 мм составила около 36,0 % от массы заполнителя, средняя фракция с размером зерна 0,5–0,25 мм – около 39,0 % от массы заполнителя, мелкая фракция с размером зерна 0,25-0,125 мм – около 22,0 % от массы заполнителя, фракция с размером частиц 1–2 мм – около 3,0 %, фракция с размером частиц более 2 мм – отсутствует. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. pH водной вытяжки – около 8,5. Раствор очень хорошо сохранился

pH водных вытяжек всех аутентичных штукатурных растворов составляет от 7,9 до 8,82 – без особенностей, в пределах допустимой нормы для старых известково-песчаных растворов, в которых завершился процесс карбонизации и отсутствует избыток капиллярной влаги, вызывающий процессы гидролиза.

Соотношение компонентов известь:песок в различных аутентичных растворах, обнаруженных на фасадах здания бывшего коллегиума иезуитов, находится в пределах от 1:2,5 (основные плоскости стен) до 1:5 – 1:6 (декоративные детали). Первый этаж западного фасада (основная плоскость стены) первоначально был оштукатурен

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-94-102

известково-песчаным раствором желтовато-песочного цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,7 – 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (0,25–0,125 мм) фракции. Декоративные элементы западного фасада (междуэтажные и венчающий карнизы, пилястра и сандрик) были оштукатурены составами, приближенными по соотношению компонентов и гранулометрическому составу заполнителя к штукатурному раствору основной плоскости стены. Это говорит о том, что работы производились в одно время, а заполнитель (кварцевый песок) был завезен из одного и того же карьера. Второй этаж западного фасада (основная плоскость стены) первоначально был оштукатурен известково-песчаным раствором светло-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (0,25–0,125 мм) и средней (0,5–0,25 мм) фракций в примерно одинаковом соотношении. Третий этаж западного фасада (основная плоскость стены) первоначально был оштукатурен известково-песчаным раствором светло-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,5 – 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции. Данные растворы похожи по соотношению компонентов, но отличаются по гранулометрическому составу заполнителя. Раствор, использованный при первоначальном оштукатуривании фронтона здания кардинально отличается от описанных выше как по соотношению компонентов (известь:песок), так и по гранулометрическому составу заполнителя. Он представляет собой известково-песчаный штукатурный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:5. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции с иным гранулометрическим составом. Аутентичный известково-песчаный штукатурный раствор основной плоскости стены первого этажа южного фасада по соотношению компонентов и гранулометрическому составу отличается от аналогичного состава западного фасада как по соотношению компонентов, так и по гранулометрическому составу заполнителя Он представляет собой известково-песчаный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,5. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции. Это свидетельствует о том, что западный и южный фасады первоначально оштукатуривали в разное время с использованием заполнителя из разных карьеров.

Аутентичные штукатурные растворы, обнаруженные на внутренних поверхностях стен здания бывшего коллегиума кардинально отличаются как по соотношению компонентов известь:песок, так и по гранулометрическому составу заполнителя. Так, первый этаж здания был оштукатурен (основная плоскость стены, арки, обрамления окон) известково-песчаным штукатурным раствором «кирпично»-коричневато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:5, с отдельными фрагментами извести размером 2–3 мм. На втором этаже основная плоскость стены была оштукатурена известково-песчаным штукатурным раствором желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:4, а арки и обрамления окон – известково-песчаным штукатурным раствором светло-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,3–1:2,5. Причем гранулометрический состав заполнителей (кварцевого песка) данных растворов кардинально отличается. Вероятно, кварцевый песок был привезен из другого карьера для проведения строительных работ. На третьем этаже здания основная плоскость стены была оштукатурена известково-песчаным раствором желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:4. Гранулометрический состав заполнителя данного раствора приближен к составу заполнителя раствора с основной плоскости стены второго этажа. Основное отличие – в составе штукатурного раствора третьего этажа в большом количестве встречаются отдельные мелкие фрагменты черной сажи размером около 0,5 мм. Вероятно, отбор проб штукатурного слоя на третьем этаже был произведен в месте, где в ранний исторический период располагался вентиляционный канал, по которому производилось отапливание здания (известно, что в ранний исторический период в подвалах здания коллегиума располагались печи, которые топили с целью обогрева здания по специальным вентканалам, которые в более поздний исторический период были заложены). Арки и обрамления окон третьего этажа внутри здания были оштукатурены известково-песчаным раствором светло-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:3,5 – 1:3,6. Гранулометрический состав заполнителей (кварцевого песка) растворов третьего этажа здания также значительно отличается. Вероятно, кварцевый песок был привезен из другого карьера для проведения строительных работ. Аутентичные штукатурные растворы, обнаруженные на образцах, отобранных с внутренних поверхностей здания бывшего коллегиума, очень хорошо сохранились, более того, сохранили высокую прочность. Минеральный состав заполнителя у всех исследованных штукатурных растворов – полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок.

Важным моментом в исследованиях являлось определение аутентичного цветового решения фасадов здания. Опыт показывает, что очень часто аутентичное цветовое решение может кардинально отличаться от последних ремонтов [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. Зачастую принимаемые ранее решения по ремонтно-реставрационным работам не являлись комплексными, не обеспечивали сохранение первоначального архитектурного замысла оригинала, не сохраняли первоначальный внешний вид фасадов зданий.

В результате проведенных исследований определено, что аутентичное цветовое решение как фасадов здания, так и внутренних поверхностей стен действительно кардинально отличается от последних современных ремонтов. Характеристики аутентичных окрасочных составов, обнаруженных на фасадах и внутренних поверхностях стен здания, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Аутентичные окрасочные составы, обнаруженные на фасадах и внутренних поверхностях стен здания

Наименование места отбора образца	Цвет аутентичного окрасочного состава по каталогу «3D plus System» компании CAPAROL
Фасады здания бывшего коллегиума иезуитов	
ПШС-1 Основная плоскость стены полуподвала западного фасада	Состав светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 240»
ПШС-2 Основная плоскость стены башни-контрфорса западного фасада	Состав светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 180»
ПШС-3 Декоративный элемент – пилястра – западного фасада	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-4 Основная плоскость стены 1-го этажа западного фасада	Состав светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 240»
ПШС-5 Декоративный элемент – сандрик – над оконным проемом западного фасада	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-6 Междуэтажный карниз между 1-м и 2-м этажами западного фасада	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß».
ПШС-7 Основная плоскость стены 2-го этажа западного фасада	Состав светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 240»
ПШС-8 Междуэтажный карниз между 2-м и 3-м этажами западного фасада	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-94-102

Продолжение таблицы 3

Наименование места отбора образца	Цвет аутентичного окрасочного состава по каталогу «3D plus System» компании CAPAROL
Фасады здания бывшего коллегиума иезуитов	
ПШС-9 Основная плоскость стены 3-го этажа западного фасада	Состав светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 240»
ПШС-10 Венчающий карниз западного фасада	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-11 Декоративная овальная деталь фронтона западного фасада	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-12 Основная плоскость стены фронтона западного фасада	Состав светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 240»
ПШС-13 Декоративный элемент – пилястра – фронтона западного фасада	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-14 Декоративный элемент – пилястра – фронтона западного фасада	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-15 Венчающий карниз фронтона южного фасада	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-16 Основная плоскость стены 1-го этажа южного фасада	Состав светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 240»
ПШС-17 Основная плоскость стены портала входа фасада	Состав светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 240»
ПШС-18 Арка над входом	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-19 Колонна справа от портала входа	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-20 Основная плоскость стены 2-го этажа над порталом входа фасада	Состав светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 240»
ПШС-21 Декоративный элемент 2-го этажа над порталом входа	Состав светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 240»
ПШС-22 Основная плоскость стены 1-го этажа западного фасада с торца здания	Состав светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 240»
ПШС-23 Основная плоскость стены 1-го этажа южного фасада с торца здания	Состав светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 240»
Внутренние поверхности стен здания бывшего коллегиума иезуитов	
ПШС-24 Основная плоскость стены 1-го этажа	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-25 Основная плоскость стены 2-го этажа	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-26 Основная плоскость стены 3-го этажа	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-27 Арка 1-го этажа	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-28 Обрамление окна 1-го этажа (внутри здания)	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-29 Арка 2-го этажа (внутренняя поверхность)	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-30 Обрамление окна 2-го этажа (внутри здания)	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-31 Обрамление окна 3-го этажа (внутри здания)	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»
ПШС-32 Арка 3-го этажа (внутренняя поверхность)	Состав белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß»

Таким образом, первоначально все декоративные элементы фасадов здания были окрашены составами белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß». Основные поверхности стен здания (все этажи и фронтон) были окрашены составами светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 240». Исключением является основная плоскость стены башни-контрфорса западного фасада. Она первоначально была окрашена составом светло-бежевого цвета на несколько тонов темнее, но также на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 180».

Внутренние поверхности стен всех трех этажей здания бывшего коллегиума иезуитов (основные плоскости стен, арки, обрамления окон) первоначально были окрашены составами белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß».

Здание бывшего коллегиума иезуитов многократно штукатурилось и перекрашивалось составами на минеральной основе. Окрасочные работы в раннее время производились составами на минеральной основе, а в позднее время – составами на основе полимерного пленкообразующего. Нижележащие слои на представленных образцах не удалялись должным образом. Первоначально здание было оштукатурено известково-песчаными растворами и окрашено минеральными составами.

При проведении ремонтных работ особое внимание следует уделить ремонту кровли и водосточных систем. При невыполнении рекомендаций по ремонту кровли и водостоков, на наружных стенах из-за постоянной повышенной влажности возможно протекание биологической коррозии, т. е. образование водорослей и мхов на поверхности [4, 18, 20].

Заключение

В результате проведенных исследований проб штукатурных слоёв, отобранных с различных поверхностей фасадов здания бывшего коллегиума, было установлено, что соотношение компонентов известь:песок в различных обнаруженных аутентичных растворах, находится в пределах от 1:2,5 (основные плоскости стен) до 1:5 – 1:6 (декоративные детали). Первый этаж западного фасада (основная плоскость стены) первоначально был оштукатурен известково-песчаным раствором желтовато-песочного цвета

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-94-102

состава с количественным соотношением компонентов 1:2,7 – 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (0,25–0,125 мм) фракции. Второй этаж западного фасада (основная плоскость стены) первоначально был оштукатурен известково-песчаным раствором светло-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (0,25–0,125 мм) и средней (0,5–0,25 мм) фракций в примерно одинаковом соотношении. Третий этаж западного фасада (основная плоскость стены) первоначально был оштукатурен известково-песчаным раствором светло-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,5 – 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции. Данные растворы похожи по соотношению компонентов, но отличаются по гранулометрическому составу заполнителя. Раствор, использованный при первоначальном оштукатуривании фронтона здания кардинально отличается от описанных выше как по соотношению компонентов (известь:песок), так и по гранулометрическому составу заполнителя. Он представляет собой известково-песчаный штукатурный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:5. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции с иным гранулометрическим составом. Аутентичный известково-песчаный штукатурный раствор основной плоскости стены первого этажа южного фасада по соотношению компонентов и гранулометрическому составу отличается от аналогичного состава западного фасада как по соотношению компонентов, так и по гранулометрическому составу заполнителя Он представляет собой известково-песчаный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,5. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно средней (0,5–0,25 мм) фракции. Это свидетельствует о том, что западный и южный фасады первоначально оштукатуривали в разное время с использованием заполнителя из разных карьеров. pH водных вытяжек всех аутентичных штукатурных растворов составляет от 7,9 до 8,82 – без особенностей, в пределах допустимой нормы для старых известково-песчаных растворов, в которых завершился процесс карбонизации и отсутствует избыток капиллярной влаги, вызывающий процессы гидролиза. Аутентичные штукатурные растворы, обнаруженные на внутренних поверхностях стен здания бывшего коллегиума кардинально отличаются как по соотношению компонентов известь:песок, так и по гранулометрическому составу заполнителя. Аутентичные штукатурные растворы, обнаруженные на образцах, отобранных с внутренних поверхностей здания бывшего коллегиума, очень хорошо сохранились, более того, сохранили высокую прочность.

Первоначально все декоративные элементы фасадов здания были окрашены составами белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß». Основные поверхности стен здания (все этажи и фронтон) были окрашены составами светло-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 240». Исключением является основная плоскость стены башни-контрфорса западного фасада. Она первоначально была окрашена составом светло-бежевого цвета на несколько тонов темнее, но также на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Palazzo 180».

Внутренние поверхности стен всех трех этажей здания бывшего коллегиума иезуитов (основные плоскости стен, арки, обрамления окон) первоначально были окрашены составами белого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Natur-Weiß».

Выводы

В результате проведенных исследований определено, что аутентичное цветовое решение как фасадов здания, так и интерьеров отличается от последних современных ремонтов, произведенных с использованием окрасочных составов на основе полимерного пленкообразующего, что недопустимо на исторических зданиях.

Во времена Советского Союза ремонт фасадов проводился регулярно, но без проведения каких-либо обследований, и состоял в расчистке фасада в местах отслоения краски или штукатурного покрытия. Далее восполнялись утраты штукатурного слоя штукатурными растворами в соотношении цемент:известь:заполнитель = 1:1:3. Сложные растворы, особенно если они при ремонтах уложены на традиционную штукатурную отделку памятников, а именно, известково-песчаную штукатурку, вызывали «запаривание» оригинальных растворов, их разрушение. Поверхность шпатлевалась и окрашивалась, в основном красками на основе полимерного плёнкообразующего [4, 19, 20, 21].

Памятники истории и культуры (здания и сооружения, старые кварталы, исторические города и центры) являются национальным достоянием Республики Беларусь, мировым культурным наследием. Сохранение культурного наследия в нашей стране всё более осознается как одна из самых важных проблем, стоящих перед обществом. Проведенные исследования и накопленный опыт работы на недвижимых объектах историко-культурного наследия позволяют формулировать основные принципы решения инженерных задач в реставрационном строительстве для конкретного объекта. Проведению восстановительно-реставрационных работ должны предшествовать комплексное научно-техническое обследование, в том числе инженерно-археологические изыскания памятника, осуществление долголетнего мониторинга.

Все материалы, применяемые для ремонта фасадов и интерьеров исторических зданий, должны быть совместимы с сохраняемыми (аутентичными) материалами по своим физико-механическим и физико-химическим характеристикам, работать с ними в единой системе, не провоцируя появления и развития дефектов [8, 21].

Список цитированных источников

1. Дзяржаўны спіс гісторыка-культурных каштоўнасцей Рэспублікі Беларусь / склад. В. Я. Абламскі, І. М. Чарняўскі, Ю. А. Барысюк. – Мінск : БЕЛТА, 2009. – 684 с.
2. Кодэкс Рэспублікі Беларусь аб культуры : 20 ліп. 2016 г., № 412-З : прыняты Палатай прадстаўнікоў 24 чэрв. 2016 г. : ухвалены Саветам Рэспублікі 30 чэрв. 2016 г. – Мінск : Нац. цэнтр прававой інфарм. Рэсп. Беларусь, 2016. – 272 с.
3. История Пинска. – URL: https://www.pinsk-history/ru (дата обращения: 15.02.2026).
4. Скальный, В. С. Проблемы сохранения, причины разрушения и первичное обследование недвижимых памятников архитектуры и истории : монография / В. С. Скальный, Е. В. Косыгин. – Орел : ГАУ, 2003. – 201 с.
5. Фрёссель, Ф. Ремонт влажных и повреждённых солями строительных сооружений / Ф. Фрёссель. – М. : Пэйнт-медиа, 2006. – 320 с.
6. Реставрация памятников архитектуры: учебное пособие для вузов / С. С. Подъяпольский, Г. Б. Бессонов, Л. А. Беляев, Т. М. Постникова ; под общ. ред. С. С. Подъяпольского. – 2-е изд. – М. : Стройиздат, 2000. – 288 с.
7. Ивлиев, А. А. Реставрационные строительные работы / А. А. Ивлиев, А. А. Калыгин. – М. : ПрофОбрИздат, 2001. – 272 с.
8. Куртуков, В. А. Об особенностях выбора строительных материалов для реставрации объектов историко-культурного наследия / В. А. Куртуков // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 2. – С. 66–69.
9. Никитин, М. К. Химия в реставрации : справ. пособие / М. К. Никитин, Е. П. Мельникова. – Л. : Химия, 1990. – 304 с.
10. Брок, Т. Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям / Т. Брок, М. Гротеклаус, П. Мишке ; под ред. Л. Н. Машляковского ; пер. с англ. – М. : Пэйнт-Медиа, 2004. – 548 с.
11. Стойе, Д. Краски, покрытия и растворители / Д. Стойе, В. Фрейтаг ; под ред. Э. Ф. Ицко ; пер. с англ. – СПб. : Профессия, 2007. – 528 с.
12. Пруцын, О. И. Реставрация и реконструкция архитектурного наследия. Теоретические и методические основы реставрации исторического и архитектурного наследия / О. И. Пруцын. – М. : Академия реставрации, 1996. – 91 с.
13. Тур, Э. А. К вопросу о сохранении объектов историко-культурного наследия в г. Бресте / Э. А. Тур, С. В. Басов // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2018. – № 1. – С. 17–21.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-94-102

14. Тур, Э. А. Исследование минеральных материалов, использованных при постройке дворцового комплекса Сапегов в Ружанах / Э. А. Тур, С. В. Басов // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 1. – С. 88–91.
15. Комплексные научные исследования фасадов костела святых Петра и Павла в д. Рожанка Гродненской области / Э. А. Тур, С. В. Басов, Е. В. Счасная, В. В. Тричик // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2020. – № 1. – С. 147–152.
16. Комплексные научные исследования руин усадьбы «Наднёман» в д. Наднёман Узденского района Минской области как объекта историко-культурного наследия / Э. А. Тур, С. В. Басов, Е. В. Счасная, В. В. Тричик // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 1. – С. 33–38.
17. Свято-Рождества-Богородицкая церковь-крепость оборонительного типа в д. Мурованка Гродненской области как объект историко-культурного наследия Республики Беларусь / Э. А. Тур, Е. В. Счасная, С. В. Басов [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 2. – С. 32–38. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-131-2-32-38.
18. Тур, Э. А. Реставрация Коссовского дворца Пусловских и решение возникших при этом технических проблем / Э. А. Тур, В. Н. Казаков, С. В. Басов // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2017 – № 1. – С. 128–131.
19. Знаковые недвижимые объекты историко-культурного наследия г. Бреста и Брестского района, исследованные в 2012–2021 годы / Э. А. Тур, С. В. Басов, В. Н. Казаков, И. Т. Сотников // Реставрация историко-культурных объектов как сохранение наследия Республики Беларусь : сб. статей науч.-техн. семинара, Брест, 27 сент. 2022 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: Э. А. Тур [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2022. – С. 74–84.
20. Тур, Э. А. Комплексные научные исследования объектов историко-культурного наследия г. Пинска / Э. А. Тур, С. В. Басов, Е. Ю. Русак // Реставрация историко-культурных объектов как сохранение наследия Республики Беларусь : сб. статей науч.-техн. семинара, Брест, 26 сент. 2023 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: Э. А. Тур [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2023. – С. 90–101.
21. Комплексные научные исследования объектов, являющихся историко-культурными ценностями г. Пинска / Э. А. Тур, С. В. Басов, О. А. Акулова, Е. Ю. Русак // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 1. – С. 28–33. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-28-33.
22. Тур, Э. А. Комплексные научные исследования здания почты в г. Лида Гродненской области как объекта историко-культурного наследия Республики Беларусь / Э. А. Тур, Е. Ю. Русак // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2025. – № 1. – С. 45–52. – DOI: 10.36773/1818-1112-2025-136-1-45-52.

References

1. Dzyarzhaўny spis gistoryka-kul'turnyh kashtoўnascej Respubliki Belarus' / sklad. V. YA. Ablamski, I. M. CHarnyaўski, YU. A. Barysyuk. – Minsk : BELTA, 2009. – 684 s.
2. Kodeks Respubliki Belarus' ab kul'tury : 20 lip. 2016 g., № 412-Z : prynyaty Palataj pradstaўnikoў 24 cherv. 2016 g. : uhvaleny Savetam Respubliki 30 cherv. 2016 g. – Minsk : Nac. centr pravavoj infarm. Resp. Belarus', 2016. – 272 s.
3. Istoriya Pinska. – URL: https://www.pinsk-history/ru (data obrashcheniya: 15.02.2026).
4. Skal'nyj, B. C. Problemy sohraneniya, prichiny razrusheniya i pervichnoe obsledovanie nedvizhimyh pamyatnikov arhitektury i istorii : monografiya / B. C. Skal'nyj, E. V. Kosygin. – Orel : GAU, 2003. – 201 s.
5. Fryossel', F. Remont vlazhnyh i povrezhdyonnyh solyami stroitel'nyh sooruzhenij / F. Fryossel'. – M. : Pejnt-media, 2006. – 320 s.
6. Restavraciya pamyatnikov arhitektury: uchebnoe posobie dlya vuzov / S. S. Pod"yapol'skij, G. B. Bessonov, L. A. Belyaev, T. M. Postnikova ; pod obshch. red. S. S. Pod"yapol'skogo. – 2-e izd. – M. : Strojizdat, 2000. – 288 s.
7. Ivliev, A. A. Restavracionnye stroitel'nye raboty / A. A. Ivliev, A. A. Kalygin. – M. : ProfObrIzdat, 2001. – 272 s.
8. Kurtukov, V. A. Ob osobennostyah vybora stroitel'nyh materialov dlya restavracii ob"ektov istoriko-kul'turnogo naslediya / V. A. Kurtukov // Vestnik TGASU. – 2012. – № 2. – S. 66–69.
9. Nikitin, M. K. Himiya v restavracii : sprav. posobie / M. K. Nikitin, E. P. Mel'nikova. – L. : Himiya, 1990. – 304 s.
10. Brok, T. Evropejskoe rukovodstvo po lakokrasochnym materialam i pokrytiyam / T. Brok, M. Groteklaus, P. Mishke ; pod red. L. N. Mashlyakovskogo ; per. s angl. – M. : Pejnt-Media, 2004. – 548 s.
11. Stoje, D. Kraski, pokrytiya i rastvoriteli / D. Stoje, V. Frejtag ; pod red. E. F. Icko ; per. s angl. – SPb. : Professiya, 2007. – 528 s.
12. Prucyn, O. I. Restavraciya i rekonstrukciya arhitekturnogo naslediya. Teoreticheskie i metodicheskie osnovy restavracii istoricheskogo i arhitekturnogo naslediya / O. I. Prucyn. – M. : Akademiya restavracii, 1996. – 91 s.
13. Tur, E. A. K voprosu o sohranenii ob"ektov istoriko-kul'turnogo naslediya v g. Breste / E. A. Tur, S. V. Basov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2018. – № 1. – S. 17–21.
14. Tur, E. A. Issledovanie mineral'nyh materialov, ispol'zovannyh pri postrojke dvorcovogo kompleksa Sapegov v Ruzhanah / E. A. Tur, S. V. Basov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2014. – № 1. – S. 88–91.
15. Kompleksnye nauchnye issledovaniya fasadov kostela svyatyh Petra i Pavla v d. Rozhanka Grodnenskoj oblasti / E. A. Tur, S. V. Basov, E. V. Schasnaya, V. V. Trichik // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2020. – № 1. – S. 147–152.
16. Kompleksnye nauchnye issledovaniya ruin usad'by «Nadnyoman» v d. Nadnyoman Uzdenskogo rajona Minskoj oblasti kak ob"ekta istoriko-kul'turnogo naslediya / E. A. Tur, S. V. Basov, E. V. Schasnaya, V. V. Trichik // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – № 1. – S. 33–38.
17. Svyato-Rozhdestva-Bogorodickaya cerkov'-krepost' oboronitel'nogo tipa v d. Murovanka Grodnenskoj oblasti kak ob"ekt istoriko-kul'turnogo naslediya Respubliki Belarus' / E. A. Tur, E. V. Schasnaya, S. V. Basov [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2023. – № 2. – S. 32–38. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-131-2-32-38.
18. Tur, E. A. Restavraciya Kossovskogo dvorca Puslovskih i reshenie voznikshih pri etom tekhnicheskih problem / E. A. Tur, V. N. Kazakov, S. V. Basov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2017 – № 1. – S. 128–131.
19. Znakovye nedvizhimye ob"ekty istoriko-kul'turnogo naslediya g. Bresta i Brestskogo rajona, issledovannye v 2012–2021 gody / E. A. Tur, S. V. Basov, V. N. Kazakov, I. T. Sotnikov // Restavraciya istoriko-kul'turnyh ob"ektov kak sohranenie naslediya Respubliki Belarus' : sb. statej nauch.-tekhn. seminara, Brest, 27 sent. 2022 g. / Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: E. A. Tur [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2022. – S. 74–84.
20. Tur, E. A. Kompleksnye nauchnye issledovaniya ob"ektov istoriko-kul'turnogo naslediya g. Pinska / E. A. Tur, S. V. Basov, E. YU. Rusak // Restavraciya istoriko-kul'turnyh ob"ektov kak sohranenie naslediya Respubliki Belarus' : sb. statej nauch.-tekhn. seminara, Brest, 26 sent. 2023 g. / Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: E. A. Tur [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2023. – S. 90–101.
21. Kompleksnye nauchnye issledovaniya ob"ektov, yavlyayushchihsya istoriko-kul'turnymi cennostyami g. Pinska / E. A. Tur, S. V. Basov, O. A. Akulova, E. YU. Rusak // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 1. – S. 28–33. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-28-33.
22. Tur, E. A. Kompleksnye nauchnye issledovaniya zdaniya pochty v g. Lida Grodnenskoj oblasti kak ob"ekta istoriko-kul'turnogo naslediya Respubliki Belarus' / E. A. Tur, E. YU. Rusak // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2025. – № 1. – S. 45–52. – DOI: 10.36773/1818-1112-2025-136-1-45-52.

Материал поступил 16.02.2026, одобрен 03.03.2026, принят к публикации 10.03.2026

УДК 624.012.4-183.2

К ВОПРОСУ ПРОЧНОСТИ БЕТОНОВ НОРМАЛЬНОГО ВЕСА ПРИ ДВУХОСНОМ СЖАТИИ

С. В. Цветков[1], С. С. Цветков[2]

[1] К. т. н., главный конструктор, ООО «ПетербургРеставрация», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vasilieva4@yandex.ru
[2] Студент, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: tswetkov.svyatoslav@yandex.ru

Реферат

В статье приводятся результаты исследования изменения прочности бетонов нормального веса при двухосном сжатии по результатам моделирования, а также выполнено сравнение с экспериментальными данными и теоретическими исследованиями других авторов.

Несмотря на большое количество имеющегося экспериментального и теоретического материалов, вопрос прочности бетона в условиях двухосного сжатия до настоящего времени остается открытым.

Существующие зависимости, которые определяют прочность бетона при двухосном сжатии, получены экспериментально и являются эмпирическими. Но отсутствие единой методики проведения испытаний, применяемого оборудования, формы образцов существенно влияют на результаты, усложняя их совместное рассмотрение. Сами же результаты указывают как на повышение прочности бетона при двухосном сжатии, так и на понижение. Следовательно, нужны теоретические исследования поведения бетона в указанном напряженном состоянии, которые могут раскрыть причины изменения прочности, и в дальнейшем позволят определить направления экспериментальных исследований.

Применение в теоретических исследованиях методов теории упругости и механики разрушения требуют привлечения сложного математического аппарата. Бетон, являясь анизотропным материалом, имеет в своей структуре большое количество неоднородных включений в виде пор и зерен крупного заполнителя, что делает применение этих методов затруднительным.

В материалах статьи представлена модель для одноосного и двухосного сжатия бетона, основанная на применении теории протекания – математической теории, описывающей возникновение связанных структур в случайных средах. В исходную модель внесены некоторые изменения и дополнения, сохраняющие в целом общий подход. Результаты моделирования указывают на наличие устойчивого роста прочности бетона при двухосном сжатии по сравнению с одноосным сжатием.

Применение представленной модели, с нашей точки зрения, позволяет определить причины изменения прочности бетона в условиях двухосного сжатия и дать этому факту количественную оценку.

Ключевые слова: бетон нормального веса, одноосное сжатие, двухосное сжатие, теория протекания, случайный процесс, изменение прочности, единая методика, разрушение бетона.

ON THE STRENGTH OF NORMAL WEIGHT CONCRETES IN BIAXIAL COMPRESSION

S. V. Tsvetkov, S. S. Tsvetkov

Abstract

The article presents the results of a study of the change in the strength of normal-weight concretes under biaxial compression based on modeling results, and compares them with experimental data and theoretical studies by other authors.

Despite the large number of available experimental and theoretical materials, the issue of concrete strength under biaxial compression remains open to this day.

The existing dependencies that determine the strength of concrete under biaxial compression were obtained experimentally and are empirical. But the lack of a unified testing methodology, the equipment used, and the shape of the samples significantly affect the results, complicating their joint consideration. The results themselves indicate both an increase in the strength of concrete under biaxial compression and a decrease. Consequently, theoretical studies of the behavior of concrete in the specified stress state are needed, which can reveal the causes of strength changes and will further determine the directions of experimental research.

The application of elasticity theory and fracture mechanics methods in theoretical studies requires the use of complex mathematical apparatus. Concrete, being an anisotropic material, has a large number of heterogeneous inclusions in its structure in the form of pores and grains of large aggregate, which makes the application of these methods difficult.

The article presents a model for uniaxial and biaxial compression of concrete based on the application of percolation theory – a mathematical theory describing the occurrence of related structures in random environments. Some changes and additions have been made to the original model, while generally preserving the general approach. The modeling results indicate the presence of a steady increase in the strength of concrete under biaxial compression compared to uniaxial compression.

The application of the presented model, in our opinion, allows us to determine the causes of changes in the strength of concrete under biaxial compression and to give a quantitative assessment of this fact.

Keywords: normal weight concrete, uniaxial compression, biaxial compression, flow theory, random process, strength change, uniform technique, concrete destruction.

Введение

Новые методы расчета конструкций требуют наличия достоверной информации о прочностных характеристиках бетона в различных напряженных состояниях. Одним из таких состояний является двухосное сжатие бетона. Несмотря на то, что исследования бетона в этом направлении проводятся уже более ста лет, в получаемых экспериментальных результатах фиксируется как снижение прочности по сравнению с осевым сжатием, так и ее повышение в 1,5–2,0 раза [3, 7, 11]. Эти отклонения связаны, в том числе с условиями проведения испытаний [12, 14].

Единая методика проведения испытаний представлена в Рекомендациях по определению прочностных и деформативных характеристик бетона при неодноосных напряженных состояниях (далее – Рекомендации НИИЖБа)[1].

[1] Рекомендации по определению прочностных и деформативных характеристик бетона при неодноосных напряженных состояниях. – М. : Госстрой СССР, 1986. – 72 с.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-103-108

Бетон является в своей основе неоднородным материалом. В растворной части (матрице) распределены включения: поры различной формы и размеров, зерна крупного заполнителя, свойства которых отличны от матрицы. Это приводит к концентрации напряжений вокруг включений, искажающих поля напряжений от внешних нагрузок, что значительно затрудняет или делает невозможным применение методов классической теории упругости [5, 13].

Моделирование поведения бетона в различных напряженных состояниях с использованием механики разрушения и статистических законов распределения включений для определения его прочностных характеристик, представлены в работе [8]. Следует отметить, что такое моделирование связано с использованием сложного математического аппарата при наличии целого ряда допущений.

В статье представлено исследование прочности бетонов нормального веса в условиях двухосного сжатия ($\sigma_1 \neq 0$; $\sigma_3 \neq 0$; $\sigma_2 = 0$) с использованием модели, ранее подробно описанной в [20] для сжатия – растяжения.

Методы

В основу расчетной модели положена «задача узлов», рассматриваемая в теории «протекания» – математической теории, применяемой в физике и химии для анализа и изучения процессов, происходящих в неоднородных средах, характеристики которых являются случайными величинами [16].

Например, для исследования электропроводности смеси, задается «система», в простейшем случае – квадратная решетка, каждый узел которой не является электропроводящим. Узлы являются независимыми, в том смысле, что изменение свойств одного не влияет на свойства другого.

Общее количество узлов в решетке – N_0. Случайным образом узлам последовательно «назначаются» электропроводящие свойства. Если рядом с «электропроводным» узлом появляется узел, обладающий также «электропроводными» свойствами, они соединяются между собой. С ростом количества «электропроводных» узлов, появляется непрерывная цепочка из «электропроводных» узлов, соединяющих один край системы с другой – система становится «электропроводной». Количество узлов $N_{уз}$, при котором происходит изменение свойств решетки, называется «пороговым», а отношение $N_{уз}/N_0$ характеризует «пороговый переход».

В исходную модель «теории протекания» были внесены следующие дополнения.

1. В «теории протекания» узел имеет только определенные свойства (например, узел «электропроводный» или нет).

Для принятой модели каждому узлу решетки присваивалось случайное числовое значение «прочности». «Прочности» узлов, являясь независимыми случайными величинами, распределены по нормальному закону распределения.

Характеристиками нормального распределения являются: среднее значение (математическое ожидание) и среднее квадратическое отклонение (СКО):

– за среднее значение (математическое ожидание) была принята средняя прочность бетона, полученная по результатам испытаний на осевое сжатие бетонных призм – f_{cm};

– определение среднего квадратического отклонения приведено в [20]. В общем, значение СКО определяется положением нижней параметрической точки R_T^0, фиксирующейся при осевом сжатии бетона. Эти напряжения определяют начало нарушения структуры бетона. По данным [8], при напряжениях ниже нижней параметрической точки, с обеспеченностью не менее 95 %, нарушения в структуре бетоне, связанные с его нагружением, отсутствуют. Тогда, если «прочность» узлов является случайной величиной и имеет нормальный закон распределения, можно принять, что с доверительной вероятностью 95,4 % все значения этой величины отклоняются от математического ожидания на величину двух средних квадратических отклонений и расположены в интервале ($f_{cm} - 2\sigma$; $f_{cm} + 2\sigma$), где σ – среднее квадратическое отклонение (СКО). Иными словами, $\sigma = (f_{cm} - R_T^0)/2$. Далее, чтобы не путать напряжения с СКО, оно обозначено как D.

2. В теории протекания случайным образом менялись исходные свойства узлов: одни из них удовлетворяли условию электропроводности, а другие – нет. Постепенно, меняя свойства узлов, решетка переходит из «неэлектропроводного» состояния в «электропроводное».

В нашем случае для модели поэтапно задавалась фиксированная «внешняя нагрузка», меняющая состояние узла – «неразрушенный» или «разрушенный», т. е. если «нагрузка» превышала «прочность» узла, он считался «разрушенным».

3. Появление непрерывной цепочки «разрушенных» узлов, пересекающих исходную решетку, считалось наступлением «разрушения» всей решетки.

«Окно» программы для реализации описанной модели, приведено на рисунке 1: в качестве примера задана решетка размером 10 × 10 ячеек, математическое ожидание (среднее значение) – $f_{cm} = 26{,}4$ МПа; среднее квадратическое отклонение (СКО) $D = 8{,}62$ МПа; текущий уровень «нагрузки» $\sigma_{c,i} = 0{,}7$, $f_{em} = 18{,}64$ МПа; шаг «нагружения» – 0,5 МПа; при заданном уровне «нагрузки» количество «разрушенных» узлов – 16 штук.

Порядок построения модели для осевого сжатия.

1.«Прочность» элементов структуры r_i распределена по нормальному закону со следующими характеристиками: математическое ожидание f_c, среднее квадратическое отклонение – $D = (f_{cm} - R_T^0)/2$. Определение параметрических точек выполнялось по рекомендациям [1] для осевого сжатия, что в целом совпадает данными, приведенными в [4, 15].

f_{em} определялось в соответствии с Рекомендациями НИИЖБа.

2. Из выборки, с указанными в п. 1 характеристиками, случайным образом берутся значения r_i, которые помещаются в узлы квадратной решетки. Последовательно задавалось «внешнее воздействие» $\sigma_{c,i}$.

3. При $\sigma_{c,i} > r_i$, узел считался «разрушенным». «Разрушенные» узлы, расположенные рядом друг с другом, образуют «цепочку». Когда связанная цепочка «пересекает» всю решетку, это считается «разрушением». При «разрушении» фиксируется общее количество «разрушенных» узлов N_{max} и значение «напряжений» $\sigma_{c,\,max}$, соответствующих «разрушению». Реализация одной из решеток представлена на рисунке 2: $N_{max} = 57$ штук; $\sigma_{c,\,max} = 27{,}0$ МПа.

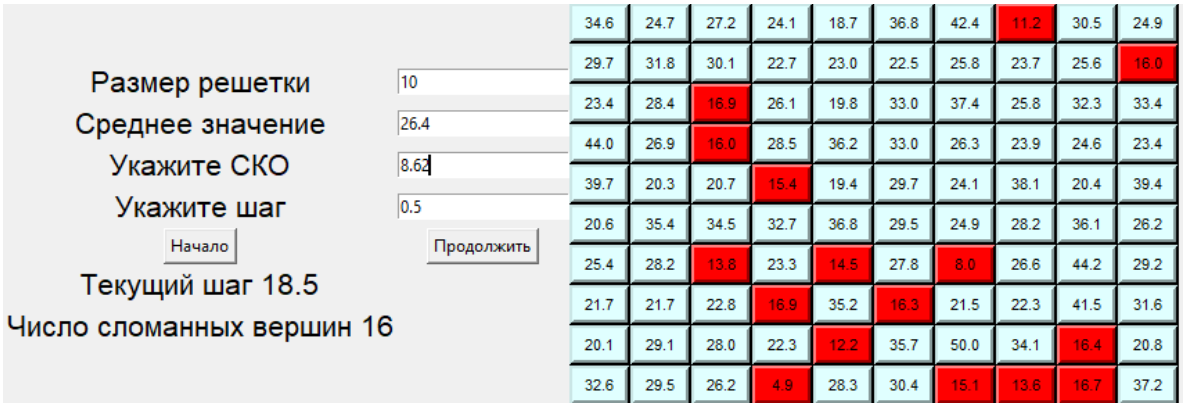
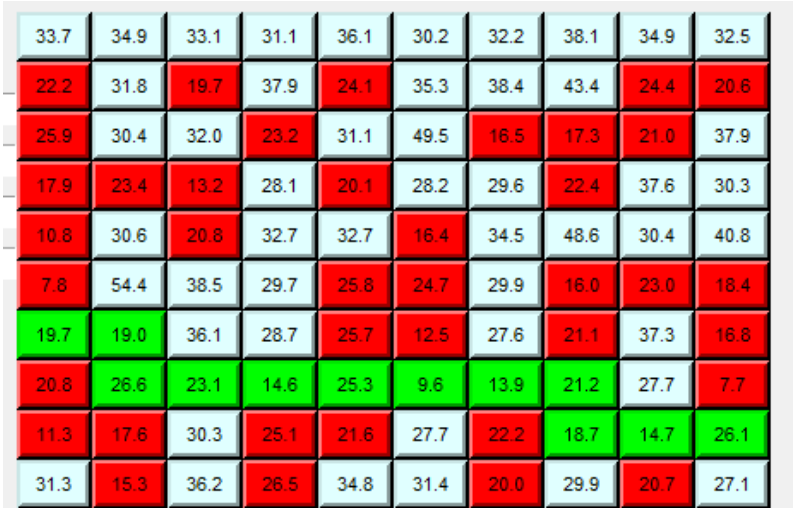


Рисунок 1 – «Окно» программы

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-103-108



Решетка 10 × 10; прочность бетонных призм – f_{cm} = 26,4 МПа; «разрушающее» напряжение $\sigma_{c,\,max}$ = 27,0 МПа; число разрушенных узлов N_{max} = 57 штук

Рисунок 2 – Реализация одной из решеток

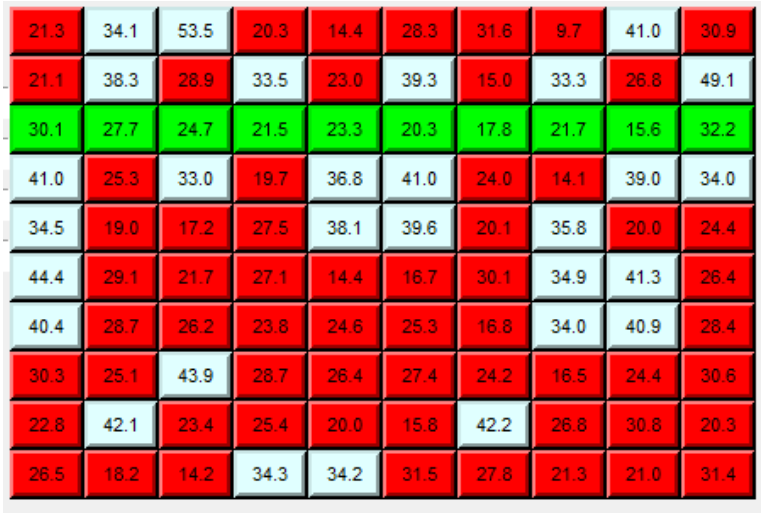
Описанная выше модель, соответствующая осевому сжатию, в теории протекания определена, как «неориентированное протекание». Назовем этот случай «неориентированным разрушением».

Для двухосного сжатия используется задача теории протекания, соответствующая так называемому «ориентированному протеканию» – процессу, при котором элементы системы (узлы решетки) переходят из одного состояния в другое, образуя непрерывную цепочку от одного края решетки в другой в строго определенном направлении.

Используется тот же порядок составления модели с единственным отличием – рассматривается строго определенное направление расположения «разрушенных» узлов – «ориентированное разрушение», что характерно для двухосного сжатия [10].

Реализация модели при указанных выше характеристиках нормального распределения приведена на рисунке 3.

Следует отметить при «ориентированном разрушении» наблюдается, как увеличение общего количества разрушенных узлов – N_{max} = 71 штук, так и рост «разрушающего» напряжения – $\sigma_{c,\,max}$ = 32,5 МПа.



Решетка 10 × 10; прочность бетонных призм – f_{cm} = 26,4 МПа; «разрушающее» напряжение $\sigma_{c,\,max}$ = 32,7 МПа; число разрушенных узлов N_{max} = 71 штук

Рисунок 3 – «Ориентированное» разрушение

Для построения графика зависимости прочности бетона при двухосном сжатии, необходимо рассмотреть следующие модели:

1) модель осевого сжатия – «неориентированное разрушение» решетки;

2) модель двухосного сжатия – «ориентированное разрушение» решетки – два случая (а и б);

3) модель осевого сжатия с учетом частичного увеличения прочности узлов.

Пункт 1. Реализуется модель осевого сжатия – «неориентированное разрушение». Результат моделирования – значение прочности бетона при осевом сжатии, определяемое по результатам моделирования в зависимости от «прочности» каждой решетки.

Пункт 2а. Моделируя равномерное двухосное сжатие, когда $\sigma_1 = \sigma_3$, «разрушение» решетки должно происходить по наиболее «слабому направлению». По результатам моделирования определяется среднее значение «прочности», соответствующее случаю $\sigma_1 = \sigma_2$.

Пункт 2б. При $\sigma_1 \neq \sigma_3$ разрушение решетки может происходить, как по наименее «прочному», так и наиболее «прочному направлению». Для каждой решетки моделировалось два случая «ориентированного разрушения»: последовательно, по двум взаимно перпендикулярным направлениям – наиболее и наименее «прочному». В результате «прочность» решетки определялась как среднее между этими двумя значениями.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-103-108

Пункт 3. Сжатие по второму направлению меняет поля напряжений в структуре бетона. В теории упругости исследовались поля напряжений в пластинах с круглыми и овальными отверстиями для случаев двухосного растяжения, двухосного сжатия и сжатия с растяжением. Имеются решения для включений с различными характеристиками. В реальных условиях распределение пор и включений в бетоне, а, следовательно, и распределение полей напряжений, носят случайный характер и практически не подлежат анализу [6].

Учитывая вышеизложенное, целесообразно при моделировании использовать допущения, позволяющие не привлекать сложный математический аппарат.

Рассмотрим решетку «с неориентированным разрушением», в узлы которой поместим значения «прочности» узлов, отличающиеся от начальных на величину, зависящую от бокового обжатия σ_3. Новая прочность узла составит $r_{i2} = r_i + f(\sigma_3)$. Примем значение второго слагаемого не постоянным, а переменным и определяемым как $f(\sigma_3) = \sigma_3 \cos\alpha_i$. Тогда новое значение прочности узла: $r_{i2} = r_i + \sigma_3 \cos\alpha_i$. В модели это учитывается добавлением к прочности узла величины $\Delta\sigma_\alpha = \sigma_3 \cos\alpha$ (значения угла α принимались дискретными: 0^0, 30^0, 60^0 и 90^0). Схема для определения величины $\Delta\sigma_\alpha$ представлена на рисунке 4.

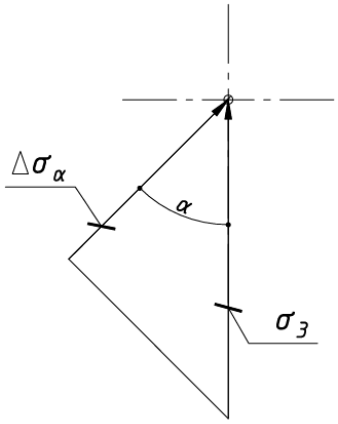


Рисунок 4 – Схема определения $\Delta\sigma_\alpha$

Результаты моделирования

Моделирование выполнялось для бетонов, для которых представлены эмпирические зависимости прочности бетона при двухосном сжатии [9]: f_c = 10,0 МПа и f_c =50,0 МПа.

Используя Рекомендации НИИЖБа и [1], для бетонов получены следующие характеристики:

– бетон нормального веса со средней прочностью призм на осевое сжатие f_{cm} = 10,0 МПа; значение нижнего параметрического уровня – $R_T^0 = 0{,}2\ f_{cm}$; $D = (f_{cm} - R_T^0)/2$ = 4,0 МПа;

– бетон нормального веса с прочностью f_{cm} = 50,0 МПа; значение нижнего параметрического уровня – $R_T^0 = 0{,}445\ f_{cm}$; $D = (f_{cm} - R_T^0)/2$ = 14,0 МПа.

Рассмотрим порядок построения зависимости прочности бетона при двухосном сжатии для бетона f_{cm} = 10,0 МПа по рисунку 5.

Моделирование выполнялось на двадцати решетках размером 20 × 20 ячеек.

По п. 1. Точка графика (1), соответствующая значению напряжений бокового обжатия σ_3 = 0. Среднее значение прочности по результатам моделирования:

– $f_{cm,\,mod} = \sum f_{cmi,\,mod}/n$ = 218,0/20 = 10,9 МПа.

По п. 2а. По результатам моделирования («ориентированное разрушение») при напряжениях бокового обжатия $\sigma_1 = \sigma_3$, минимальное значение «прочности» составляет:

– $f_{cm2,\,mod} = \sum f_{cmi,\,mod}/n$ = 282,0/20 = 14,1 МПа.

На рисунке 5 представлена прямая $\sigma_1/f_{cm2,\,mod}$ = 14,1/10,9 = 1,29, пересекающая «диагональную» прямую в точке 2.

По п. 2б – $\sigma_1 \neq \sigma_3$. «Ориентированное разрушение», соответствующее наибольшей «прочности», дает значение «прочности» – $f'_{cm2,\,mod} = \sum f'_{cm,\,mod}/n$ = 298,0/20 = 14,9 МПа.

Среднее значение между меньшей и наибольшей «прочностями»: $f_{cm2,\,mod}$ = (14,1 + 14,9)/2 = 14,5 МПа.

На рисунке 5 представлена прямая $\sigma_1/f_{cm2,\,mod}$ = 14,5/10,9 = 1,33.

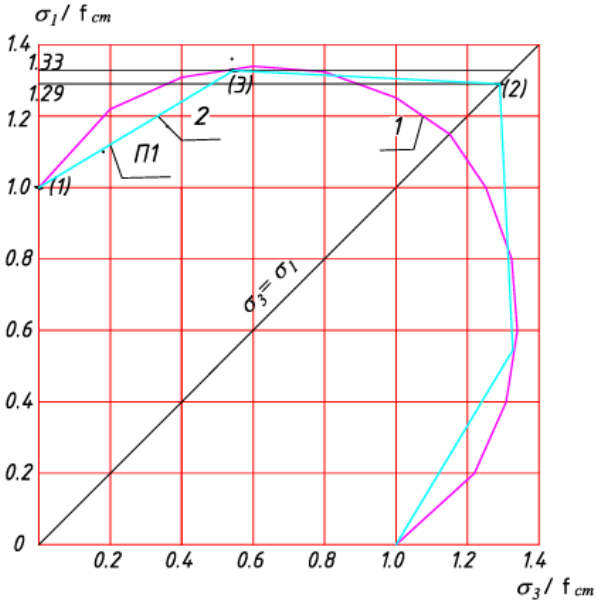
По п. 3. На рисунке 5 по результатам рассмотрения «неориентированного разрушения» с увеличенной прочностью узлов ($r_{i2} = r_i + \sigma_3 \cos\alpha_i$) по точкам при σ_3/f_{cm} = 0,18; σ_3/f_{cm} = 0,36 и σ_3/f_{cm} = 0,54, проведена прямая (П. 1).

Точка пересечения П. 1 с прямой, соответствующей $\sigma_1/f_{c,\,mod}$ = 1,33 обозначена как (3).

Соединяя точки (1), (3) и (2), получаем график зависимости прочности бетона для случая двухосного сжатия ($\sigma_1/f_{cm,\,mod}$ – $\sigma_3/f_{cm,\,mod}$).

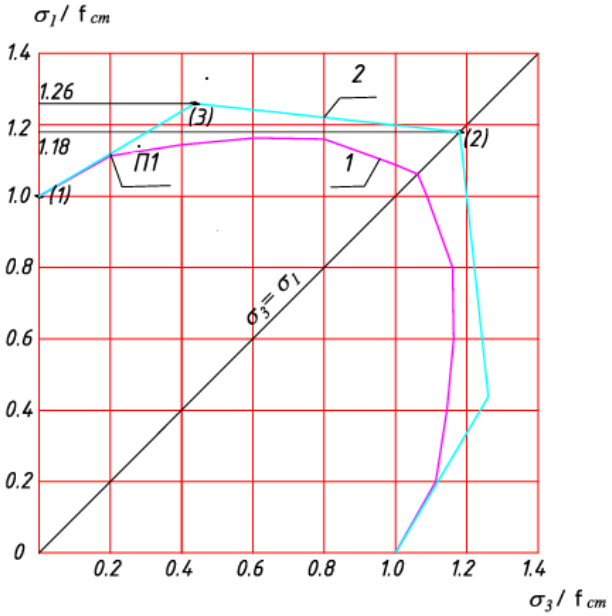
Графики по эмпирической зависимости, указанной в [9], представлены в кусочно-линейном виде на рисунке 5.

Аналогично выполнено построение графика для f_{cm} = 50,0 МПа – см. рисунок 6.



1) по эмпирическим зависимостям [9];
2) по результатам моделирования

Рисунок 5 – Изменение прочности бетона при двухосном сжатии в зависимости от соотношения главных напряжений для бетона f_{cm} = 10,0 МПа



1) по эмпирическим зависимостям [9];
2) по результатам моделирования

Рисунок 6 – Изменение прочности бетона при двухосном сжатии в зависимости от соотношения главных напряжений для бетона f_{cm} = 50,0 МПа

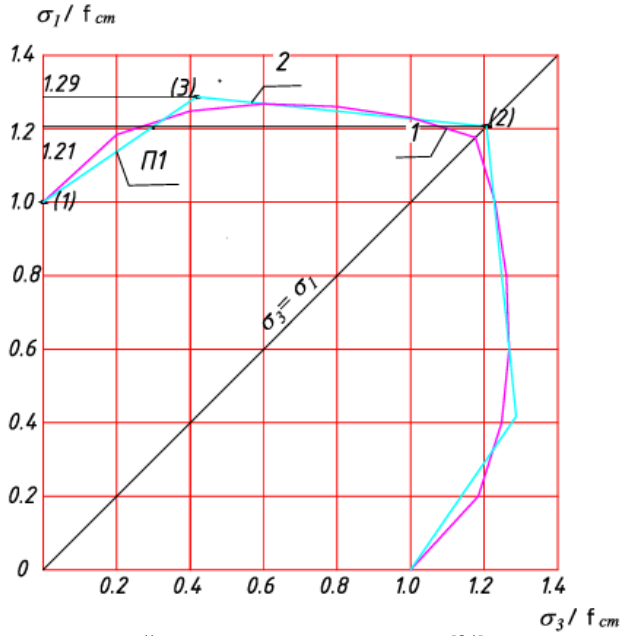
https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-103-108

Обсуждение

Сравнение графиков ($\sigma_1/f_{cm,\,mod}$ – $\sigma_3/f_{cm,\,mod}$), полученных в результате моделирования с экспериментальными данными, приведенными в [21] и Руководстве НИИЖБа, представлено на рисунках 7–9.

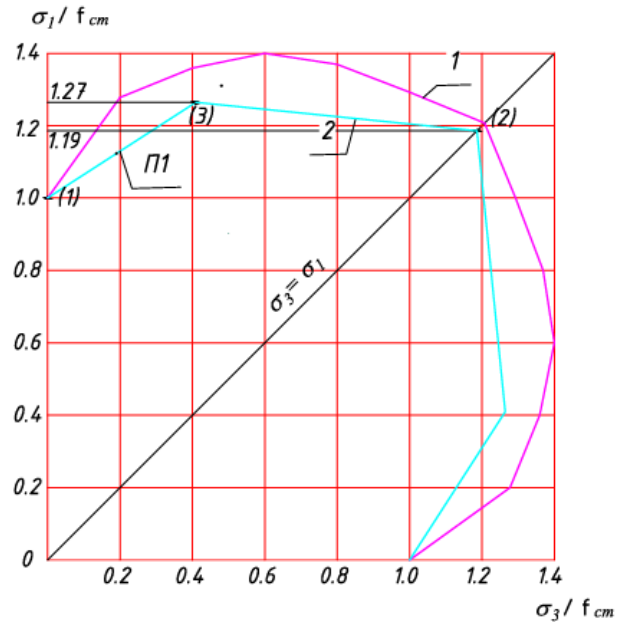
В [21] исследовался бетон нормального веса прочностью при осевом сжатии f_{cm} = 31,0 МПа. При моделировании использованы следующие характеристики нормального распределения: среднее значение – f_{cm} = 31,0 МПа; СКО – $D = (f_{cm} - R_T^0)/2$ = 9,77 МПа при значении нижнего параметрического уровня по [1] – R_T^0 = 0,37 f_{cm}.

Используя описанную выше методику, на рисунке 7 приведем результаты моделирования.



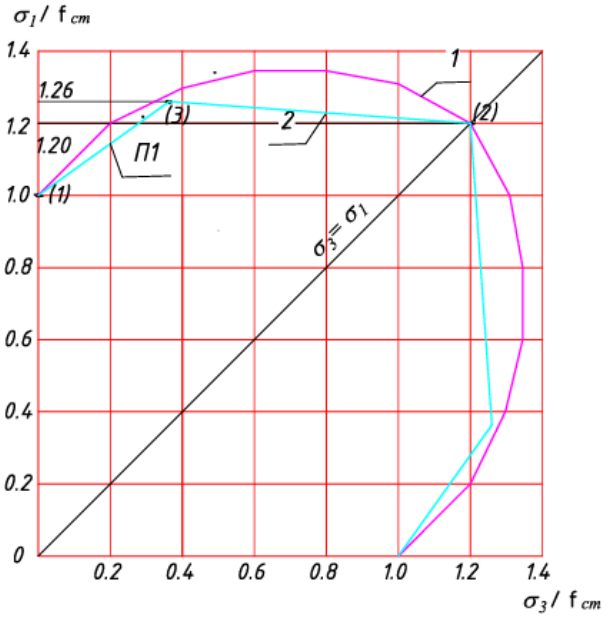
1) по данным, представленным в [21];
2) по результатам моделирования

Рисунок 7 – Изменение прочности бетона при двухосном сжатии в зависимости от соотношения главных напряжений для бетона f_{cm} = 31,0 МПа



1) по данным, представленным в Руководстве НИИЖБа;
2) по результатам моделирования

Рисунок 8 – Изменение прочности бетона при двухосном сжатии в зависимости от соотношения главных напряжений для бетона f_{cm} = 30,3 МПа



1) по данным, представленным в Руководстве НИИЖБа;
2) по результатам моделирования

Рисунок 9 – Изменение прочности бетона при двухосном сжатии в зависимости от соотношения главных напряжений для бетона f_{cm} = 48,4 МПа

Большой объем исследований прочности бетона представлен в Руководстве НИИЖБа. Там же даны рекомендации по методике проведения испытаний бетона в сложных напряженных состояниях, форме образцов и испытательному оборудованию, что должно было упростить анализ экспериментальных данных, получаемых другими исследователями при использовании указанной методики.

Моделирование выполнялось для бетонов нормального веса со средней прочностью бетонных кубов $f_{cm,\,cube}$ = 36,7 МПа и $f_{cm,\,cube}$ = 58,7 МПа (Руководство НИИЖБа).

Для моделирования принято:

– при средней прочности кубов $f_{cm,\,cube}$ = 36,7 Мпа; f_{cm} = 30,3 МПа; значение нижнего параметрического уровня: R_T^0 = 0,368 f_{cm}; $D = (f_{cm} - R_T^0)/2$ = 9,58 МПа;

– при средней прочности кубов $f_{cm,\,cube}$ = 58,7 Мпа; f_{cm} = 48,4 МПа; значение нижнего параметрического уровня: R_T^0 = 0,44 f_{cm}; $D = (f_{cm} - R_T^0)/2$ = 13,56 МПа.

Результаты представлены на рисунках 8 и 9.

Анализ результатов моделирования совместно с данными других авторов, позволяет сделать следующие ***выводы***.

1. Представленная модель может быть использована для прогнозирования прочности бетона нормального веса в условиях двухосного сжатия. Положительные результаты получены также при использовании модели для двухосного растяжения и сжатия с растяжением [18, 19, 20].

2. Бетоны, с высокой прочностью при осевом сжатии (бетоны высокого класса по прочности) имеют меньший рост прочности в условиях двухосного сжатия, что совпадает с имеющимися экспериментальными данными.

3. Прочность при двухосном сжатии, как показывают результаты моделирования, определяется изменчивостью «прочности узлов» и направлением «разрушения». Но если при моделировании вариация «прочности узлов» составляет 5,0–7,0 %, то, учитывая неоднородность структуры, для экспериментальных образцов – 10,0 % и более. В этом случае будут наблюдаться значительные колебания прочности при двухосном сжатии, что существенно отразится на форме графиков, полученных по результатам экспериментов (см. рисунки 5, 6, 8, 9).

4. Результаты моделирования показывают, что при двухосном сжатии происходит устойчивый рост прочности бетонов нормального веса ($f_{cm2} > f_{cm}$), связанный с изменением характера разрушения. «Ориентация» разрушения строго в определенном направлении, «задействует» большее число элементов структуры, отвечающих

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-103-108

за прочностные показатели, что подтверждается и классической теорией протекания. Отсутствие увеличения прочности, например при $\sigma_1 = \sigma_2$, в условиях двухосного сжатия, приведенное в [2, 10], может быть связано с условиями проведения испытаний и формой образца. В этих исследованиях образцы имели форму пластин: 10 × 10 × 2 и 10 × 10 × 5 см – по [17]; 40 × 40 × 9,5 см – по [2].

5. На результаты моделирования не влияют технологические и иные сторонние факторы, что происходит при проведении экспериментов.

6. Имея значения прочности бетона f_{cm} и нижней параметрической точки R_T^0 непосредственно из эксперимента, можно смоделировать поведение данного бетона в условиях двухосного сжатия, сжатия с растяжением и двухосного растяжения.

Список цитированных источников

1. Берг, О. Я. Высокопрочный бетон / О. Я. Берг, Е. Н. Щербаков, Г. Н. Писанко. – М. : Стройиздат, 1971. – 196 с.
2. Берг, О. Я. О прочности бетона при двухосном сжатии / О. Я. Берг, Н. В. Смирнов // Бетон и железобетон. – 1965. – № 11. – С. 37–39.
3. Берг, О. Я. Физические основы прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М. : Госстройиздат, 1952. – 96 с.
4. Бобров, В. В. Методы оценки влияния различных факторов на процесс микроразрушений бетона под нагрузкой: автореф. дис… канд. техн. наук: 05.23.01 / Бобров Владимир Викторович; Моск. гос. строит. (МГСУ). – М., 2015. – 26 с.
5. Гасратова, Н. А. Решение некоторых классических пространственных задач теории упругости в напряжениях / Н. А. Гасратова // Молодой ученый. – 2014. – № 3 (62). – С. 1–6.
6. Гвоздев, А. А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия / А. А. Гвоздев. – М. : Стройиздат, 1949. – 280 с.
7. Гениев, Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г. А. Гениев, В. Н. Киссюк, Г. А. Тюпин. – М. : Стройиздат, 1974. – 316 с.
8. Зайцев, Ю. В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения / Ю. В. Зайцев. – М. : Стройиздат, 1982. – 196 с.
9. Карпенко, Н. И. К определению прочности бетона при трехосном сжатии / Н. И. Карпенко, С. Н. Карпенко // Жилищное строительство. – 2013. – № 7. – С. 27–28.
10. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М. : Стройиздат, 1996. – 413 с.
11. Современные критерии прочности для бетонов при объемных напряженных состояниях / В. И. Корсун, С. Н. Карпенко, С. Ю. Макаренко, А. В. Недорезов // Строительство и реконструкция. – 2021. – № 5 (97). – С. 16–30.
12. Кудзис, А. П. О погрешностях двухосных испытаний бетона / А. П. Кудзис, А.-И. И. Ноткус // Бетон и железобетон. – 1978. – № 6. – С. 32–34.
13. Лехницкий, С. Г. Теория упругости анизотропного тела / С. Г. Лехтицкий. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1977. – 415 с.
14. Маклакова, С. Н. Исследование прочности бетона при двухосном сжатии / С. Н. Маклакова, М. А. Галкина, В. Н. Бровкин // Вестник ТвГТУ. Строительство. Электротехника и химические технологии. – 2022. – № 1 (13). – С. 23–28.
15. Истомин, А. Д. Зависимость границ микротрещинообразования бетона от его прочности и вида напряженного состояния / А. Д. Истомин, Н. А. Беликов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 2. – С. 159–162.
16. Тарасевич, Ю. Ю. Перколяция: Теория, приложения, алгоритмы / Ю. Ю. Тарасевич. – М. : Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.
17. Теличко, В. Г. Исследование прочности при двухосном сжатии бетона класса В25 / В. Г. Теличко, Л. А. Зиборов // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2009. – № 1–2. – С. 89–94.
18. Цветков, С. В. Прочность тяжелого бетона при двухосном растяжении / С. В. Цветков, С. С. Цветков // Вестник гражданских инженеров. – 2023. – № 6 (101). – С. 43–49.
19. Цветков, С. В. Прогнозирование прочности тяжелого бетона в условиях двухосного сжатия с растяжением по результатам моделирования / С. В. Цветков // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 5 (88). – С. 57–62.
20. Цветков, С. В. К вопросу прочности тяжелых бетонов в условиях сжатия-растяжения / С. В. Цветков, С. С. Цветков // Вестник гражданских инженеров. – 2025. – № 3 (110). – С. 51–58.
21. Kupfer, H. B. Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses / H. B. Kupfer, K. H. Gerstle // Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE. – 1973. – Vol. 99, No. EM 4. – S. 852–866.

References

1. Berg, O. YA. Vysokoprochnyj beton / O. YA. Berg, E. N. SHCHerbakov, G. N. Pisanko. – M. : Strojizdat, 1971. – 196 s.
2. Berg, O. YA. O prochnosti betona pri dvuhosnom szhatii / O. YA. Berg, N. V. Smirnov // Beton i zhelezobeton. – 1965. – № 11. – S. 37–39.
3. Berg, O. YA. Fizicheskie osnovy prochnosti betona i zhelezobetona / O. YA. Berg. – M. : Gosstrojizdat, 1952. – 96 s.
4. Bobrov, V. V. Metody ocenki vliyaniya razlichnyh faktorov na process mikrorazrushenij betona pod nagruzkoj: avtoref. dis… kand. tekhn. nauk: 05.23.01 / Bobrov Vladimir Viktorovich; Mosk. gos. stroit. (MGSU). – M., 2015. – 26 s.
5. Gasratova, N. A. Reshenie nekotoryh klassicheskih prostranstvennyh zadach teorii uprugosti v napryazheniyah / N. A. Gasratova // Molodoj uchenyj. – 2014. – № 3 (62). – S. 1–6.
6. Gvozdev, A. A. Raschet nesushchej sposobnosti konstrukcij po metodu predel'nogo ravnovesiya / A. A. Gvozdev. – M. : Strojizdat, 1949. – 280 s.
7. Geniev, G. A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona / G. A. Geniev, V. N. Kissyuk, G. A. Tyupin. – M. : Strojizdat, 1974. – 316 s.
8. Zajcev, YU. V. Modelirovanie deformacij i prochnosti betona metodami mekhaniki razrusheniya / YU. V. Zajcev. – M. : Strojizdat, 1982. – 196 s.
9. Karpenko, N. I. K opredeleniyu prochnosti betona pri trekhosnom szhatii / N. I. Karpenko, S. N. Karpenko // ZHilishchnoe stroitel'stvo. – 2013. – № 7. – S. 27–28.
10. Karpenko, N. I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona / N. I. Karpenko. – M. : Strojizdat, 1996. – 413 s.
11. Sovremennye kriterii prochnosti dlya betonov pri ob"emnyh napryazhennyh sostoyaniyah / V. I. Korsun, S. N. Karpenko, S. YU. Makarenko, A. V. Nedorezov // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2021. – № 5 (97). – S. 16–30.
12. Kudzis, A. P. O pogreshnostyah dvuhosnyh ispytanij betona / A. P. Kudzis, A.-I. I. Notkus // Beton i zhelezobeton. – 1978. – № 6. – S. 32–34.
13. Lekhnickij, S. G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela / S. G. Lekhtickij. – M. : Nauka, Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoj literatury, 1977. – 415 s.
14. Maklakova, S. N. Issledovanie prochnosti betona pri dvuhosnom szhatii / S. N. Maklakova, M. A. Galkina, V. N. Brovkin // Vestnik TvGTU. Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii. – 2022. – № 1 (13). – S. 23–28.
15. Istomin, A. D. Zavisimost' granic mikrotreshchinoobrazovaniya betona ot ego prochnosti i vida napryazhennogo sostoyaniya / A. D. Istomin, N. A. Belikov // Vestnik MGSU. – 2011. – № 2. – S. 159–162.
16. Tarasevich, YU. YU. Perkolyaciya: Teoriya, prilozheniya, algoritmy / YU. YU. Tarasevich. – M. : Editorial URSS, 2002. – 112 s.
17. Telichko, V. G. Issledovanie prochnosti pri dvuhosnom szhatii betona klassa V25 / V. G. Telichko, L. A. Ziborov // Izv. TulGU. Tekhnicheskie nauki. – 2009. – № 1–2. – S. 89–94.
18. Cvetkov, S. V. Prochnost' tyazhelogo betona pri dvuhosnom rastyazhenii / S. V. Cvetkov, S. S. Cvetkov // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2023. – № 6 (101). – S. 43–49.
19. Cvetkov, S. V. Prognozirovanie prochnosti tyazhelogo betona v usloviyah dvuhosnogo szhatiya s rastyazheniem po rezul'tatam modelirovaniya / S. V. Cvetkov // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2021. – № 5 (88). – S. 57–62.
20. Cvetkov, S. V. K voprosu prochnosti tyazhelyh betonov v usloviyah szhatiya-rastyazheniya / S. V. Cvetkov, S. S. Cvetkov // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2025. – № 3 (110). – S. 51–58.
21. Kupfer, H. B. Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses / H. B. Kupfer, K. H. Gerstle // Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE. – 1973. – Vol. 99, No. EM 4. – S. 852–866.

Материал поступил 21.08.2025, одобрен 11.11.2025, принят к публикации 17.11.2025

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-103-108

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 537.533; 621.384

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИСТОЧНИКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

Д. А. Антонович[1], М. А. Сковородко[2], Д. В. Шидловская[3]

[1] К. т. н., доцент, ведущий научный сотрудник отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: d.antonovich@phti.by

[2] Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры физики, УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: volal26@ya.ru

[3] Преподаватель кафедры прикладного и системного программирования, УО «Витебский государственный университет имени П. М. Машерова», Витебск, Беларусь, e-mail: dianabirukovaseal@gmail.com

Реферат

В представленной статье проводится анализ основных соотношений, определяющих базовые процессы, сопровождающие генерацию пучков заряженных частиц (электронов и ионов) в источниках с плазменным эмиттером. Рассматриваются три основных этапа функционирования источника: генерация плазмы, экстракция частиц и транспортировка пучка.

Для ионных пучков детально разбирается уравнение ионизации, связывающее скорость генерации ионов с коэффициентом ионизации, зависящим от температуры электронов, и коэффициентом потерь, определяемым диффузией и экстракцией. Показана связь между балансом ионов в плазме и током пучка через скорость Бома. Описан процесс формирования плазменной границы, её характеристик и ограничение тока извлечения законом Чайлда – Ленгмюра для ионов.

При рассмотрении электронных пучков особое внимание уделено области извлечения, где ключевую роль играет уравнение Пуассона для учета пространственного заряда, уравнение Лоренца или Власова для описания движения частиц и закон Чайлда – Ленгмюра в случае электронов. Указаны отличия в постановке задачи по сравнению с ионными пучками.

Делается вывод, что корректная модель требует совместного решения уравнений всех трёх этапов, что позволяет оптимизировать конструкцию источника, рассчитать параметры плазмы под заданный ток и предсказать итоговые характеристики пучка. Представленный подход послужил основой для создания программных инструментов визуализации и анализа, что повышает практическую применимость результатов для расчёта и проектирования плазменных источников заряженных частиц. Приведённые в статье математические модели пригодны для расчёта концентрации ионов, вольт-амперных характеристик и угла расходимости пучка.

Ключевые слова: плазменный источник, пучок заряженных частиц, ионный пучок, электронный пучок, генерация плазмы, экстракция частиц, уравнение ионизации, закон Чайлда – Ленгмюра, уравнение Пуассона, пространственный заряд.

BASIC PROVISIONS OF THE PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL OF A CHARGED PARTICLE SOURCE WITH A PLASMA EMITTER

D. A. Antonovich, M. A. Skovorodko, D. V. Shidlovskaya

Abstract

This article analyzes the fundamental relationships that govern the fundamental processes accompanying the generation of charged particle beams (electrons and ions) in plasma emitter sources. Three main stages of source operation are considered: plasma generation, particle extraction, and beam transport.

For ion beams, the ionization equation is analyzed in detail. It relates the ion generation rate to the ionization coefficient, which depends on the electron temperature, and the loss coefficient, which is determined by diffusion and extraction. The relationship between the ion balance in the plasma and the beam current is demonstrated through the Bohm velocity. The formation of the plasma boundary, its characteristics, and the limitation of the extraction current by the Child – Langmuir law for ions are described.

When examining electron beams, special attention is paid to the extraction region, where the key role is played by Poisson's equation for accounting for space charge, the Lorentz or Vlasov equation for describing particle motion, and the Child – Langmuir law for electrons. Differences in the problem formulation compared to ion beams are highlighted.

It is concluded that a correct model requires a combined solution of the equations for all three stages, which allows for the optimization of the source design, the calculation of plasma parameters for a given current, and the prediction of the final beam characteristics. The presented approach served as the basis for the development of software tools for visualization and analysis, increasing the practical applicability of the results for the calculation and design of plasma sources of charged particles. The mathematical models presented in the article are suitable for calculating ion concentration, current-voltage characteristics, and beam divergence angle.

Keywords: plasma source, charged-particle beam, ion beam, electron beam, plasma generation, particle extraction, ionization equation, Child – Langmuir law, Poisson equation, space charge.

Введение

Современные технологические установки, использующие пучки заряженных частиц, требуют глубокого понимания и точного управления процессами их генерации и формирования. Плазменные источники, основанные на эмиссии частиц из плазменного эмиттера, являются одним из ключевых элементов таких систем. Их работа базируется на последовательном протекании трех фундаментальных стадий: генерации плазмы в разрядной камере, извлечения ионов или электронов и последующей транспортировки сформированного пучка. Каждая из этих стадий описывается комплексом взаимосвязанных физических процессов, для анализа и количественного прогнозирования которых необходимы адекватные математические модели.

Целью данного обзора является систематизация основных положений физико-математических моделей, применяемых для описания плазменных источников ионных и электронных пучков. Особое внимание уделяется ключевым уравнениям, характеризующим каждый этап, – от ионизации нейтрального газа и баланса частиц

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-109-114

в плазме до формирования плазменной границы, преодоления ограничений пространственного заряда и фокусировки пучка. Рассмотрение общих принципов и специфических особенностей моделей для ионов и электронов позволяет выявить как универсальные закономерности, так и принципиальные различия в подходах к их описанию, что является основой для оптимизации параметров источников и прогнозирования их рабочих характеристик.

Ниже представлены уравнения, описывающих каждый из этапов процесса получения пучков заряженных частиц (электронов и ионов), – генерацию плазмы, извлечение заряженных частиц из объема сформированной плазмы, формирование и транспортировку пучка частиц.

Физико-математическая модель получения ионных пучков.

Генерация плазмы в источниках с плазменным эмиттером описывается такими уравнениями, как уравнение ионизации и уравнение баланса частиц.

Общий вид уравнения ионизации, объединяющего баланс между генерацией плазмы и потерей ионов из единицы объема за единицу времени [1]:

$$\frac{dn_i}{dt} = n_e n_n K_{iz} - n_i K_{loss}, \quad (1)$$

где правая часть уравнения состоит из выражения $n_e n_n K_{iz}$, отвечающего за генерацию ионов за счет электронного удара, а $n_i K_{loss}$ – за потерю ионов на стенках и в объеме (n_e – концентрация электронов, n_n – концентрация нейтральных атомов, n_i – концентрация ионов, K_{iz} – коэффициент ионизации, K_{loss} – коэффициент потерь).

При стационарном режиме, когда ($\frac{dn_i}{dt} = 0$) генерация и потери ионов компенсируют друг друга $n_e n_n K_{iz} = n_i K_{loss}$.

Связь коэффициента ионизации K_{iz} и энергии электронов, зависящей от температуры электронов, описывается уравнением (1):

$$K_{iz} = \int_0^\infty \sigma_{iz} \cdot \vartheta_e \cdot f(\vartheta_e) d\vartheta_e, \quad (2)$$

где σ_{iz} – сечение ионизации для электрона со скоростью ϑ_e, $f(\vartheta_e)$ – функция распределения Максвелла – Больцмана.

Прямая зависимость K_{iz} от температуры выражается формулой

$$K_{iz} = A \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{kT_e}\right). \quad (3)$$

где A – коэффициент, зависящий от концентрации частиц, сечения ионизации; E_i – энергия ионизации; T_e – температура электронов; k – постоянная Больцмана [1]:

Коэффициент ионизации растет при увеличении температуры электронов, что повышает плотность ионов в плазме. Для эффективной ионизации температура электронов должна обеспечивать такую энергию электронов, которая превышала бы энергию ионизации нейтральных частиц (от несколько эВ до десятков эВ).

Коэффициент потерь K_{loss} является обратной величиной времени жизни ионов τ_i. Определяется как совокупность потерь при диффузии и объемной рекомбинации. Время жизни ионов τ_i находится через амбиполярный коэффициент диффузии D_a [2]:

$$\tau_i \approx \frac{L^2}{D_a}, \quad (4)$$

где L – характерный размер системы, $D_a \approx \frac{D_e\mu_i + D_i\mu_e}{\mu_i + \mu_e}$ (D_i – коэффициент диффузии ионов, D_e – коэффициент диффузии электронов, μ_i – подвижность ионов, μ_e – подвижность электронов).

При описании генерации плазмы в ионных источниках с плазменным эмиттером в уравнении ионизации добавляется дополнительный член потерь на экстракцию $\frac{n_i \vartheta_B}{S}$ (S – эффективная площадь экстракционного отверстия), зависящий от скорости Бома $\vartheta_B = \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}}$ (M_i – масса ионов) [3],

$$n_e n_n K_{iz} = \frac{n_i}{\tau_i} + \frac{n_i \vartheta_B}{S}. \quad (5)$$

Добавленный член потерь на экстракцию позволяет связать поток ионов через экстрактор с практическим параметром – током пучка I, являющимся важной характеристикой, необходимой для составления корректной математической модели [4],

$$I = q n_i \vartheta_B S, \quad (6)$$

где q – заряд иона.

Таким образом, в плазменных источниках получения ионных пучков учитываются потери ионов, происходящие как в объеме плазмы (но без учета рекомбинации), так и через экстракционное отверстие.

Проанализируем систему, состоящую из уравнения тока пучка (6) и уравнения баланса ионов,

$$n_i = \frac{n_e n_n K_{iz}}{\frac{1}{\tau_i} + \frac{\vartheta_B}{S}}. \quad (7)$$

При увеличении параметра S (площади экстракционного отверстия), ток пучка прямо пропорционально возрастает, и это вызывает:

– снижение давления плазмы из-за большого количества потери ионов;

– изменение значений потенциала в приэлектродной области;

– увеличение неравномерности распределения тока по сечению пучка;

– увеличение угла расходимости пучка (математически зависимость выражается как [2]

$$\theta \approx \frac{r_0}{l} + \frac{\varepsilon_n}{r_0}, \quad (8)$$

где r_0 – радиус отверстия, l – длина ускоряющего промежутка, ε_n – нормированный эмиттанс).

При возрастании температуры числитель в уравнении баланса (7) возрастает экспоненциально, а знаменатель, содержащий скорость Бома, увеличивается по квадратному корню, что способствует росту концентрации ионов. При подборе оптимальных значений температуры создается наилучшее соотношение между скоростью генерации ионов и их экстракции. Подтверждается данное условие максимальным значением выходного тока при сохранении энергетических характеристик пучка.

Максимальной эффективности ионного источника при заданных параметрах тока пучка I можно добиться при выполнении следующего алгоритма действий:

– зафиксировать требуемое значение тока I;

– из уравнения тока (6) подобрать значение площади экстракционного отверстия S (при этом учитывая, что концентрация ионов и скорость Бома являются функциями температуры ионов);

– найти оптимальное значение температуры электронов, при которой концентрация ионов останется максимальной;

– проверить подходит ли выбранный параметр S для полученной температуры.

Изложенный алгоритм действий представляет собой итерационный процесс, целью которого является получение необходимого значения тока и сохранение параметров пучка при минимальных затратах энергии.

Следующим шагом получения математической модели является описание этапа извлечения ионов, в котором ключевую роль играет пограничный плазменный слой, в области которого формируется электрическое поле, необходимое для эффективной экстракции ионов.

В этапе извлечения ионов рассматриваются процессы формирования плазменной границы, разделение зарядов в приграничной области и преодоление пространственного заряда.

Из-за нарушения квазинейтральности плазмы у поверхности скапливается избыточный положительный заряд, создающий скачок потенциала. Распределение потенциала связано с пространственным распределением заряда уравнением Пуассона, которое для плазменной границы принимает вид [5]

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{e(n_i - n_e)}{\varepsilon_0}, \quad (9)$$

где e – элементарный заряд, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, x – глубина плазменного столба.

Устойчивость плазменного слоя обеспечивается условием

$$\vartheta_i \geq \vartheta_B = \sqrt{kT_e/M_i}\,. \quad (10)$$

Приграничная область для всех плазменных явлений оценивается дебаевской длиной экранирования [5]

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 kT_e}{n_e e^2}}\,, \quad (11)$$

где λ_D – дебаевская длина, T_e – температура электронов.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-109-114

Толщина слоя, полученная путем интегрирования уравнения Пуассона с учетом граничных условий, выражается через дебаевскую длину следующим образом [5]:

$$d \sim \lambda_D \left(\frac{2e\varphi_p}{kT_e}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

где φ_p – потенциал плазмы относительно стенки.

Таким образом, формирование плазменной границы основано на таких ключевых моментах, как нарушение квазинейтральности, поддержание минимальной скорости для условия стационарности и задание характерного масштаба через дебаевскую длину экранирования.

После формирования плазменной границы ограничения ионного тока, связанные с пространственным зарядом, описываются уравнением Чайлда-Ленгмюра [1]

$$j = \frac{4\varepsilon_0}{9}\sqrt{\frac{2q}{M_i}}\frac{\varphi^{\frac{3}{2}}}{(d \pm \Delta)^2}, \quad (13)$$

где j – плотность тока, d – расстояние между электродами, Δ – поправка на толщину плазменного столба, φ – приложенное напряжение.

Данное уравнение объединяет параметры плазмы из первого этапа генерации и характеристики получаемого пучка из этапа извлечения. Определяет максимальное значение тока, которое можно пропустить без эффекта «запирания» пространственного заряда полем.

Еще одним значимым уравнением, которым можно дополнить и уточнить математическую модель, являться уравнение, учитывающее вторичную электронную эмиссию, влияющую на стабильность разряда, энергетические потери и долговечность электродов [6]:

$$j_{\text{вэ}} = \gamma \cdot j_i, \quad (14)$$

где $j_{\text{вэ}}$ – плотность тока вторичных электронов, j_i – плотность тока бомбардирующих ионов, γ – коэффициент вторичной эмиссии, показывающий сколько вторичных электронов испускается на один пришедший ион.

После попадания ионов в область дополнительного ускорения, необходимо следить за интенсивностью пучка и его расходимостью. При изучении области транспортировки используются как уравнение распределения электрического поля, так и уравнение, описывающие движение ионов [7],

$$m_i \frac{d\vec{v}}{dt} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right), \quad (15)$$

где m_i – масса иона, v – скорость электрона, $\vec{E}$ – вектор электрического поля, $\vec{B}$ – вектор магнитного поля.

Дальнейшая фокусировка пучка осуществляется с помощью регулирования комбинации электрических и магнитных линз.

Для получения корректной физико-математической модели ионных пучков необходимо совместное решение уравнений, используемых для описания генерации частиц (уравнение ионизации), извлечения ионов и формирования плазменной границы (уравнение Пуассона), транспортировки ионов на этапе фокусировки (уравнение движения частиц).

Совместное решение основных уравнений, описывающих процесс получения ионных пучков в установках с плазменным эмиттером, позволяет рассчитать параметры плазмы для заданного тока, оптимизировать геометрию конструкции, прогнозировать реальные характеристики ионных пучков, повысить эффективность ионного источника.

Физико-математическая модель получения электронных пучков

Различия между плазменными источниками получения ионных и электронных пучков связаны с типом извлекаемых частиц, особенностями процессов ионизации, эмиссии и ускорения [8].

Математическая модель получения электронных пучков состоит из уравнений, описывающих каждый из этапов процесса (генерацию плазмы, извлечение электронов, формирование пучка).

Генерация плазмы основывается на одинаковом с ионными пучками механизме – создании устойчивого хорошо ионизированного плазменного объема. Основными уравнениями, описывающими процессы генерации плазмы, для электронных пучков являются те же уравнения ионизации, баланса частиц и кинематическое уравнение Больцмана, что и при описании ионных пучков.

Область извлечения электронов характеризуется сложным процессом баланса между плотностью плазмы, пространственным зарядом и внешним электрическим полем. Эмиссия электронов происходит с поверхности плазменного слоя, форма и положение которого не имеют фиксированного размера и параметров.

В области извлечения электронов формируется пространство, где возникает электрический потенциал, препятствующий свободному перемещению электронов. Накопленные электроны создают пространственный заряд, влияющий на электрическое поле. Для того, чтобы попасть в область извлечения, электроны должны преодолеть сформировавшийся потенциальный барьер. Процесс преодоления зависит от приложенного электрического поля, регулируемого внешним напряжением и потенциалом эмиттера. Основной закон Чайлда – Ленгмюра отражает ограничение тока из-за пространственного заряда (m_e – масса электрона, e – заряд электрона) [9]:

$$j = \frac{4\varepsilon_0}{9}\sqrt{\frac{2e}{m_e}}\frac{\varphi^{\frac{3}{2}}}{(d \pm \Delta)^2}. \quad (16)$$

Таким образом, математическая модель области извлечения электронов строится на основе:

– уравнения Пуассона для потенциала (помогает моделировать влияние пространственного заряда на потенциал и движение частиц; потенциал определяет электрическое поле, которое, ускоряя электроны, позволяет преодолевать потенциальный барьер) [10, 11]:

$$\nabla^2\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} = \frac{en_e}{\varepsilon_0}, \quad (17)$$

где φ – электрический потенциал, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ρ – плотность электрического заряда, ∇^2 – оператор Лапласа, суммирующий вторые производные потенциала по пространственным координатам;

– уравнения Лоренца (описывает движение электронов, когда речь идет об отдельной частице без учета коллективных столкновений в разреженной плазме) [12]:

$$m_e \frac{d\vec{v}}{dt} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right), \quad (18)$$

где m_e – масса электрона; или уравнения Власова (описывает коллективное поведение плазмы, распределение частиц представлено через самообразованные электромагнитные поля) [13–15]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{\vartheta} \cdot \nabla_r f + \frac{e}{m}\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right) \cdot \nabla_\vartheta f = 0, \quad (19)$$

где $\frac{\partial f}{\partial t}$ – частная производная функции распределения по времени, $f\left(\vec{r}, \vec{\vartheta}, t\right)$ – функция распределения частиц, $\nabla_\vartheta f$ – вектор, показывающий направление и скорость наибольшего изменения функции распределения в пространстве скоростей, $\vec{\vartheta} \cdot \nabla_r f$ – слагаемое, описывающее, как функция распределения переносится в пространстве вместе с частицами;

– уравнения Чайлда – Ленгмюра (связывает значения плотности тока с геометрическими параметрами области извлечения).

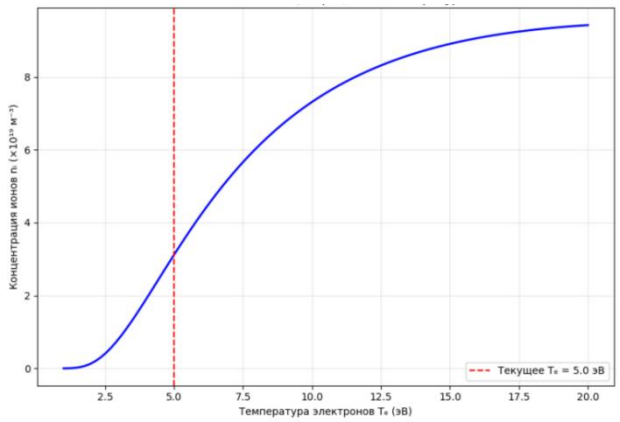
После области извлечения электроны попадают в область фокусировки пучка, где движение электронов формируется с помощью использования электростатических и магнитных линз. Модель фокусировки описывается решением уравнения для радиального движения электронов с учетом действующих сил [16, 17]:

$$m_e \frac{d^2r}{dt^2} = -eE_r + e\vartheta_z B_\theta, \quad (20)$$

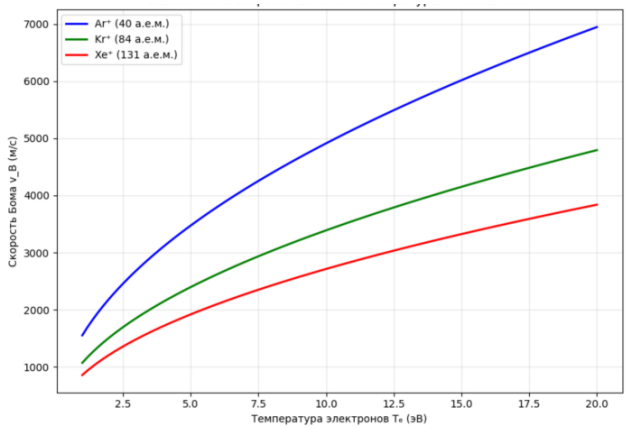
где r – радиальное расстояние электрона от оси пучка, E_r – радиальная компонента электрического поля (радиальное поле создается электростатической линзой; отвечает за фокусировку и расфокусировку пучка), ϑ_z – продольная скорость электрона (движение в цилиндрической системе координат, ось z – направление основного движения пучка), B_θ – азимутальная компонента магнитного поля (магнитное поле создается осесимметричной магнитной линзой).

На основе приведенного математического описания модели формирования ускоренных пучков заряженных частиц разработан и создан программный инструмент, позволяющий визуализировать теоретические зависимости ионно-плазменного процесса.

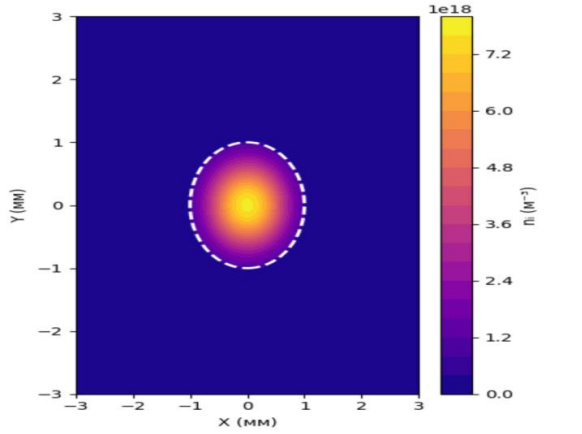
На рисунке 1 (а) представлена расчётная зависимость влияния температуры электронов на концентрацию частиц.



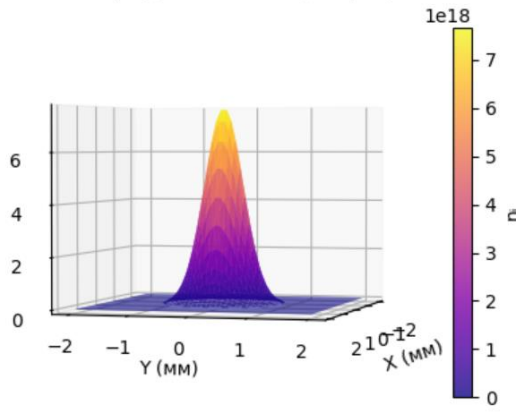
(а) Зависимость концентрации ионов от электронной температуры



(б) Зависимость скорости Бома от электронной температуры



(в) 2D картина



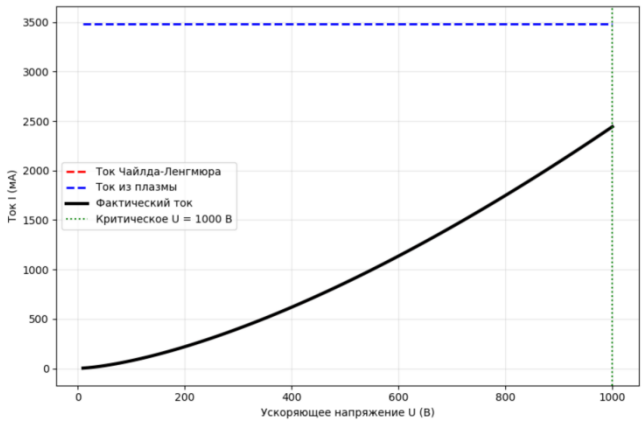
(г) 3D картина

Рисунок 1 – Распределение концентрации ионов

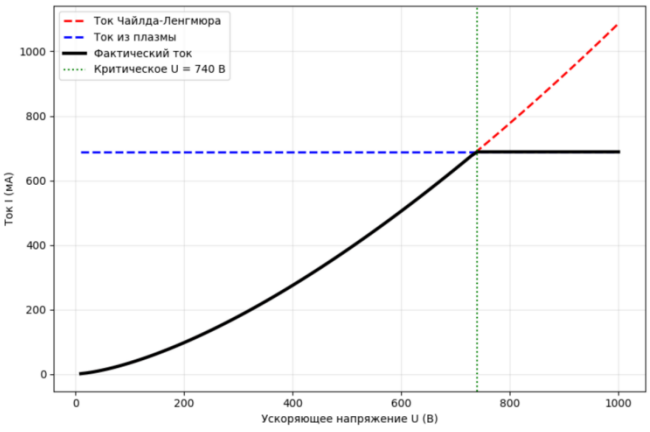
Кривая на рисунке 1 (а) позволяет определить требуемую электронную температуру для максимальной концентрации ионов. Поскольку от температуры так же зависит и скорость (рисунок 1 (б)), с которой ионы пересекают плазменную границу, то для определения полной картины влияния температуры на количество ионов и их скорость извлечения, необходимо совместное решение более сложной оптимизированной задачи, где температура для тока может отличаться от температуры для концентрации.

Визуализация распределения концентрации ионов в эмиссионном зазоре представлена на рисунке 1 (в) в виде двумерной карты, на рисунке 1 (г) – в виде трехмерного графика. Данный вид графиков позволяет упростить представление сложных физических процессов.

Представленные зависимости ионного тока от ускоряющего напряжения (рисунок 2) позволяют осуществить анализ рабочих параметров источника заряженных частиц. Так, например, на графике рисунка 2 (б) определено критическое значение напряжения, ниже которого система будет работать в режиме «запирания» пространственным зарядом [18], а выше – в режиме ограничения плазменной эмиссией.



(а) Радиус эмиссионного отверстия 3 мм

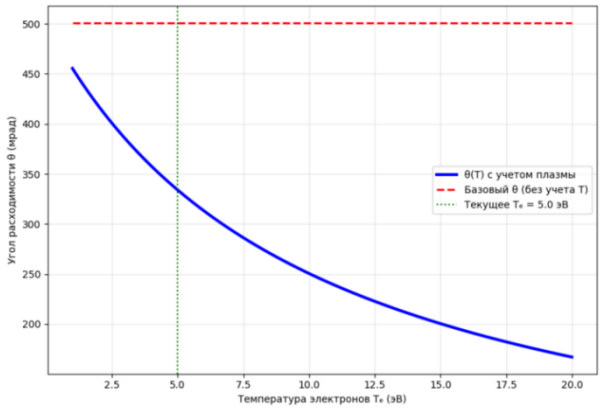


(б) Радиус эмиссионного отверстия 2 мм

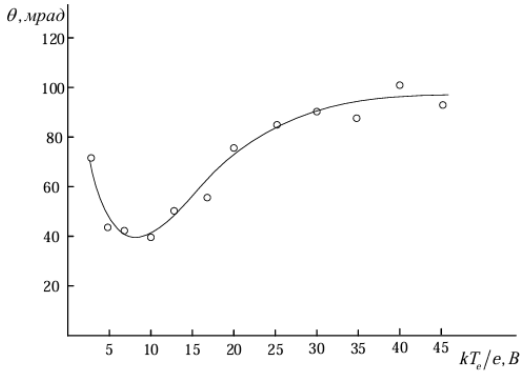
Рисунок 2 – Зависимость ионного тока от напряжения. Температура электронов – 5эВ, концентрация частиц – $100 \cdot 10^{19}$м$^{-3}$, $U_{\text{р}} = 200$ В.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-109-114

Анализ теоретической и экспериментальной зависимостей угла расходимости от температуры плазмы (рисунок 3), показал удовлетворительную корреляцию предложенной модели с практическими значениями (данные экспериментальной зависимости: концентрация и потенциал плазмы на входе в канал 10^{18}м$^{-3}$, $U_{\text{р}} = 200$В; радиус и длина канала – 1 и 2 мм, соответственно; радиус и длина канала в ускоряющем электроде – 2 и 2 мм, соответственно; приведенная напряженность поля ускоряющего электрода – 4 кВ/мм [19]).



(а) теоретическая зависимость (по упрощенной физико-математической модели)



(б) экспериментальная зависимость

Рисунок 3 – Зависимость угла расходимости пучка от температуры электронов плазмы

Сравнительный анализ математической модели получения ионных и электронных пучков:

1) на этапе генерации главной задачей является создание плазмы с требуемой концентрацией, температурой электронов, ионным составом. Математическая модель описывает баланс частиц и энергию в газовом разряде. При получении электронных пучков важны высокая концентрация и температура электронов для достижения требуемого значения плотности эмиссионного тока. У ионных пучков главной задачей является получение максимальной степени ионизации и стабильной плазменной границы;

2) на этапе извлечения доминирующими становятся законы электростатики и динамики частиц. Закон Чайлда – Ленгмюра применим в обоих вариантах пучков (с соответствующими массами частиц). Уравнение Пуассона для электронных пучков учитывает только концентрацию электронов, что делает его решение математически более простым. В ионных пучках решение уравнения Пуассона усложняется из-за учета обоих сортов частиц, так же усложняется определение формы эмитирующей поверхности;

3) на этапе фокусировки учитываются как внешние фокусирующие силы, так и силы собственного пространственного заряда пучка. Исходя из того, что ионные пучки по сравнению с электронными имеют большую плотность и меньшую скорость, это вызывает расходимость пучка. В электронных пучках происходит релятивистская компенсация пространственного заряда. Движущиеся электроны создают собственное магнитное поле, вызывающее возникновение силы Лоренца, сжимающей пучок.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что создание эффективных источников заряженных частиц с плазменным эмиттером неразрывно связано с разработкой комплексных физико-математических моделей. Эти модели объединяют описание разнородных процессов (кинетику ионизации в объеме плазмы, электростатику приграничного слоя и динамику частиц в пучке) в единую самосогласованную задачу.

Совместное численное решение позволяет проводить виртуальную оптимизацию геометрии источника, подбирать режимы питания (напряжение, ток, давление) для достижения заданных параметров пучка (ток, энергия, расходимость) и прогнозировать его поведение в области транспортировки. Представленные в материале графические зависимости (влияние температуры на концентрацию ионов, вольт-амперные характеристики) наглядно демонстрируют возможности подобного моделирования для анализа и выявления оптимальных рабочих точек.

Дальнейшее развитие моделей связано с учетом дополнительных физических факторов, таких как вторичная электронная эмиссия, неоднородность плазмы, эффекты нагрева и взаимодействия пучка с остаточным газом, что позволит повысить точность прогнозов и расширить область применения данных источников в высокотехнологичных установках.

Список цитированных источников

1. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1992. – 536 с.
2. Браун, Я. Физика и технология источников ионов : коллективная монография / Я. Браун, Р. Келлер, А. Холмс [и др.] ; под ред. Я. Брауна ; пер. с англ. под ред. Е. С. Машковой. – М. : Мир, 1998. – 496 с.
3. Окс, Е. М. Основы физики низкотемпературной плазмы : методическое пособие / Е. М. Окс ; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – Томск : ТУСУР, 1997. – 87 с.
4. Окс, Е. М. Источники электронов с плазменным эмиттером : коллективная монография / Е. М. Окс, В. А. Груздев, Ю. Е. Крейндель [и др.] ; под ред. Ю. Е. Крейнделя. – Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1983. – 180 с.
5. Чен, Ф. Введение в физику плазмы / Ф. Чен ; пер. с англ. под ред. В. Д. Шафранова. – М. : Мир, 1987. – 400 с.
6. Bruining, H. Physics and Applications of Secondary Electron Emission / H. Bruining. – London : Pergamon Press ; New York : McGraw-Hill, 1954. – 178 p.
7. Lieberman, M. A. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing / M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg. – 2nd ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2005. – 757 p.
8. Достанко, А. П. Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые / А. П. Достанко, В. Г. Залесский, А. М. Русецкий [и др.] ; под ред. А. П. Достанко ; Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск : Бестпринт, 2009. – 199 с.
9. Удовиченко, С. Ю. Пучково-плазменные технологии для создания материалов и устройств микро- и наноэлектроники : учебное пособие / С. Ю. Удовиченко ; Тюменский государственный университет, Физико-технический институт. – Тюмень : ТюмГУ, 2016. – 228 с.
10. Источники электронов с плазменным эмиттером на основе отражательного разряда с полым катодом / В. Л. Галанский, В. А. Груздев, И. В. Осипов, Н. Г. Ремпе // Изв. вузов. Физика. – 1992. – Т. 35, № 5. – С. 5–23.

11. Лебедев, А. Н. Физика ускорителей заряженных частиц / А. Н. Лебедев, А. В. Шальнов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 528 с.
12. Ландау, Л. Д. Курс теоретической физики / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 8-е изд., испр. – М. : Физматлит, 2001. – Т. 2 : Теория поля. – 536 с.
13. Власов, А. А. О вибрационных свойствах электронного газа / А. А. Власов // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 93, № 11. – С. 444–470.
14. Власов, А. А. Статистические функции распределения / А. А. Власов. – М. : Наука, 1966. – 356 с.
15. Александров, А. Ф. Основы электродинамики плазмы / А. Ф. Александров, Л. С. Богданкевич, А. А. Рухадзе ; под ред. А. А. Рухадзе. – М. : Высшая школа, 1978. – 408 с.
16. Молоковский, С. И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С. И. Молоковский, А. Д. Сушков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
17. Арцимович, Л. А. Физика плазмы для физиков / Л. А. Арцимович, Р. З. Сагдеев. – М. : Атомиздат, 1979. – 320 с.
18. Алексеев, С. Н. Электровакуумные приборы : учебное пособие / С. Н. Алексеев.– Ульяновск : УлГТУ, 2003. – 158 с.
19. Humphries, S. Charged Particle Beams / S. Humphries. – New York : Wiley, 1990. – 856 p.

References

1. Rajzer, YU. P. Fizika gazovogo razryada / YU. P. Rajzer. – M. : Nauka, 1992. – 536 s.
2. Braun, YA. Fizika i tekhnologiya istochnikov ionov : kollektivnaya monografiya / YA. Braun, R. Keller, A. Holms [i dr.] ; pod red. YA. Brauna ; per. s angl. pod red. E. S. Mashkovoj. – M. : Mir, 1998. – 496 s.
3. Oks, E. M. Osnovy fiziki nizkotemperaturnoj plazmy : metodicheskoe posobie / E. M. Oks ; Tomskij gosudarstvennyj universitet sistem upravleniya i radioelektroniki. – Tomsk : TUSUR, 1997. – 87 s.
4. Oks, E. M. Istochniki elektronov s plazmennym emitterom : kollektivnaya monografiya / E. M. Oks, V. A. Gruzdev, YU. E. Krejndel' [i dr.] ; pod red. YU. E. Krejndelya. – Novosibirsk : Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1983. – 180 s.
5. CHen, F. Vvedenie v fiziku plazmy / F. CHen ; per. s angl. pod red. V. D. SHafranova. – M. : Mir, 1987. – 400 s.
6. Bruining, H. Physics and Applications of Secondary Electron Emission / H. Bruining. – London : Pergamon Press ; New York : McGraw-Hill, 1954. – 178 p.
7. Lieberman, M. A. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing / M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg. – 2nd ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2005. – 757 p.
8. Dostanko, A. P. Tekhnologicheskie processy i sistemy v mikroelektronike: plazmennye, elektronno-ionno-luchevye, ul'trazvukovye / A. P. Dostanko, V. G. Zalesskij, A. M. Ruseckij [i dr.] ; pod red. A. P. Dostanko ; Belorus. gos. un-t informatiki i radioelektroniki. – Minsk : Bestprint, 2009. – 199 s.
9. Udovichenko, S. YU. Puchkovo-plazmennye tekhnologii dlya sozdaniya materialov i ustrojstv mikro- i nanoelektroniki : uchebnoe posobie / S. YU. Udovichenko ; Tyumenskij gosudarstvennyj universitet, Fiziko-tekhnicheskij institut. – Tyumen' : TyumGU, 2016. – 228 s.
10. Istochniki elektronov s plazmennym emitterom na osnove otrazhatel'nogo razryada s polym katodom / V. L. Galanskij, V. A. Gruzdev, I. V. Osipov, N. G. Rempe // Izv. vuzov. Fizika. – 1992. – T. 35, № 5. – S. 5–23.
11. Lebedev, A. N. Fizika uskoritelej zaryazhennyh chastic / A. N. Lebedev, A. V. SHal'nov. – M. : FIZMATLIT, 2004. – 528 s.
12. Landau, L. D. Kurs teoreticheskoj fiziki / L. D. Landau, E. M. Lifshic. – 8-e izd., ispr. – M. : Fizmatlit, 2001. – T. 2 : Teoriya polya. – 536 s.
13. Vlasov, A. A. O vibracionnyh svojstvah elektronnogo gaza / A. A. Vlasov // Uspekhi fizicheskih nauk. – 1967. – T. 93, № 11. – S. 444–470.
14. Vlasov, A. A. Statisticheskie funkcii raspredeleniya / A. A. Vlasov. – M. : Nauka, 1966. – 356 c.
15. Aleksandrov, A. F. Osnovy elektrodinamiki plazmy / A. F. Aleksandrov, L. S. Bogdankevich, A. A. Ruhadze ; pod red. A. A. Ruhadze. – M. : Vysshaya shkola, 1978. – 408 s.
16. Molokovskij, S. I. Intensivnye elektronnye i ionnye puchki / S. I. Molokovskij, A. D. Sushkov. – 2-e izd., pererab. i dop. – M. : Energoatomizdat, 1991. – 304 s.
17. Arcimovich, L. A. Fizika plazmy dlya fizikov / L. A. Arcimovich, R. Z. Sagdeev. – M. : Atomizdat, 1979. – 320 s.
18. Alekseev, C. N. Elektrovakuumnye pribory : uchebnoe posobie / S. N. Alekseev.– Ul'yanovsk : UlGTU, 2003. – 158 s.
19. Humphries, S. Charged Particle Beams / S. Humphries. – New York : Wiley, 1990. – 856 p.

Материал поступил 24.02.2026, одобрен 14.03.2026, принят к публикации 17.03.2026

УДК 004.4:519.17

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

А. И. Жук[1], Е. Н. Защук[2], Л. А. Ярмолик[3], В. А. Шеина[4]

[1] К. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры математики и информатики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: aizhuk85@mail.ru

[2] К. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры математики и информатики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: shvichkina@tut.by

[3] Студентка факультета инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: askinglop@gmail.com

[4] Студентка факультета инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: veronikaseina78@gmail.com

Реферат

В статье представлены разработанные программные модули для работы с графами, ориентированные на решение прикладных задач анализа и оптимизации. А именно анализ социальных сетей, информационных потоков, установление характера коммуникаций между интересующими подмножествами.

Решение этих задач очень трудоемко и требует внедрения новых методов, которые можно использовать в классических задачах с графами на базе систем компьютерной алгебры. В статье исследуются способы задания графов в символьном пакете Mathematica, демонстрируются его возможности при работе с графами. Mathematica – это мощная система компьютерной алгебры, разработанная компанией Wolfram Research. Она используется для математических, инженерных и научных вычислений, а также для визуализации данных и моделирования сложных систем. В работе приведено обобщение задач, рассмотренных авторами ранее. Рассматривается функционал модулей, позволяющих выделять подграф по выбранным вершинам, находить окрестность одной вершины, а также вычислять окрестности трёх вершин и их объединение. Приведены программные реализации данных модулей и показано их применение на примере задачи оптимизации работы компании, где графовая модель используется для анализа взаимодействий между подразделениями и потоков информации. Таким образом, разработанные авторами модули становятся инструментом стратегического планирования, позволяя руководителям принимать обоснованные решения о перераспределении обязанностей и оптимизации рабочих процессов.

Полученные результаты демонстрируют эффективность предложенных инструментов для выявления ключевых узлов системы и поиска путей оптимизации организационной структуры, что подтверждает практическую ценность использования Mathematica в исследовательских и образовательных целях.

Ключевые слова: элементы теории графов, система компьютерной алгебры Wolfram Mathematica.

MODELING OF GRAPH THEORY IN SOLVING INFORMATION PROCESSING OPTIMIZATION PROBLEMS

A. I. Zhuk, E. N. Zashchuk, L. A. Yarmolik, V. A. Sheina

Abstract

The article presents the developed software modules for working with graphs, which are focused on solving applied problems of analysis and optimization. Namely, the analysis of social networks, information flows, establishing the nature of communications between subsets of interest.

Solving these problems is very labor-intensive and requires the introduction of new methods that will use classical problems with graphs based on computer algebra systems. The article explores the ways of setting up graphs in the symbolic package Mathematica, demonstrates its capabilities when working with graphs. Mathematica is a powerful computer algebra system developed by Wolfram Research. It is used for mathematical, engineering, and scientific calculations, as well as for data visualization and modeling of complex systems. This paper provides a generalization of the tasks discussed by the authors earlier. It examines the functionality of modules that allow for the selection of a subgraph based on selected vertices, the finding of the neighborhood of a single vertex, and the calculation of the neighborhoods of three vertices and their union. The paper presents the software implementations of these modules and demonstrates their application through the example of optimizing the operations of a company, where a graph model is used to analyze the interactions between departments and information flows. Thus, the modules developed by the authors become a tool for strategic planning, allowing managers to make informed decisions about the redistribution of responsibilities and the optimization of work processes.

The results obtained demonstrate the effectiveness of the proposed tools for identifying key nodes of the system and finding ways to optimize the organizational structure, which confirms the practical value of using Mathematica for research and educational purposes.

Keywords: elements of graph theory, computer algebra system Wolfram Mathematica.

Введение

В условиях роста интереса к анализу сетевых структур особую значимость приобретают инструменты, позволяющие не только изучать теоретические свойства графов, но и применять их для решения реальных задач [1]. Социальные сети, транспортные системы, биологические взаимодействия и информационные потоки – все эти области требуют наглядных и удобных средств для исследования локальных и глобальных связей. Мощным инструментом для изучения теории графов в таком аспекте выступают системы компьютерной алгебры, например, Wolfram Mathematica [2]. Так, в работах [3–5] приведена компьютерная симуляция биологических процессов, описывающих конкуренцию; в работах [6–9] рассмотрены задачи гидрологии; в публикациях [10–13] содержатся рекомендации при решении задач аналитической теории дифференциальных уравнений. Так авторами были разработаны программные модули в Wolfram Mathematica, которые помогают улучшить образовательный процесс при чтении лекций по некоторым разделам математики [14–22].

В среде Wolfram Mathematica были разработаны модули, ориентированные на практическое использование в прикладных сценариях. Среди них:

– средства для вывода на экран подграфа по выбранным вершинам или по заданному числу вершин, что позволяет моделировать локальные фрагменты больших сетей [23, 24];

– инструменты для поиска соседей одной вершины, а также расширенные версии для анализа соседей трех вершин с последующим объединением множеств, что открывает возможности для изучения взаимодействий в сложных системах [25, 26].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-115-122

Разработка таких модулей показывает хорошую эффективность при преподавании теории графов, что отображено в работах [27–30]. В них продемонстрированы методические особенности обучения студентов технических ВУЗов, которые помогают визуализировать графы и устанавливать их свойства.

Вывод подграфа по выбранным вершинам

Данный модуль предназначен для построения подграфа на основе множества вершин, выбранных пользователем. Он позволяет выделить локальную часть графа и визуализировать ее, что облегчает анализ структуры связей.

Программный код модуля представлен в СКА Mathematica [12]. Следующая пользовательская функция осуществляет случайную генерацию графа с использованием встроенной функции RandomGraph. В качестве аргументов она принимает три параметра: количество ребер, количество вершин и логическую переменную, определяющую, будет ли сгенерированный граф ориентированным или нет.

```
RG[n0_, m0_, t0_] := Module[{n = n0, m = m0, t = t0, style},style = {VertexSize -> 0.2, ImagePadding -> 10,
ImageSize -> {220, 320}};
g1 = RandomGraph[{n, m}, DirectedEdges -> t, VertexSize -> Medium, style];
g3 = Graph[g1,VertexLabels -> Table[i -> Subscript[v, i], {i, VertexCount[g1]}],style];g3]
```

Основной модуль реализован с использованием конструкции Manipulate, обеспечивающей интерактивное управление параметрами графа. При нажатии кнопки «новый граф» вызывается пользовательская функция RG [n0_, m0_, t0_], которая генерирует граф и отображает его на экране. Количество вершин и ребер задается через элементы интерфейса, а логическая переменная, определяющая тип графа, устанавливается кликом пользователя. После построения графа необходимо выбрать нужные вершины с помощью чекбоксов и авторский модуль автоматически сформирует и визуализирует соответствующий подграф. Построение подграфа в модуле осуществляется с использованием встроенной функции Subgraph, которая формирует граф на основе выбранного пользователем множества вершин. Динамическое обоснование визуализации реализовано через конструкцию Dynamic, позволяющую отображать изменения графовой структуры в реальном времени при взаимодействии с элементами интерфейса. Такое сочетание обеспечивает интерактивность, наглядность и гибкость работы с графами.

```
Manipulate[ Module[{ style},style = {VertexSize -> 0.2, ImagePadding -> 10, ImageSize -> {150, 150}}; flags = ConstantArray[1, n];  Grid[  {{g, Dynamic[Panel[Column[{"Укажите вершины подграфа",Table[With[{i=1}, Checkbox[Dynamic[flags[[i]]], {0, 1}]], {i,n}], "номера выбранных вершин",
Dynamic[Pick[Range[n], flags, 1]],Dynamic[HighlightGraph[g, Subgraph[g, Pick[Range[n], flags, 1]],
GraphHighlightStyle -> "Thick"]]}],ImageSize -> {300, 400}, Alignment -> {Left, Top},FrameMargins -> 0]]}}]],{{g, RG[5, 6, False]}, None}, {{t, {}}, None},
{{n, 5, "количество вершин графа n"}, 2, 10, 1,
 Appearance -> "Labeled"},Control[{{m, 4, "количество ребер графа m"}, n - 1, n (n - 1)/2, 1,Appearance -> "Labeled"}], {digraph, {True, False}},
Button["новый граф", g = RG[n, m, digraph]],
 AutorunSequencing -> {3}, SaveDefinitions -> True].
```

На рисунке 1 представлено пользовательское окно разработанного программного модуля. Интерфейс организован таким образом, чтобы обеспечить интуитивное и гибкое управление параметрами, позволяя пользователю легко формировать структуру графа, выбирать интересующие вершины и наблюдать результаты в реальном времени.

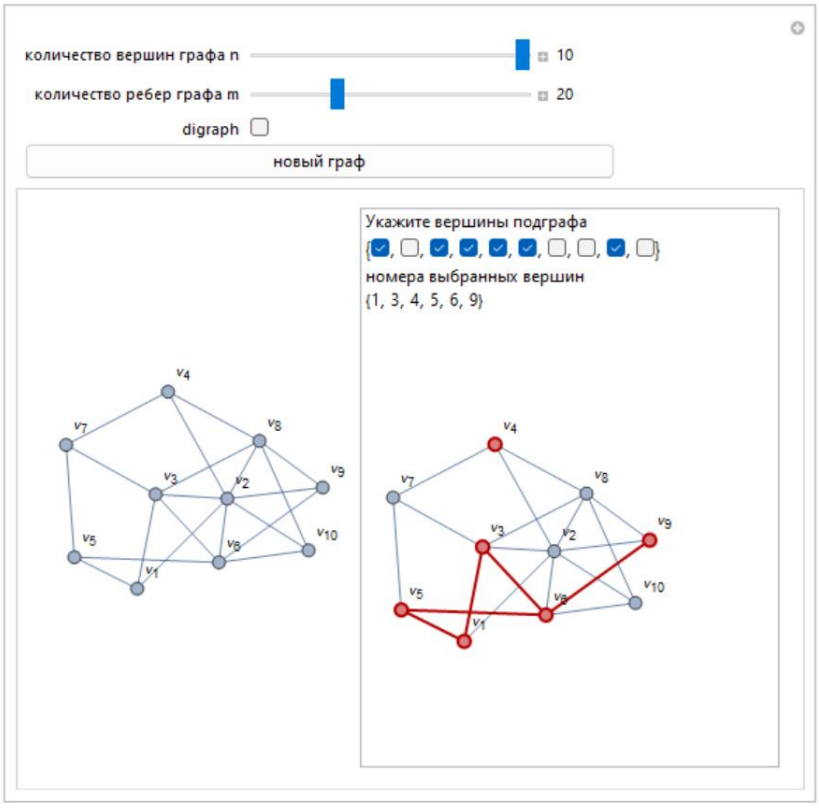


Рисунок 1 – Результат работы программного модуля по нахождению подграфа с выбранными пользователем вершинами

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-115-122

Модуль генерирует случайный граф по числу вершин и ребер при нажатии кнопки «новый граф». Пользователь может определить тип создаваемого графа (ориентированный или неориентированный) просто установив галочку в соответствующем окне интерфейса. После генерации графа он автоматически отображается на экране в интерактивном окне, где каждая вершина визуально представлена и доступна для выбора. Пользователь может отметить интересующие его вершины, установив галочки в соответствующем списке. Как только выбор завершен, модуль мгновенно перестраивает изображение, выделяя и отображая подграф, содержащий только выбранные вершины.

Модуль применим для анализа локального сообщества в социальной сети. Исследователь выбирает группу пользователей, чтобы изучить их взаимные связи. Подграф показывает, кто связан напрямую, а кто образует изолированные пары или кластеры. Это помогает выявить ядро сообщества и потенциальных лидеров.

Проиллюстрируем применение разработанного модуля для анализа некоторой социальной сети. На рисунке 1 представлен результат работы модуля. Пользователем сгенерирован неориентированный граф с 10 вершинами и 20 ребрами. Для анализа выбраны вершины с номерами 1, 3, 4, 5, 6, 9, построен соответствующий подграф. Интерпретируем граф и соответственно его подграф как социальную сеть и проанализируем полученные данные.

Структура сообщества:

– узлы и связи: $v1 - v5$, $v1 - v3$, $v5 - v6$, $v3 - v6$, $v6 - v9$; $v4$ – без связей;

– компоненты: основная группа $\{v1, v3, v5, v6, v9\}$ и изолированный участник $\{v4\}$;

– ядро: $v1$, $v3$, $v5$, $v6$ образуют плотный цикл, обеспечивая альтернативные маршруты общения.

Роли участников:

– лидер (мост): $v6$ – соединяет ядро с периферией, единственный канал доступа для $v9$;

– активное ядро $v1$, $v3$, $v5$ – поддерживают устойчивую коммуникацию внутри группы, создают резервные пути;

– периферия: $v9$ – зависит от $v6$ для связи с остальными, уязвим к разрыву контакта, $v6 - v9$;

– изолированный участник: $v4$ – не вовлечен в коммуникации, отсутствует доступ к информации влиянию.

Паттерны информации и влияние:

– основные потоки проходят через цикл $v1 - v5$, $v5 - v6$, $v6 - v3$, $v3 - v1$; обмен внутри ядра устойчив к единичным сбоям;

– контроль доступа: $v6$ обладает высокой посреднической ролью, влияя на распространение информации к $v9$;

– риск изоляции: $v9$ теряет связь с группой при проблемах у $v6$; $v4$ полностью вне сети.

На основании результата работы модуля можно сделать следующие практические выводы:

– ключевые узлы влияния: $v6$ (мост и координатор), $v1$, $v3$, $v5$ (стабильное ядро);

– слабые места: зависимость $v9$ от единственного канала через $v6$; отсутствие интеграции $v4$.

Рекомендации по улучшению работы сети:

– разгрузить мост: добавить связь $v9 - v3$ или $v9 - v1$ для альтернативного доступа;

– интегрировать $v4$: подключить к $v5$ или $v3$, чтобы включить в обмен;

– сбалансировать роли: распределить посредничество между $v1$ и $v3$, снижая концентрацию на $v6$.

Эта сеть может быть интерпретирована в разных прикладных контекстах, что подчеркивает универсальность графовых моделей. Выше была рассмотрена социальная сеть, где вершины отражают участников, а ребра – их взаимодействия: мы видим ядро активных связей и периферию, а также изолированных участников, что позволяет выявить лидеров и уязвимые точки коммуникации. При анализе транспортной сети вершины становятся станциями или узлами маршрутов, а ребра – линиями сообщения. С помощью описанного модуля можно определить пересадочные узлы, конечные станции и слабые места сети, где разрыв связи приводит к изоляции некоторого участка. При исследовании биологической сети вершины являются символьным аналогом молекул или клеток, а ребра – их взаимодействия. Анализ данной сети показывает ключевые элементы, обеспечивающие функционирование комплекса, периферийные связи и изолированные компоненты, которые могут играть роль специализированных взаимодействий. Таким образом, одна и та же структура графа позволяет делать выводы о лидерстве и посредничестве в социальных системах, о надежности и оптимизации маршрутов в транспортных сетях, а также о функциональной организации и устойчивости биологических взаимодействий.

Поиск соседей выбранной вершины

Для реализации данного модуля так же был выбран программный пакет Mathematica благодаря его широким возможностям в области визуализации графов, интерактивного моделирования и математического анализа. Среда представляет встроенные функции для обработки графов, что позволяет создавать наглядные и функциональные модели без необходимости подключения сторонних библиотек. СКА Mathematica объединят в себе вычислительную мощь, графические средства и элементы интерфейса в единой платформе, что делает ее особенно удобной для создания учебных модулей, визуальных демонстраций и интерактивных лабораторных работ по теории графов.

В основе разработанного модуля лежит авторская функция RG[n0_, m0_, t0_], реализующая генерацию случайного графа с заданным числом вершин и ребер. Для построения графа используется встроенная функция RandomGraph, которая позволяет гибко задавать параметры структуры. Особое внимание уделено возможности выбора типа графа посредством опции DirectedEdges, что расширяет спектр учебных и прикладных сценариев. Визуализация графа осуществляется с помощью функции Graph, обеспечивающей наглядное отображение структуры, включая вершины, ребра и их взаимное расположение. Для управления внешним видом графа введен пользовательский параметр style, позволяющий изменять стиль отображения графа: цвет, форму, размер вершин, тип и цвет ребер и другие визуальные параметры. Программный код этой функции приведен выше.

Ключевым элементов самого модуля является интерактивная оболочка, построенная на основе конструкции Manipulate, которая обеспечивает динамическое взаимодействие пользователя с графом. В частности, пользователь может выбрать номер вершины, для которой будет вычислена и визуализирована ее окрестность. Для нахождения окрестности вершины используется встроенная функция NeighborhoodGraph, возвращающая индуцированный подграф, включающий все вершины, находящиеся на расстоянии не более одного (или заданного) шага от выбранной вершины.

Визуальное выделение найденной окрестности реализуется с помощью функции HighlightGraph, которая позволяет акцентировать внимание на локальной структуре графа, сохраняя при этом общий контекст. Дополнительно предусмотрена анимация, при которой номер вершины изменяется последовательно, а соответствующая окрестность обновляется в реальном времени. Это создает эффект «обхода» графа и способствует формированию интуитивного понимания локальных связей и топологий. Программный код модуля представлен ниже:

```
Manipulate[ Module[{ style}, style = {VertexSize -> 0.2, ImagePadding -> 10, ImageSize -> {150, 150}};
Grid[{{HighlightGraph[g3, NeighborhoodGraph[g3, s]]}}] ],{{g, RG[5, 6, False]}, None}, {{t, {}}, None},
 {{n, 5, "количество вершин графа n"}, 2, 10, 1,   Appearance -> "Labeled"},
 Control[{{m, 4, "количество ребер графа m"}, n - 1, n (n - 1)/2, 1, Appearance -> "Labeled"}],{digraph, {True, False}}, Button["новый граф", g =
RG[n, m, digraph]], {{s, 1, "укажите вершину графа"}, Range[n]},
 AutorunSequencing -> {3}, SaveDefinitions -> True].
```


https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-115-122

Интерактивный модуль реализован в виде наглядного окна управления, где пользователь может поэтапно задавать параметры создаваемого графа. В верхней части интерфейса расположены элементы ввода, позволяющие указать необходимые параметры. На рисунке 2 показан пример работы программного модуля: построен ориентированный граф, содержащий 8 узлов и 17 связей, активной выбрана вершина под номером 3. На экране отображен полный граф, в котором окрестность этой вершины выделена цветом, подчеркивая ее непосредственные связи.

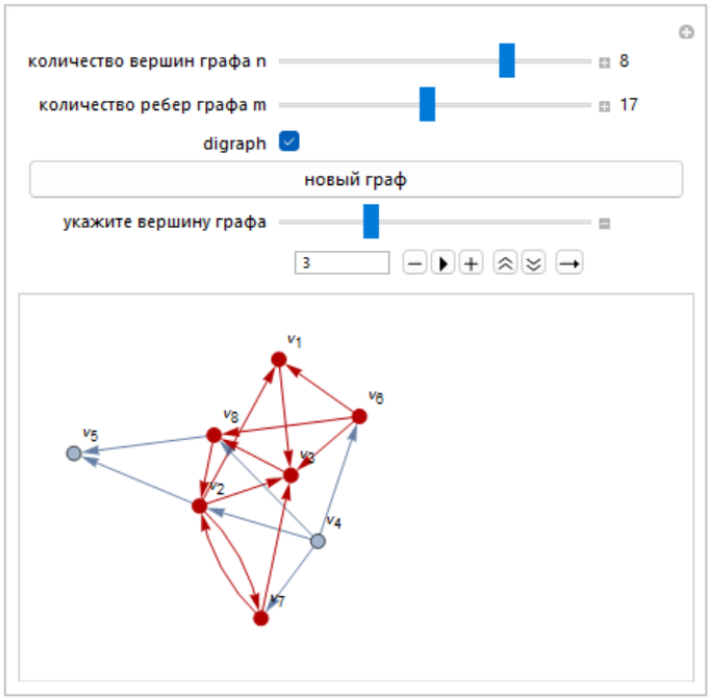


Рисунок 2 – Результат работы программного модуля нахождения окрестности выбранной вершины

Проиллюстрируем применение рассматриваемого модуля для анализа локального влияния в системе управления проектами. В некоторой компании используется графовоя модель для отслеживания потока задач между сотрудниками. Каждая вершина – это сотрудник, а направление ребра – передача задач или запросов. Цель: оценить локальную активность сотрудника $v3$. На рисунке 2 представлена окрестность вершины с соответствующим номером. Проведем анализ данной окрестности:

– входящие связи: $v3$ получает задачи от $v1$, $v2$, $v6$, $v7$. Это говорит о том, что $v3$ исполнитель, получающий задания от руководства;

– исходящие связи: $v3$ передает задачи другому исполнителю $v8$. Это может означать, что $v3$ координирует часть работы или распределяет подзадачи.

На основании этого можно сделать следующие выводы:

– роль $v3$: посредник между менеджерами и исполнителями. Получает задачи и делегирует их дальше;

– центральность: высокая степень активности: $v3$ участвует в пяти связях, что делает его критически важным для потока задач;

– устойчивость сети: потеря $v3$ нарушит передачу задач от менеджеров к исполнителю.

Рекомендации для улучшения работы компании:

– оптимизация: добавить прямые связи $v3 - v4$ или $v3 - v5$, чтобы снизить нагрузку на $v3$;

– мониторинг: отслеживать нагрузку на $v3$ и своевременно перераспределять задачи.

Таким образом, описанный модуль представляет собой универсальный инструмент для визуального и интерактивного анализа графов. Благодаря гибкой настройке параметров, возможности пошаговой анимации и наглядному выделению локальных структур, он может быть легко адаптирован под задачи любого прикладного типа. Независимо от предметной области модуль может быть настроен на работу с различными типами данных, визуальными параметрами и логической связью, что делает его мощным инструментом для исследования как реальных систем, так и учебных моделей.

Поиск соседей нескольких выбранных вершин и их объединения

На рисунке 3 представлено пользовательское окно разработанного модуля поиска соседей трех выбранных вершин графа, который находит еще и объединение полученных окрестностей. Интерфейс обеспечивает интуитивно понятное взаимодействие: в правой части отображается сгенерированный граф с подсвеченными различными цветами окрестностями выбранных вершин и рядом исходный граф с выделенным на нем объединением этих окрестностей. Дополнительные элементы управления расположены слева в рабочей области окна и позволяют задавать параметры генерации графа (количество вершин и ребер) и номера вершин, окрестности которых необходимо найти.

На рисунке 3 модулем был сгенерирован граф с 13 вершинами и 16 ребрами, для анализа выбраны вершины с номерами 3, 10, 11. На экран выведен первоначальный граф с подсвеченными окрестностями выбранных вершин (синий, красный, зеленый) и граф с выделенным объединением полученных окрестностей.

Рассмотрим пример прикладной задачи, решение которой реализуется с помощью данного модуля. В офисной сети сотрудники представлены вершинами графа, а задачи – направленными ребрами. Увольнение сотрудника означает удаление вершины и всех ее связей. Рассматривается ситуация, когда необходимо принять решение об увольнении сотрудников 3, 10 и 11. Важно оценить последствия каждого варианта, определить оптимальное решение и предложить план перераспределения работы.

Для начала определим роль каждого сотрудника:

– сотрудник 3 – ключевой мост: принимает задачи от 4, 8, 12 и передает их 9, откуда они поступают к рабочим узлам 5 и 6;

– сотрудник 10 – инициатор ветки: запускает поток через 4, далее в 3 и 13;

– сотрудник 11 – терминал: получает задачи от 1 и 2, но не передает их дальше.

Сценарий увольнения одного из сотрудников:

– увольнение 3 критично: разрывается магистраль $4 \to 3 \to 9 \to \{5,6\}$, узел 9 теряет вход, задачи на 6 перестают поступать.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-115-122

Рекомендация: ввести новые связи (например, $4 \to 9, 12 \to 9, 3 \to \{5,6\}$ для компенсации);

– увольнение 10: поток от $10 \to 4$ исчезает, но можно перенести функции запуска напрямую на 4. Рекомендация: назначить 4 координатором, добавить прямые связи $10 \to 3$ или $10 \to 9$ при необходимости;

– увольнение 11: потери минимальны, 11 – тупик, не влияющий на распределение задач. Рекомендация: перенаправить задачи от 1 и 2 на 4 или 8, чтобы они попали в продуктивные ветки.

Рассмотрим сценарий увольнения всех троих сотрудников.

Эффект от увольнения:

– поток $10 \to 4 \to 3 \to 9 \to \{5,6\}$ полностью исчезает;

– 9 и 6 становятся недоступны.

Рекомендации:

– перенести функции запуска на 4 (новый координатор);

– добавить прямые связи к 9 и 6 (например, $4 \to 9, 4 \to 6, 8 \to 5$);

– перенаправить 1 и 2 на 4 или 8;

– исключить назначения в тупик 13;

– контролировать цикл $1 \to 8 \to 1$, чтобы задачи не застревали;

– увольнение 11: потери минимальны, 11 – тупик, не влияющий на распределение задач.

На основании анализа сети можно сделать следующие выводы:

– наименее болезненное увольнение: сотрудник 11. Его удаление почти не влияет на сеть, достаточно переназначить задачи от 1 и 2;

– допустимо, но требует перенастройки сети увольнение 10, его функции легко перенести на 4;

– нежелательно увольнение 3, это разрушает ключевую магистраль к рабочим узлам 5 и 6;

– увольнение всех троих сотрудников возможно, но требует серьезной реструктуризации сети: введения новых связей и перераспределения ролей.

Практическая рекомендация: для сохранения устойчивости офисной сети оптимально уволить только сотрудника 11, перенаправив его задачи на продуктивные узлы. Увольнение 10 допустимо при условии переноса функций на 4. Увольнение 3 или всех троих одновременно приведет к значительным потерям и потребует сложной перестройки маршрутов.

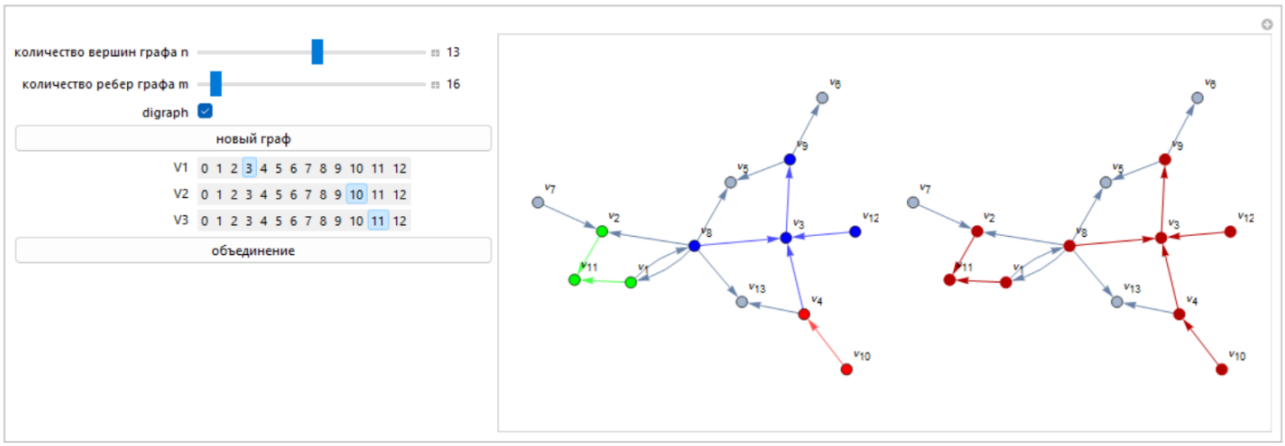


Рисунок 3 – Пользовательское окно программного модуля “GraphNeighborhoodExplorer”

Таким образом, разработанный авторами модуль становится инструментом стратегического планирования, позволяя руководителям принимать обоснованные решения о перераспределении обязанностей и оптимизации рабочих процессов.

Для обеспечения работы модуля были разработаны пользовательские функции, которые расширяют стандартные возможности системы Mathematica и делают процесс анализа графов интерактивным и педагогически ценным. Функция RG[n0_,m0_,t0_] позволяет формировать графы случайным образом по заданному числу вершин и ребер.

Отдельная функция

UNG[v01_, v02_, v03_, g0_] := Module[{v1 = v01, v2 = v02, v3 = v03, g = g0, style}, style = {VertexSize -> 0.2, ImagePadding -> 10, ImageSize -> {320, 320}}; g1 = NeighborhoodGraph[g, v1];

g2 = NeighborhoodGraph[g, v2];

g3 = NeighborhoodGraph[g, v3];

g4 = GraphUnion[g1, g2];

g5 = GraphUnion[g4, g3];

g6 = HighlightGraph[g, g5]; g6]

реализует нахождение объединения окрестностей выбранных вершин. Пользователь задает номера трех вершин, после чего система автоматически вычисляет множество вершин, входящих в объединение их окрестностей и визуализирует результат. Это позволяет наглядно продемонстрировать работу с множествами и их операциями в контексте теории графов.

Для организации интерактивного взаимодействия используется конструкция Manipulate в сочетании с механизмом Dynamic, что обеспечивает обновление графа в реальном времени при изменении параметров. В основе визуализации лежит встроенная функция NeighborhoodGraph, которая отвечает за построение окрестностей выбранных вершин. Благодаря этому студенты могут самостоятельно выбирать вершины, изменять параметры генерации графа и сразу наблюдать результат на экране.

Manipulate[Module[{ style}, style = {VertexSize -> 0.2, ImagePadding -> 10, ImageSize -> {150, 150}};

Grid[{{Dynamic[HighlightGraph[g,MapThread[Style[NeighborhoodGraph[g, #1], #2] &, {{v1, v2, v3}, {Blue, Red, Green}}]]], g6 }}]], {{g, RG[12, 28, False]}, None},{{n, 10, "количество вершин графа n"}, 5, 20, 1, Appearance -> "Labeled"}, Control[{{m, 9, "количество ребер графа m"}, n-1, n (n - 1)/2, 1, Appearance -> "Labeled"}], {digraph, {True, False}}, Button["новый граф", g = RG[n, m, digraph]], {{v1, 0, "V1"}, 0, 12, 1, SetterBar}, {{v2, 0, "V2"}, 0, 12, 1, SetterBar}, {{v3, 0, "V3"}, 0, 12, 1, SetterBar}, Button["объединение", g6 = UNG[v1, v2, v3, g]], AutorunSequencing -> {3}, SaveDefinitions -> True].

Такое программное решение позволяет соединить строгость математических определений с удобством практического исследования. При необходимости можно внести минимальные изменения в программный код, чтобы расширить функционал: например, реализовать поиск пересечения окрестностей выбранных вершин или добавить возможность анализа большего числа вершин одновременно. Такая гибкость делает модуль универсальным инструментом, который может быть использован не только для демонстрации базовых понятий теории графов, но и для решения более сложных исследовательских и практических задач.

Эти исследования подчеркивают значимость сочетания теории графов и современных вычислительных технологий, таких как Mathematica, для решения сложных задач оптимизации, управления ресурсами и построения эффективных сетей. Настоящая работа может служить основой для дальнейших исследований и развития практических приложений графов в различных областях науки и техники.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-115-122

Список цитированных источников

1. Лекции по теории графов / В. А. Емеличев, О. И. Мельников, В. И. Сарванов [и др.] // М. : Наука, 1990. – 390 с.
2. Wolfram Demonstrations Project. – URL: https://demonstrations.wolfram.com (date of access: 08.02.2026).
3. Чичурин, А. В. Компьютерное моделирование двух моделей хемостата для одного питательного ресурса / А. В. Чичурин, Е. Н. Швычкина // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Физика, математика, информатика. – 2013. – № 5 (83). – С. 9–14.
4. Chichurin, A. V. Computer simulation of two chemostat models for one nutrient / A. V. Chichurin, H. N. Shvychkina // Mathematical Biosciences. – 2016. – Vol. 278. – P. 30–36.
5. Chichurin, A. Finding the solutions with the infinite limit properties for the third order normal system of differential equations using the Mathematica system / A. Chichurin, H. Shvychkina // 7th International Symposium on Classical and Celestial Mechanics : book of abstracts of int. conf. CCMECH'2011, Siedlce, 23–28 Oct. 2011 / Dorodnitsyn Computing Centre of RAS ; ed.: V. V. Rumiantsev [at al.]. – Siedlce, 2011. – P. 23–24.
6. Махнист, Л. П. Применение систем компьютерной алгебры при решении модели стохастической гидрологии / Л. П. Махнист, Е. Н. Защук, И. И. Гладкий // Математические и физические методы исследований: научный и методический аспекты : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф., Брест, 22–23 апр. 2021 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. Н. Н. Сендера. – Брест, 2021. – С. 96–98.
7. Махнист, Л. П. Использование систем компьютерной алгебры в задаче гидрологического моделирования / Л. П. Махнист, Е. Н. Защук, И. И. Гладкий // Вычислительные методы, модели и образовательные технологии : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 22 окт. 2021 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. Д. В. Грицука. – Брест, 2021. – С. 54–56.
8. Махнист, Л. П. К решению задачи гидрологии с использованием систем компьютерной алгебры / Л. П. Махнист, Е. Н. Защук, И. И. Гладкий // Математическое моделирование и новые образовательные технологии в математике : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф., Брест, 28–29 апр. 2022 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. А. И. Басика. – Брест, 2022. – С. 17–18.
9. Махнист, Л. П. Об одном подходе к решению модели гидрологии с помощью систем компьютерной алгебры / Л. П. Махнист, Е. Н. Защук, И. И. Гладкий // Математическое моделирование и новые образовательные технологии в математике : сб. тез. докл. Респ. науч.-практ. конф., Брест, 28–29 апр. 2022 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. Н. Н. Сендера. – Брест, 2022. – С. 24.
10. Чичурин, А. В. Применение системы Mathematica при решении дифференциальных уравнений и в задачах математического моделирования : курс лекций для студентов специальности 1-31 03 01 «Математика (по направлениям)» : в 3 ч. / А. В. Чичурин, Е. Н. Швычкина. – Брест : Белорус. гос. ун-т, 2016. – Ч. 1. – 62 с.
11. Чичурин, А. В. Применение системы Mathematica при решении дифференциальных уравнений и в задачах математического моделирования : курс лекций для студентов специальности 1-31 03 01 «Математика (по направлениям)» : в 3 ч. / А. В. Чичурин, Е. Н. Швычкина. – Брест : Белорус. гос. ун-т, 2017. – Ч. 2. – 60 с.
12. Чичурин, А. В. Применение системы Mathematica при решении дифференциальных уравнений и в задачах математического моделирования : курс лекций для студентов специальности 1-31 03 01 «Математика (по направлениям)» : в 3 ч. / А. В. Чичурин, Е. Н. Швычкина. – Брест : Белорус. гос. ун-т, 2017. – Ч. 3. – 68 с.
13. Жук, А. И. Обобщенные решения систем автономных дифференциальных уравнений / А. И. Жук, Е. Н. Защук, Т. И. Каримова // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам : сб. науч. тр. / Мозыр. гос. пед. ун-т им. И. П. Шамякина ; редкол.: В. В. Давыдовская [и др.]. – Мозырь, 2025. – С. 229–233.
14. Швычкина, Е. Н. Использование СКА Mathematica при математической подготовке студентов в техническом университете / Е. Н. Швычкина // Математическое моделирование и новые образовательные технологии в математике 2015 : сб. ст. докл. респ. науч.-практ. конф., Брест, 23−24 апр. 2015 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. А. В. Чичурина. – Брест, 2015. – С. 110−113.
15. Швычкина, Е. Н Использование математического пакета в лекции «Знакочередующиеся ряды» / Е. Н. Швычкина, Е. Н. Рубанова // Вычислительные методы, модели и образовательные технологии : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 21 окт. 2016 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. О. В. Матысика. – Брест, 2016. – С. 148–149.
16. Защук, Е. Н. Использование математического пакета в лекции «Ряды Фурье» / Е. Н. Защук, А. И. Жук // Вычислительные методы, модели и образовательные технологии : сб. материалов IX респ. науч.-практ. конф., Брест, 22 окт. 2020 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. А. А. Козинского. – Брест, 2020. – С. 66−67.
17. Защук, Е. Н. Компьютерная визуализация тел вращения на лекциях для студентов технических специальностей / Е. Н. Защук, А. И. Жук // Математические и физические методы исследований: научный и методический аспекты : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф., Брест, 22–23 апр. 2021 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. Н. Н. Сендера. – Брест, 2021. – С. 38–39.
18. Защук, Е. Н. Моделирование «Полярной розы» в системах компьютерной алгебры / Е. Н. Защук, А. И. Жук // Современные проблемы математики и вычислительной техники : сб. материалов XII Респ. науч. конф. молодых ученых и студентов, Брест, 18–19 нояб. 2021 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: В. А. Головко (гл. ред.) [и др.]. – Брест, 2021. – С. 69–70.
19. Защук, Е. Н. Компьютерная визуализация трехмерных систем координат в чтении лекций по дисциплине «Математика» / Е. Н. Защук, А. И. Жук // Математическое моделирование и новые образовательные технологии в математике : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф., Брест, 28–29 апр. 2022 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. А. И. Басика. – Брест, 2022. – С. 56–57.
20. Защук, Е. Н. Использование методов компьютерной алгебры в лекциях «Предел числовой последовательности и функции» / Е. Н. Защук, А. И. Жук, Л. П. Махнист // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 1 (130). – С. 125–128.
21. Защук, Е. Н. Вычислительная визуализация определения эллипса / Е. Н. Защук, А. И. Жук // Вычислительные методы, модели и образовательные технологии : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф., Брест, 20 окт. 2023 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. Д. В. Грицука. – Брест, 2023. – С. 45–46.
22. Защук, Е. Н. Вычислительная визуализация определений кривых второго порядка / Е. Н. Защук, А. И. Жук // Математическое моделирование и новые образовательные технологии в математике : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 25–27 апр. 2024 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. А. И. Басика. – Брест, 2024. – С. 145–148.
23. Использование символьного пакета Mathematica для решения задач с применением теории графов / А. И. Жук, Е. Н. Защук, Л. А. Ярмолик, В. А. Шеина // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам : сб. науч. тр. / Мозыр. гос. пед. ун-т им. И. П. Шамякина ; редкол.: В. В. Давыдовская [и др.]. – Мозырь, 2025. – С. 233–235.
24. Особенности изучения теории графов в системе Wolfram Mathematica / А. И. Жук, Е. Н. Защук, Л. А. Ярмолик, В. А. Шеина // Математическое моделирование и новые образовательные технологии в математике : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., Брест, 24–25 апр. 2025 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина; под общ. ред. А.И. Басика. – Брест, 2025. – С. 211–214.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-115-122

25. Компьютерное моделирование оптимизации городской водопроводной сети с использованием теории графов Mathematica / А. И. Жук, Е. Н. Защук, Л. А. Ярмолик, В. А. Шеина // Физика и астрономия: фундаментальные, прикладные и дидактические исследования : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф., посвящ. памяти В. С. Секержицкого, Брест, 9 сент. 2025 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. А. В. Демидчика. – Брест, 2025. – С. 21–24.
26. Моделирование задач теории графов с использованием систем компьютерной алгебры / А. И. Жук, Е. Н. Защук, Л. А. Ярмолик, В. А. Шеина // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2025. – № 2 (137). – С. 171–177.
27. Внедрение инновационных подходов при изучении дисциплины «Теория графов» с использованием систем компьютерной алгебры / А. И. Жук, Е. Н. Защук, Л. А. Ярмолик, В. А. Шеина // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 3. Філалогія. Педагогіка. Псіхалогія. – 2025. – № 2. – С. 66–73.
28. Инновационные технологии в преподавании теории графов с применением систем компьютерной алгебры / А. И. Жук, Е. Н. Защук, Л. А. Ярмолик, В. А. Шеина // Вычислительные методы, модели и образовательные технологии : сб. материалов XIV Респ. науч.-практ. конф., Брест, 28 окт. 2025 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. О. В. Матысика. – Брест, 2025. – С. 211–214.
29. Методика преподавания теории графов с использованием систем компьютерной алгебры / А. И. Жук, Е. Н. Защук, Л. А. Ярмолик, В. А. Шеина // Непрерывное образование в области естественных наук и математики: организация, методология, технологии : сб. материалов VI науч.-практ. конф. с междунар. участием 26–27 июня 2025 г. / Гомел. обл. ин-т развития образования ; редкол.: О. А. Блажко (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2025. – С. 210–216.
30. Методика преподавания дисциплины «Теория графов» с использованием СКА Mathematica / А. И. Жук, Е. Н. Защук, Л. А. Ярмолик, В. А. Шеина // Восьмые Богдановские чтения. Дифференциальные уравнения : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 2–5 дек. 2025 г. / Белорус. гос. ун-т, Ин-т математики НАН Беларуси ; сост.: С. Г. Красовский, А. А. Леваков, А. В. Филипцов. – Минск, 2025. – С. 236–239.

References

1. Lekcii po teorii grafov / V. A. Emelichev, O. I. Mel'nikov, V. I. Sarvanov [i dr.] // M. : Nauka, 1990. – 390 s.
2. Wolfram Demonstrations Project. – URL: https://demonstrations.wolfram.com (date of access: 08.02.2026).
3. CHichurin, A. V. Komp'yuternoe modelirovanie dvuh modelej hemostata dlya odnogo pitatel'nogo resursa / A. V. CHichurin, E. N. SHvychkina // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fizika, matematika, informatika. – 2013. – № 5 (83). – S. 9–14.
4. Chichurin, A. V. Computer simulation of two chemostat models for one nutrient / A. V. Chichurin, H. N. Shvychkina // Mathematical Biosciences. – 2016. – Vol. 278. – P. 30–36.
5. Chichurin, A. Finding the solutions with the infinite limit properties for the third order normal system of differential equations using the Mathematica system / A. Chichurin, H. Shvychkina // 7th International Symposium on Classical and Celestial Mechanics : book of abstracts of int. conf. CCMECH'2011, Siedlce, 23–28 Oct. 2011 / Dorodnitsyn Computing Centre of RAS ; ed.: V. V. Rumiantsev [at al.]. – Siedlce, 2011. – P. 23–24.
6. Mahnist, L. P. Primenenie sistem komp'yuternoj algebry pri reshenii modeli stohasticheckoj gidrologii / L. P. Mahnist, E. N. Zashchuk, I. I. Gladkij // Matematicheskie i fizicheskie metody issledovanij: nauchnyj i metodicheskij aspekty : sb. materialov Resp. nauch.-prakt. konf., Brest, 22–23 apr. 2021 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. N. N. Sendera. – Brest, 2021. – S. 96–98.
7. Mahnist, L. P. Ispol'zovanie sistem komp'yuternoj algebry v zadache gidrologicheskogo modelirovaniya / L. P. Mahnist, E. N. Zashchuk, I. I. Gladkij // Vychislitel'nye metody, modeli i obrazovatel'nye tekhnologii : sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 22 okt. 2021 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. D. V. Gricuka. – Brest, 2021. – S. 54–56.
8. Mahnist, L. P. K resheniyu zadachi gidrologii s ispol'zovaniem sistem komp'yuternoj algebry / L. P. Mahnist, E. N. Zashchuk, I. I. Gladkij // Matematicheskoe modelirovanie i novye obrazovatel'nye tekhnologii v matematike : sb. materialov Resp. nauch.-prakt. konf., Brest, 28–29 apr. 2022 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. A. I. Basika. – Brest, 2022. – S. 17–18.
9. Mahnist, L. P. Ob odnom podhode k resheniyu modeli gidrologii s pomoshch'yu sistem komp'yuternoj algebry / L. P. Mahnist, E. N. Zashchuk, I. I. Gladkij // Matematicheskoe modelirovanie i novye obrazovatel'nye tekhnologii v matematike : sb. tez. dokl. Resp. nauch.-prakt. konf., Brest, 28–29 apr. 2022 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. N. N. Sendera. – Brest, 2022. – S. 24.
10. CHichurin, A. V. Primenenie sistemy Mathematica pri reshenii differencial'nyh uravnenij i v zadachah matematicheskogo modelirovaniya : kurs lekcij dlya studentov special'nosti 1-31 03 01 «Matematika (po napravleniyam)» : v 3 ch. / A. V. CHichurin, E. N. SHvychkina. – Brest : Belorus. gos. un-t, 2016. – CH. 1. – 62 s.
11. CHichurin, A. V. Primenenie sistemy Mathematica pri reshenii differencial'nyh uravnenij i v zadachah matematicheskogo modelirovaniya : kurs lekcij dlya studentov special'nosti 1-31 03 01 «Matematika (po napravleniyam)» : v 3 ch. / A. V. CHichurin, E. N. SHvychkina. – Brest : Belorus. gos. un-t, 2017. – CH. 2. – 60 s.
12. CHichurin, A. V. Primenenie sistemy Mathematica pri reshenii differencial'nyh uravnenij i v zadachah matematicheskogo modelirovaniya : kurs lekcij dlya studentov special'nosti 1-31 03 01 «Matematika (po napravleniyam)» : v 3 ch. / A. V. CHichurin, E. N. SHvychkina. – Brest : Belorus. gos. un-t, 2017. – CH. 3. – 68 s.
13. ZHuk, A. I. Obobshchennye resheniya sistem avtonomnyh differencial'nyh uravnenij / A. I. ZHuk, E. N. Zashchuk, T. I. Karimova // Innovacionnye tekhnologii obucheniya fiziko-matematicheskim i professional'no-tekhnicheskim disciplinam : sb. nauch. tr. / Mozyr. gos. ped. un-t im. I. P. SHamyakina ; redkol.: V. V. Davydovskaya [i dr.]. – Mozyr', 2025. – S. 229–233.
14. SHvychkina, E. N. Ispol'zovanie SKA Mathematica pri matematicheskoj podgotovke studentov v tekhnicheskom universitete / E. N. SHvychkina // Matematicheskoe modelirovanie i novye obrazovatel'nye tekhnologii v matematike 2015 : sb. st. dokl. resp. nauch.-prakt. konf., Brest, 23−24 apr. 2015 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. A. V. CHichurina. – Brest, 2015. – S. 110−113.
15. SHvychkina, E. N Ispol'zovanie matematicheskogo paketa v lekcii «Znakochereduyushchiesya ryady» / E. N. SHvychkina, E. N. Rubanova // Vychislitel'nye metody, modeli i obrazovatel'nye tekhnologii : sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 21 okt. 2016 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. O. V. Matysika. – Brest, 2016. – S. 148–149.
16. Zashchuk, E. N. Ispol'zovanie matematicheskogo paketa v lekcii «Ryady Fur'e» / E. N. Zashchuk, A. I. ZHuk // Vychislitel'nye metody, modeli i obrazovatel'nye tekhnologii : sb. materialov IX resp. nauch.-prakt. konf., Brest, 22 okt. 2020 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. A. A. Kozinskogo. – Brest, 2020. – S. 66−67.
17. Zashchuk, E. N. Komp'yuternaya vizualizaciya tel vrashcheniya na lekciyah dlya studentov tekhnicheskih special'nostej / E. N. Zashchuk, A. I. ZHuk // Matematicheskie i fizicheskie metody issledovanij: nauchnyj i metodicheskij aspekty : sb. materialov Resp. nauch.-prakt. konf., Brest, 22–23 apr. 2021 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. N. N. Sendera. – Brest, 2021. – S. 38–39.
18. Zashchuk, E. N. Modelirovanie «Polyarnoj rozy» v sistemah komp'yuternoj algebry / E. N. Zashchuk, A. I. ZHuk // Sovremennye problemy matematiki i vychislitel'noj tekhniki : sb. materialov XII Resp. nauch. konf. molodyh uchenyh i studentov, Brest, 18–19 noyab. 2021 g. / Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: V. A. Golovko (gl. red.) [i dr.]. – Brest, 2021. – S. 69–70.
19. Zashchuk, E. N. Komp'yuternaya vizualizaciya trekhmernyh sistem koordinat v chtenii lekcij po discipline «Matematika» / E. N. Zashchuk, A. I. ZHuk // Matematicheskoe modelirovanie i novye obrazovatel'nye tekhnologii v matematike : sb. materialov Resp. nauch.-prakt. konf., Brest, 28–29 apr. 2022 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. A. I. Basika. – Brest, 2022. – S. 56–57.

20. Zashchuk, E. N. Ispol'zovanie metodov komp'yuternoj algebry v lekciyah «Predel chislovoj posledovatel'nosti i funkcii» / E. N. Zashchuk, A. I. ZHuk, L. P. Mahnist // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2023. – № 1 (130). – S. 125–128.
21. Zashchuk, E. N. Vychislitel'naya vizualizaciya opredeleniya ellipsa / E. N. Zashchuk, A. I. ZHuk // Vychislitel'nye metody, modeli i obrazovatel'nye tekhnologii : sb. materialov Resp. nauch.-prakt. konf., Brest, 20 okt. 2023 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. D. V. Gricuka. – Brest, 2023. – S. 45–46.
22. Zashchuk, E. N. Vychislitel'naya vizualizaciya opredelenij krivyh vtorogo poryadka / E. N. Zashchuk, A. I. ZHuk // Matematicheskoe modelirovanie i novye obrazovatel'nye tekhnologii v matematike : sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 25–27 apr. 2024 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. A. I. Basika. – Brest, 2024. – S. 145–148.
23. Ispol'zovanie simvol'nogo paketa Mathematica dlya resheniya zadach s primeneniem teorii grafov / A. I. ZHuk, E. N. Zashchuk, L. A. YArmolik, V. A. SHeina // Innovacionnye tekhnologii obucheniya fiziko-matematicheskim i professional'no-tekhnicheskim disciplinam : sb. nauch. tr. / Mozyr. gos. ped. un-t im. I. P. SHamyakina ; redkol.: V. V. Davydovskaya [i dr.]. – Mozyr', 2025. – S. 233–235.
24. Osobennosti izucheniya teorii grafov v sisteme Wolfram Mathematica / A. I. ZHuk, E. N. Zashchuk, L. A. YArmolik, V. A. SHeina // Matematicheskoe modelirovanie i novye obrazovatel'nye tekhnologii v matematike : sb. materialov mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 24–25 apr. 2025 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina; pod obshch. red. A.I. Basika. – Brest, 2025. – S. 211–214.
25. Komp'yuternoe modelirovanie optimizacii gorodskoj vodoprovodnoj seti s ispol'zovaniem teorii grafov Mathematica / A. I. ZHuk, E. N. Zashchuk, L. A. YArmolik, V. A. SHeina // Fizika i astronomiya: fundamental'nye, prikladnye i didakticheskie issledovaniya : sb. materialov Resp. nauch.-prakt. konf., posvyashch. pamyati V. S. Sekerzhickogo, Brest, 9 sent. 2025 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. A. V. Demidchika. – Brest, 2025. – S. 21–24.
26. Modelirovanie zadach teorii grafov s ispol'zovaniem sistem komp'yuternoj algebry / A. I. ZHuk, E. N. Zashchuk, L. A. YArmolik, V. A. SHeina // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2025. – № 2 (137). – S. 171–177.
27. Vnedrenie innovacionnyh podhodov pri izuchenii discipliny «Teoriya grafov» s ispol'zovaniem sistem komp'yuternoj algebry / A. I. ZHuk, E. N. Zashchuk, L. A. YArmolik, V. A. SHeina // Vesnik Bresckaga ўniversiteta. Seryya 3. Filalogiya. Pedagogika. Psihalogiya. – 2025. – № 2. – S. 66–73.
28. Innovacionnye tekhnologii v prepodavanii teorii grafov s primeneniem sistem komp'yuternoj algebry / A. I. ZHuk, E. N. Zashchuk, L. A. YArmolik, V. A. SHeina // Vychislitel'nye metody, modeli i obrazovatel'nye tekhnologii : sb. materialov XIV Resp. nauch.-prakt. konf., Brest, 28 okt. 2025 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. O. V. Matysika. – Brest, 2025. – S. 211–214.
29. Metodika prepodavaniya teorii grafov s ispol'zovaniem sistem komp'yuternoj algebry / A. I. ZHuk, E. N. Zashchuk, L. A. YArmolik, V. A. SHeina // Nepreryvnoe obrazovanie v oblasti estestvennyh nauk i matematiki: organizaciya, metodologiya, tekhnologii : sb. materialov VI nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem 26–27 iyunya 2025 g. / Gomel. obl. in-t razvitiya obrazovaniya ; redkol.: O. A. Blazhko (otv. red.) [i dr.]. – Gomel', 2025. – S. 210–216.
30. Metodika prepodavaniya discipliny «Teoriya grafov» s ispol'zovaniem SKA Mathematica / A. I. ZHuk, E. N. Zashchuk, L. A. YArmolik, V. A. SHeina // Vos'mye Bogdanovskie chteniya. Differencial'nye uravneniya : materialy Mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 2–5 dek. 2025 g. / Belorus. gos. un-t, In-t matematiki NAN Belarusi ; sost.: S. G. Krasovskij, A. A. Levakov, A. V. Filipcov. – Minsk, 2025. – S. 236–239.

Материал поступил 23.02.2026, одобрен 01.03.2026, принят к публикации 02.03.2026

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-115-122

УДК 004.852:519.85

ФУНКЦИИ АКТИВАЦИИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ, ИХ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОГРАММИРОВАНИИ НА ПРИМЕРЕ БИБЛИОТЕКИ TENSORFLOW

В. А. Максимук[1], Р. А. Максимук[2]

[1] Студент-магистрант факультета электронно-информационных систем, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: sashanik212@gmail.com

[2] Студент-магистрант факультета электронно-информационных систем, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: romamaksimuk3@gmail.com

Реферат

В представленной научной работе проводится комплексное исследование функций активации (AF) – фундаментального компонента искусственных нейронных сетей, определяющего выходной сигнал узла на основе входных данных. Работа последовательно раскрывает роль AF как критического элемента нелинейности, который позволяет глубоким архитектурам обучаться сложным паттернам и выступать в роли универсальных аппроксиматоров.

Статья показывает эволюцию математических методов преобразования сигнала: от простейших линейных функций (Identity), пригодных лишь для задач скалярной регрессии, до сложных адаптивных и немонотонных структур. В работе проанализированы S-образные кривые (Sigmoid, Tanh), семейство ReLU, экспоненциальные юниты, обучаемые функции и диверсифицированные экспериментальные образцы.

Произведен также анализ градиентных потоков. В работе рассмотрено, как математические свойства производных AF влияют на возникновение проблем затухающего и взрывного градиентов. Демонстрируется, как переход от насыщающихся функций (сигмоида) к ReLU-подобным позволил ускорить обучение глубоких сетей, а внедрение таких функций, как GELU, стало индустриальным стандартом для современных трансформерных архитектур (BERT, GPT).

Исследование раскрывает потенциал современных решений, таких как Swish и Mish. Эти функции, полученные путем автоматизированного поиска и систематического анализа, за счет своей гладкости и немонотонности обеспечивают более эффективную пропагацию информации в сверхглубоких сетях. В разделе специализированных функций рассматриваются инструменты вероятностной нормировки, такие как Softmax, и их разреженные альтернативы (Sparsemax, Entmax).

Практическая значимость работы подкреплена примерами реализации в среде TensorFlow. Статья показывает, как механизмы автоматического дифференцирования (GradientTape) и инструменты визуализации (TensorBoard) позволяют исследователю эффективно отслеживать динамику активаций и стабильность обучения.

Ключевые выводы работы подчеркивают, что выбор функции активации – это не просто технический параметр, а стратегическое архитектурное решение, напрямую влияющее на точность, скорость сходимости и обобщающую способность искусственного интеллекта.

Ключевые слова: нейронные сети, функция активации, глубокое обучение, нелинейность, затухающий градиент, адаптивность, ReLU, TensorFlow.

ACTIVATION FUNCTIONS OF NEURAL NETWORKS, THEIR VISUALIZATION AND APPLICATION IN PROGRAMMING USING THE TENSORFLOW LIBRARY

V. A. Maksimuk, R. A. Maksimuk

Abstract

This paper presents a comprehensive study of activation functions (AFs), a fundamental component of artificial neural networks that determines a node's output based on input data. The paper consistently reveals the role of AFs as a critical element of nonlinearity, enabling deep architectures to learn complex patterns and act as universal approximators.

The paper demonstrates the evolution of mathematical methods for signal transformation: from simple linear functions (Identity), suitable only for scalar regression problems, to complex adaptive and non-monotonic structures. The paper analyzes S-shaped curves (Sigmoid, Tanh), the ReLU family, exponential units, learnable functions, and diversified experimental samples.

Gradient flows are also analyzed. The paper examines how the mathematical properties of AF derivatives influence the emergence of vanishing and exploding gradient problems. It demonstrates how switching from saturating functions (sigmoid) to ReLU-like functions has accelerated the training of deep networks, and the implementation of functions such as GELU has become an industry standard for modern transformer architectures (BERT, GPT).

The study reveals the potential of modern solutions such as Swish and Mish. These functions, obtained through automated search and systematic analysis, provide more efficient information propagation in ultra-deep networks due to their smoothness and non-monotonicity. The section on specialized functions discusses probabilistic normalization tools such as Softmax and their sparse alternatives (Sparsemax, Entmax).

The practical significance of the work is supported by implementation examples in the TensorFlow environment. The article demonstrates how automatic differentiation mechanisms (GradientTape) and visualization tools (TensorBoard) allow the researcher to effectively monitor activation dynamics and training stability. The key findings of the paper highlight that the choice of activation function is not simply a technical parameter, but a strategic architectural decision that directly impacts the accuracy, convergence rate, and generalization ability of artificial intelligence.

Keywords: neural networks, activation function, deep learning, nonlinearity, decaying gradient, adaptivity, ReLU, TensorFlow.

Введение

Ключевым компонентом, обеспечивающим высокую эффективность работы искусственных нейронных сетей, являются функции активации (AF). Их основное назначение состоит в том, что они определяют выходной сигнал узла сети на основе набора входных данных [4, 8].

В контексте математической модели нейронной сети, основная роль функции активации заключается во внедрении нелинейности [3]. Без использования нелинейных функций глубокая нейронная сеть, независимо от количества слоев, оставалась бы эквивалентной однослойному персептрону и могла бы выполнять лишь линейные преобразования, что ограничило бы её способность находить сложные нелинейные

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-123-130

закономерности в данных. Математические свойства функций активации, такие как дифференцируемость, монотонность и диапазон значений, напрямую влияют на скорость обучения, стабильность градиентных потоков и общую обобщающую способность модели [4].

Эволюция функций активации прошла путь от классических S-образных кривых, таких как логистическая сигмоида и гиперболический тангенс, до семейства ReLU, которое стало стандартом де-факто благодаря своей вычислительной эффективности и способности бороться с проблемой затухающих градиентов. Современный этап развития глубокого обучения характеризуется появлением адаптивных и немонотонных функций, таких как Swish и Mish, а также разработкой обучаемых функций, параметры которых настраиваются одновременно с весами сети. Понимание характеристик различных категорий функций активации критически важно для эффективного проектирования и обучения нейросетевых архитектур [11, 12].

Как и алгоритмы оптимизации, функции активации имеют строго определенную структуру и формульную имплементацию. Поэтому они широко представлены в различных инструментах, помогающих применять функции активации в программировании – например, в библиотеке TensorFlow. Использование таких модулей, как tf и tf.keras, сильно упрощает имплементацию функций активации, предоставляя, в том числе, экспериментальную свободу при поиске подходящего решения. Кроме вышеперечисленного, TensorFlow автоматизирует сложные вычисления градиентов, полностью контролируя даже такие сложные современные адаптивные функции, как Swish и Mish.

1 Общее описание функций активации

Как уже было описано ранее, задача функции активации заключается во внедрении нелинейности в вычисления нейронной сети. Без использования нелинейных функций любая многослойная сеть, независимо от её глубины, будет выполнять лишь последовательность линейных операций, а с математической точки зрения композиция линейных функций сама является линейной функцией, что делает глубокую сеть без функций активации эквивалентной однослойному персептрону [15]. Аналогично, любой блок последовательных слоев без функций активации может быть сведен к одному линейному слою после перемножения соответствующих матриц весов. Таким образом, именно нелинейные функции активации позволяют сетям выступать в роли универсальных аппроксиматоров, способных изучать сложные иерархические представления и моделировать нелинейные зависимости в данных.

Различные характеристики функций активации существенно влияют на способность модели к обучению и её итоговую точность. К ключевым характеристикам функций активации можно отнести нелинейность, дифференцируемость, монотонность, ограниченность, центрирование относительно нуля, вычислительную сложность [4, 10, 26].

Функции активации (AF) на основе их характеристик и исторического предназначения могут быть разделены на несколько ключевых групп [3]. Линейные AF представляют собой прямую, делая градиент независимым от значений входа. Классические AF имеют S-образную форму, гладкие и ограниченные, исторически использовались первыми. ReLU-подобные AF характеризуются линейностью для положительных входов и занулением для отрицательных. Адаптивные AF содержат параметры, которые настраиваются вместе с весами сети. Вероятностные и специализированные AF используются преимущественно в выходных слоях для формирования распределения вероятностей классов.

Использование функций активации неразрывно связано с рядом фундаментальных проблем [4, 16].

1. Проблема затухающего градиента (Vanishing Gradient) возникает, когда градиент становится крайне малым по мере распространения вглубь сети, что вредит обучению, так как веса сети не обновляются должным образом.

2. Проблема взрывного градиента (Exploding Gradient) описывает резкий рост значений градиента по мере распространения вглубь сети, ведущий к нестабильности.

3. Проблема умирающих нейронов (Dead Neuron Problem) – это ситуация, когда нейроны с ReLU-типом активации перестают обновляться из-за постоянного нулевого выхода при отрицательных входах.

4. Насыщение (Saturation) характеризуется предрасположенностью некоторых функций активации формировать плато значений, зачастую в отдалении от нуля, где производная близка к нулю.

Проблемы затухающего и взрывного градиентов связаны между собой и напрямую зависят от значения производной используемой функции активации при обратном распространении [13, 21]. Градиент вычисляется путем последовательного перемножения локальных производных согласно цепному правилу, соответственно, накапливая аномальные значения с процессом распространения по сети. Так, например, максимальное значение производной сигмоиды составляет всего 0,25. При перемножении таких малых величин в глубоких архитектурах (например, с 20 слоями) итоговый градиент в начальных слоях становится исчезающе малым, из-за чего веса практически не обновляются и обучение останавливается [14].

Различные функции активации позволяют частично и полностью решать отдельные проблемы, оставаясь подверженными остальным. Кроме того, помимо решения очевидных проблем, делающих обучение невозможным, стоит также принимать во внимание и общие характеристики AF, например, вычислительную сложность, ведь даже незначительное усложнение процесса расчета AF в конечном итоге может повлиять на общую скорость обучения из-за постоянного вычисления градиентов.

Стоит отметить, что в программировании функции активации зачастую представлены в виде отдельных функций или строковых параметров связанных функций. Так, воспользовавшись модулем tf.keras.activations библиотеки TensorFlow v2.16.1 можно из набора входных значений xt получить выходные значения yt, преобразованные в тензор. Преобразование можно осуществить функцией, имеющей схожее название с используемой функцией активации, например, GeLU [1, 17]:

```
import numpy as np
import tensorflow as tf

x = np.linspace(-2, 2, 5).astype(np.float32)
y = tf.keras.activations.gelu(x)
print("Input: ", x)
print("Output: ", y)
```

```
Input: [-2. -1.  0.  1.  2.]
Output: tf.Tensor([-0.04550026 -0.15865526 0.  0.8413447
1.9544997], shape=(5,), dtype=float32)
```

Полученные значения могут быть применены для визуализации функций активации [28].

При использовании модуля tf.keras.layers в процессе определения структуры нейронной сети присвоенная слою функция активации может быть передана в виде строкового параметра. Создание простого слоя на 16 нейронов с функцией активации GeLU выглядит следующим образом:

```
tf.keras.layers.Dense(16, activation='gelu')
```

Более подробная информация о полном наборе функций и возможных строковых значениях доступна в официальных документациях TensorFlow и Keras.

2 Линейные функции активации. Identity

Линейные функции активации – это простейший тип преобразования сигнала в нейронной сети. Они сохраняют пропорциональную зависимость между входным и выходным значениями [3, 29].

Основным представителем этой группы является функция тождественности Linear (или Identity):

$$f(z) = z. \quad (1)$$

И ее масштабированная модификация Scaled Linear:

$$f(z) = a \cdot z, \quad (2)$$

где a – коэффициент наклона.

На рисунке 1 приведены классические функции активации – Identity.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-123-130

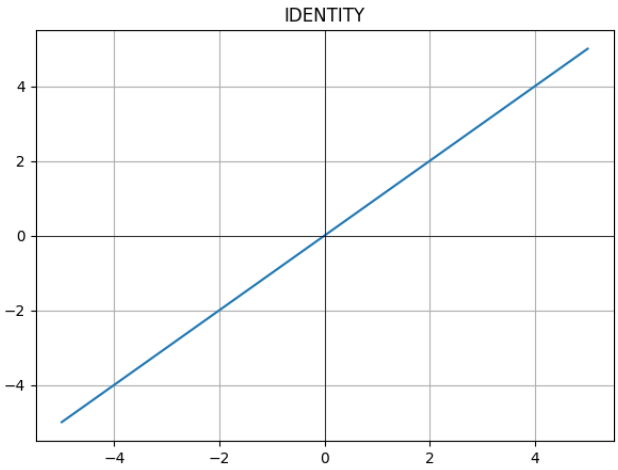


Рисунок 1 – Линейные функции активации – Identity

В TensorFlow Identity представлена как tensorflow.keras.activations.linear или 'linear'. Кроме того, Identity – значение по умолчанию для класса слоя Dense.

Из формул (1) и (2) видно, что функцию активации Linear можно представить как Scaled Linear с коэффициентом наклона a = 1. Соответственно, производная таких AF постоянна и равна a:

$$f'(z) = a. \tag{3}$$

Такая особенность производных этих функций активации делает их самыми простыми для вычислений при расчете градиентов среди всех доступных AF [18, 19].

Использование линейных функций несет ряд серьезных ограничений, которые стоит учитывать при определении структур нейронных сетей. Как уже неоднократно упоминалось ранее, композиция нескольких линейных функций сама является линейной функцией, сводя несколько слоев с линейной функцией активации к одному эквивалентному, то есть без введения нелинейности увеличение глубины сети не расширяет её пространство гипотез. Поэтому линейные модели не могут аппроксимировать нелинейные зависимости, такие как классическая задача XOR [22].

Несмотря на множественные ограничения, линейные функции активации незаменимы в определенных частях нейронных сетей. Так, линейные AF могут быть применены для снижения размерности – линейные скрытые блоки могут использоваться для уменьшения количества параметров через факторизацию [24]. Кроме этого, линейные AF активно применяются для задач регрессии: если целью сети является предсказание непрерывного числового значения, которое не ограничено конкретным диапазоном (0, 1), то на выходном слое применяется линейная активация. Также, на практике, Identity-функция исторически была основой алгоритмов ADALINE [16].

В современных глубоких сетях линейная активация практически никогда не используется в скрытых слоях, уступая место семейству ReLU, которое сохраняет преимущества линейности для положительных значений, но вводит необходимую нелинейность за счет зануления отрицательных входов [3].

3 Классические функции активации

3.1 Логистическая сигмоида (Sigmoid)

Классические функции активации характеризуются S-образной формой. Они были доминирующими на ранних этапах развития глубокого обучения и до сих пор широко применяются в специфических архитектурах. Эти функции являются гладкими, монотонными и имеют фиксированный математический вид без обучаемых параметров [3].

Логистическая сигмоида Sigmoid – одна из самых известных функций активации, формула имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}. \tag{4}$$

И ее производная:

$$f'(x) = \frac{e^{-x}}{(1+e^{-x})^2}. \tag{5}$$

На рисунке 2 приведены классические функции активации – Sigmoid.

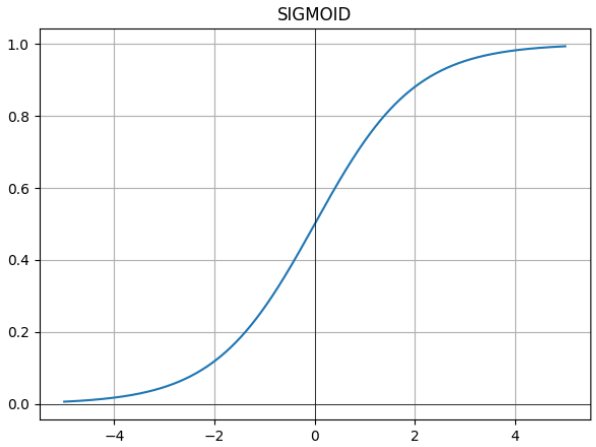


Рисунок 2 – Классические функции активации – Sigmoid

В TensorFlow Sigmoid представлена как tf.keras.activations.sigmoid или 'sigmoid'.

Как видно на рисунке 2, диапазон значений Sigmoid равен (0, 1), поэтому эта AF хорошо подходит для выходных слоев в задачах бинарной классификации. Однако, Sigmoid, как и все классические AF, сильно уязвима к проблеме насыщения и затухания градиента: при очень больших или малых значениях аргумента функция выходит на плато, где производная практически равна нулю. Кроме того, расчет экспоненты требует значительных ресурсов по сравнению с простыми операциями в ReLU [4, 23].

3.2 Гиперболический тангенс (Tanh)

Гиперболический тангенс Tanh является альтернативой сигмоиде. Он определяется формулой:

$$f(x) = \frac{e^{x}-e^{-x}}{e^{x}+e^{-x}}. \tag{6}$$

Производная Tanh:

$$f'(x) = \frac{4}{(e^{x}+e^{-x})^2}. \tag{7}$$

На рисунке 3 приведены классические функции активации – Tanh.

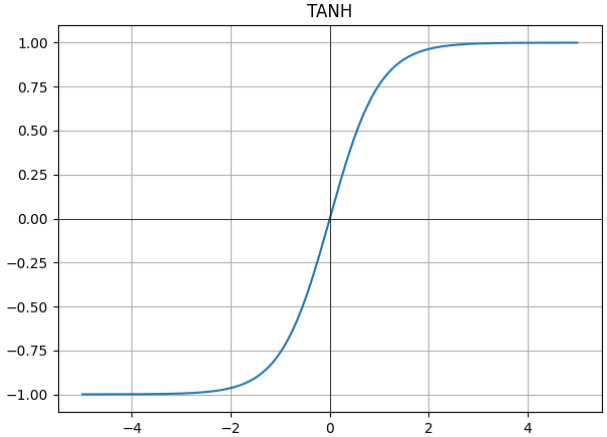


Рисунок 3 – Классические функции активации – Tanh

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-123-130

В TensorFlow Tanh представлен как tf.keras.activations. tanh или 'tanh'.

Главная особенность, отличающая Tanh от Sigmoid, Tanh работает в интервале (–1, 1). Одним из недостатков сигмоиды было то, что, поскольку выходы Sigmoid всегда положительны, градиенты весов в процессе обновления будут иметь одинаковые знаки, что может вызывать нестабильность и замедлять сходимость. Tanh же помогает центрировать данные в скрытых слоях в начале обучения, что значительно ускоряет сходимость градиентного спуска [6, 20]. Однако, как и сигмоида, Tanh подвержен насыщению градиента.

Tanh часто является предпочтительным выбором для рекуррентных нейронных сетей (RNN), так как помогает удерживать значения в стабильном диапазоне в течение многих временных шагов [25, 27].

3.3 Кусочно-линейные варианты

Стоит упомянуть специфические вариации (hard-вариации) классических функций, такие как Hard-sigmoid и Hard-tanh. В основе своей изменения в их структуре по сравнению с оригинальными прототипами внесены для использования в системах с ограниченными вычислительными ресурсами или в аппаратных реализациях [5, 30].

Hard-sigmoid представляет собой кусочно-линейную функцию, которая имитирует S-образную кривую, но состоит из простых арифметических операций без вычисления экспоненты. Она возвращает 0 при x≤−3, 1 при x≥3 и линейно изменяется между ними.

Hard-tanh является более простой версией Tanh, ограничивая линейный сигнал f(x) = x в диапазоне [–1, 1]. Она широко применяется в задачах обработки естественного языка (NLP) и робототехнике.

4 ReLU-подобные функции активации

4.1 Ректифицированный линейный юнит (ReLU)

Семейство функций активации на базе линейного ректификатора (ReLU), в отличие от классических S-образных функций, являются ненасыщающимися в положительной области, что критически важно для предотвращения затухания градиентов.

ReLU – простой стандарт для скрытых слоев современных нейронных сетей [5]. Формула:

$$f(x) = \max(0, x). \tag{8}$$

Производная:

$$f'(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ 1, & x > 0. \end{cases} \tag{9}$$

На рисунке 4 приведены ReLU-подобные функции активации – ReLU.

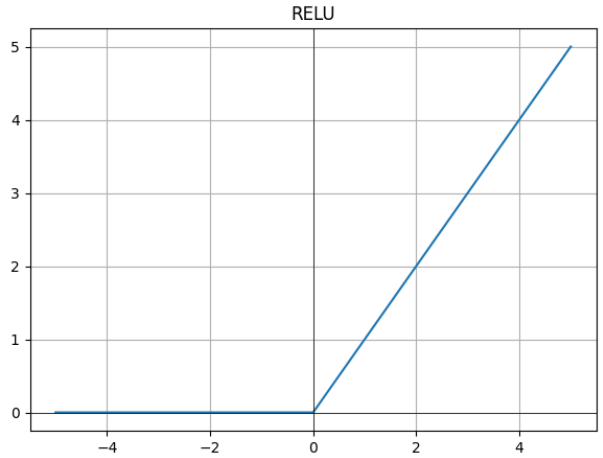


Рисунок 4 – ReLU-подобные функции активации – ReLU

В TensorFlow ReLU представлен как tf.keras.activations. relu или 'relu'.

К особенностям ReLU можно отнести ранее упомянутую ненасыщаемость: в положительной области производная всегда равна 1, что позволяет сигналу ошибки проходить через множество слоев без потерь. Кроме того, функция не требует расчета экспонент или деления, что значительно ускоряет обучение. Однако, если веса обновляются так, что вход всегда отрицателен, нейрон перестает активироваться и обновляться, так как его градиент становится нулевым.

4.2 Leaky ReLU

Leaky ReLU (LReLU) была предложена для решения проблемы смерти нейронов путем введения небольшого наклона в отрицательной области, заставляя градиенты никогда не затухать.

Математическая формула LReLU определяется как:

$$f(x) = \max(\alpha x, x), \tag{10}$$

где α – коэффициент наклона (обычно малый, например, 0,01) [3].

Производная:

$$f'(x) = \begin{cases} \alpha, & x < 0, \\ 1, & x > 0. \end{cases} \tag{11}$$

На рисунке 5 приведены ReLU-подобные функции активации – LReLU.

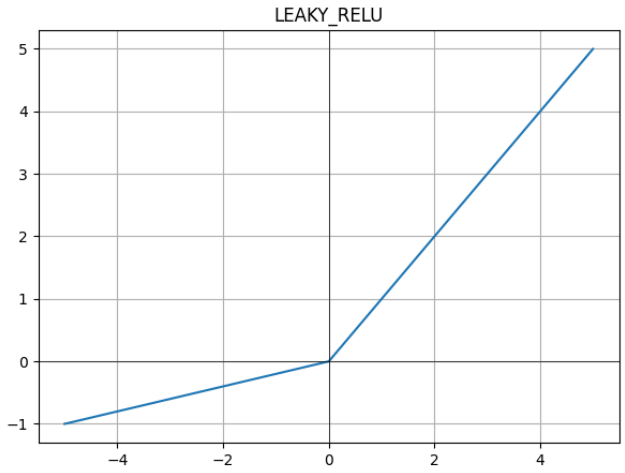


Рисунок 5 – ReLU-подобные функции активации – LReLU

В TensorFlow для использования LReLU можно применять tf.nn.leaky_relu.

Наличие коэффициента α гарантирует, что градиент никогда не станет нулевым, позволяя нейронам не зануляться в процессе обучения. Это особенно ценно в задачах, где важно сохранение информации об отрицательных входах, например, в генеративно-состязательных сетях (GAN) [22].

4.3 Гауссовский линейный юнит (GELU)

GELU – современная функция активации, которая, в отличие от ReLU, не просто зануляет отрицательные значения, а взвешивает входное значение его вероятностью в рамках стандартного нормального распределения. В формуле GELU зачастую используют аппроксимацию, поскольку точный расчет функции ошибок (erf) вычислительно сложен. Тогда аппроксимация формулы GELU:

$$f(x) = 0.5x\left(1 + \tanh\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}}\left(x + 0.044715x^3\right)\right)\right) \tag{12}$$

или выраженная через сигмоиду:

$$f(x) = x \cdot \sigma(1.702x) \tag{13}$$

где σ – сигмоида.

Производная GELU:

$$f'(x) = \sigma(1.702x) + 1.702x\,\sigma(1.702x)(1 - \sigma(1.702x)) \tag{14}$$

На рисунке 6 приведены ReLU-подобные функции активации – GELU.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-123-130

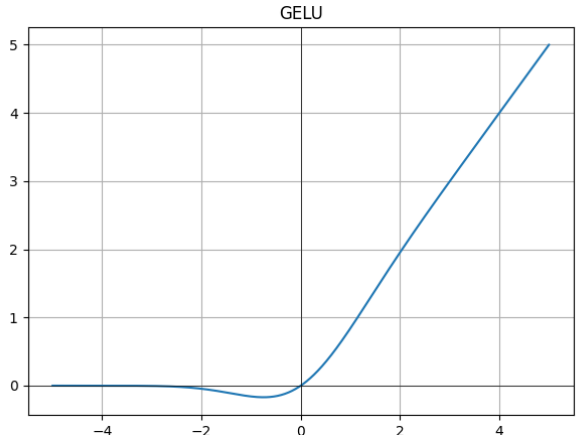


Рисунок 6 – ReLU-подобные функции активации – GELU

В TensorFlow GeLU представлена tf.keras.activations.gelu или 'gelu'.

В отличие от ReLU, имеющей резкий излом в нуле, GELU является полностью гладкой функцией. Также она немонотонна в небольшой области отрицательных значений (имеет локальный минимум), что может улучшать поток градиентов и обучение сложных структур [7]. GELU хорошо сочетается с пакетной нормализацией (Batch normalization), так как входы нейронов после неё часто имеют распределение, близкое к нормальному. GELU является основной функцией активации в большинстве современных языковых моделей, то есть в NLP и Трансформерах.

4.4 Прочие функции семейства ReLU

Среди прочих ReLU-подобных AF можно выделить Softplus, ELU и SELU.

Softplus определяется как f(x) = ln(1 + ex). Это полностью гладкая аппроксимация ReLU с диапазоном (0,∞). Несмотря на гладкость, на практике она часто уступает ReLU по качеству обучения [24].

ELU использует экспоненту для отрицательных значений: f(x) = α(ex − 1) при x ≤ 0. Это позволяет приблизить среднее значение активаций к нулю, что ускоряет сходимость и повышает устойчивость к шуму [3].

SELU является вариантом ELU f(x) = λ (ELU(x)) с фиксированными параметрами масштабирования (λ ≈ 1,0507, α ≈ 1,6733). Обладает уникальным свойством самонормализации: при соблюдении определенных условий выходы слоев автоматически сохраняют среднее 0 и дисперсию 1, решая проблему взрывных/затухающих градиентов без Batch Normalization [9].

5 Адаптивные функции активации

5.1 Swish

Адаптивные функции активации представляют собой класс функций, которые способны динамически настраивать свои параметры в процессе обучения в зависимости от характеристик входных данных или архитектуры нейронной сети [3].

Swish (или SILU) – это одна из гибридных функций активации, определяется формулой:

$$f(x)=\frac{x}{1+e^{-\beta x}}=x\cdot\mathrm{sigmoid}(\beta x)\,, \tag{15}$$

где β – обучаемый параметр. Он может быть как фиксированной константой, так и обучаемым весом. При малых значениях β функция ведет себя как линейная, а при больших – приближается к ReLU. Это позволяет сети самостоятельно контролировать уровень вносимой нелинейности [6].

Производная Swish:

$$f'(x)=\frac{1}{1+e^{-\beta x}}+\frac{x}{1+e^{-\beta x}}\left(1-\frac{1}{1+e^{-\beta x}}\right)\beta\,. \tag{16}$$

На рисунке 7 приведены адаптивные функции активации – Swish.

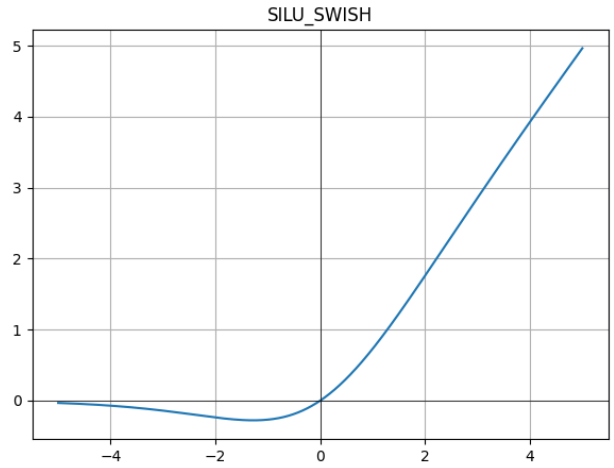


Рисунок 7 – Адаптивные функции активации – Swish

В TensorFlow для использования Swish можно применять tf.keras.activations.silu, либо строковые 'silu' и 'swish'.

Swish является гладкой, непрерывной и немонотонной функцией, что является её ключевым отличием от классических AF. Swish обладает плавной немонотонностью в области отрицательных значений, благодаря чему он не обнуляет информацию полностью, как это делает ReLU. Это позволяет сетям эффективнее передавать и градиенты, и сами активации через глубокие слои, что улучшает обучение и нередко приводит к более высокой точности на сложных задачах классификации [4].

5.2 Mish

Адаптивная AF Mish обладает более широким минимумом по сравнению со Swish и ReLU, что помогает избегать локальных минимумов и делает ландшафт функции потерь более гладким [4].

Формула Mish:

$$f(x)=x\cdot\tanh\left(\ln(1+e^{x})\right)=x\cdot\tanh(\mathrm{softplus}(x))\,. \tag{17}$$

Производная:

$$f'(x)=\tanh\left(\ln(1+e^{x})\right)+x\cdot\left(1-\tanh^{2}\left(\ln(1+e^{x})\right)\right)\cdot\frac{1}{1+e^{-x}}\,. \tag{18}$$

На рисунке 8 приведены адаптивные функции активации – Mish.

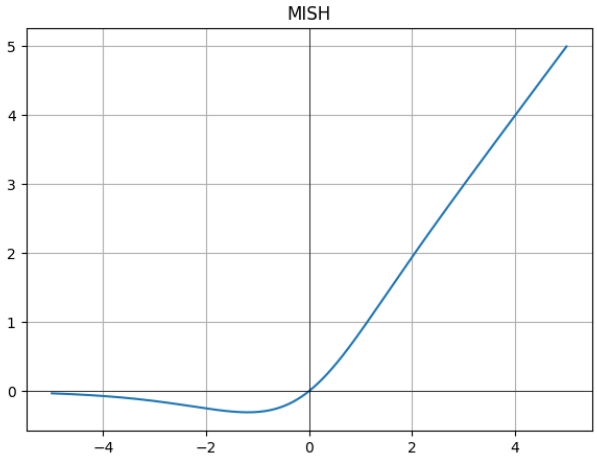


Рисунок 8 – Адаптивные функции активации – Mish

Для использования в TensorFlow Mish нужно определить самостоятельно, например, как return x * tf.math.tanh(tf.math.softplus(x)) либо использовать строковое представление 'mish'.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-123-130

За счет сохранения небольшого количества информации от отрицательных входов Mish значительно снижает риск появления проблемы Dying ReLU. Функция продемонстрировала высокую эффективность в задачах компьютерного зрения, в частности, она использовалась в архитектуре YOLOv4 для обнаружения объектов [6]. Тем не менее, её вычислительная сложность выше из-за использования нескольких функций (tanh, softplus).

5.3 Кусочно-линейные варианты

Как и в случае с классическими AF, адаптивные функции активации имеют свои альтернативные версии. Примером может послужить Hard-swish – линеаризованная версия swish для применения в мобильных и встроенных системах с ограниченными ресурсами [9]. В своей формуле Hard-swish заменяет вычислительно дорогую сигмоиду на её кусочно-линейный аналог ReLU6:

$$f(x) = x \cdot \frac{\text{ReLU6}(x+3)}{6}. \quad (19)$$

Такая модификация значительно снижает затраты на расчет экспонент, сохраняя при этом основные преимущества Swish в плане точности.

6 Функции активации для вероятностных моделей и нормировки

6.1 Softmax

В отличие от функций активации для скрытых слоев, которые применяются к каждому нейрону независимо, функции для вероятностного моделирования и нормировки оперируют векторами значений, преобразуя их в распределения вероятностей. Проще говоря, функция активации Softmax, используемая при обучении вероятностных моделей и нормировке, применяется ко всем нейронам слоя одновременно, и значение каждого нейрона слоя зависит от всех остальных.

Для входного вектора x (называемого логитом) Softmax вычисляется как:

$$f(x_i) = \frac{e^{x_i}}{\sum_{j=1}^{N} e^{x_j}}. \quad (20)$$

Производная Softmax вычисляется по следующим формулам:

$$f_i'(x_j) = f_i(x_i)(\delta_{ij} - f_j(x_j)), \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}. \quad (21)$$

Таким образом, Softmax преобразует набор входных значений в набор вероятностей, сумма которых равна 1. Тогда можно визуализировать работу этой функции активации, показав, как меняется итоговое распределение в зависимости от значения одного из входов x. Пусть входы AF Softmax представлены, как [x, 0,5, 0,1]. Тогда итоговые вероятности будут меняться следующим образом (рисунок 9).

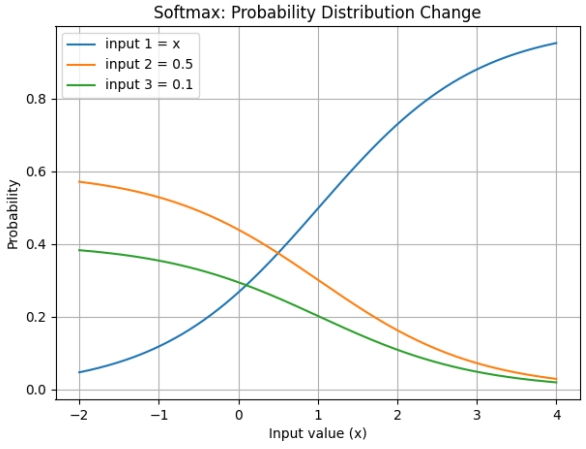


Рисунок 9 – Функции активации для вероятностных моделей и нормировки: пример Softmax

В TensorFlow Softmax доступен через tf.nn.softmax или 'softmax'.

Как уже упоминалось ранее, выход функции Softmax можно интерпретировать как распределение вероятностей по взаимоисключающим классам. Само собой, это делает Softmax идеальным кандидатом в задачах классификации.

Однако, при реализации Softmax часто возникает проблема переполнения из-за экспонент. Для её решения используется stable Softmax, где из каждого входа вычитается максимальное значение вектора: xi−max(x) [24].

6.2 Модификации Softmax

Gumbel-Softmax – это специализированная модификация, используемая для обучения моделей с дискретными переменными. Она позволяет проводить обратное распространение ошибки через процесс выборки из распределения, что невозможно с обычным Softmax. К логитам добавляется небольшой случайный шум, а затем применяется Softmax с настройкой "температуры".

Sparsemax превращает набор чисел в вероятности, оставляя часть элементов точно нулями, в отличие от softmax, где всё >0. Математически она определяется как: sparsemax(x)i = max(xi − т,0), где т – пороговое значение, вычисляемое адаптивно для каждого вектора. Это полезно в механизмах внимания, чтобы модель могла полностью игнорировать нерелевантные части входа [2].

Entmax является обобщением Softmax и Sparsemax, использующим энтропию Тсаллиса. Как softmax превращает числа в вероятности, а sparsemax иногда обнуляет часть значений, Entmax позволяет делать и то, и другое, но более гибко. С помощью параметра можно решать, сколько значений оставить нулями, а сколько – распределить как вероятности. Это делает эту AF эффективной в современных задачах обработки естественного языка (NLP) [2].

7 Экспериментальные и специализированные функции активации

Некоторые функции активации находятся на стадии активного исследования, либо были спроектированы для решения узкоспециализированных задач, таких как оптимизация вычислений на аппаратном уровне или улучшение градиентных потоков в сверхглубоких сетях [4].

Maxout – мощная обобщающая функция. В отличие от традиционных AF, она не просто применяет нелинейность к взвешенной сумме, а возвращает максимум из набора линейных функций:

$$f(x) = \max\left(w_1^T x + b_1, w_2^T x + b_2, \ldots, w_k^T x + b_k\right). \quad (22)$$

Maxout является универсальным аппроксиматором любых выпуклых функций. Она наследует преимущества ReLU (отсутствие насыщения), но при этом избавляет сеть от проблемы умирающих нейронов. Главным минусом является значительное увеличение количества параметров (в k раз), что делает модель вычислительно дорогой и требующей усиленной регуляризации [5].

SIREN (Sinusoidal Representation Networks) использует функцию синуса:

$$f(x) = \sin(ax). \quad (23)$$

Было показано, что такие функции позволяют одиночным нейронам решать сложные задачи, такие как XOR, и эффективно моделируют сигналы с высокой частотой (звук, изображения) [4].

SQNL разработана для обеспечения максимальной вычислительной эффективности, особенно в аппаратных реализациях (FPGA, мобильные чипы). Она аппроксимирует форму сигмоиды или тангенса, используя только квадратичные операции, полностью исключая расчет экспонент:

$$\text{SQNL}(x) = \begin{cases} -1, & x \leq -2 \\ [2mm]x + \frac{x^2}{4}, & -2 < x < 0 \\ [1mm]x - \frac{x^2}{4}, & 0 \leq x < 2 \\ [1mm]1, & x \geq 2 \end{cases}. \quad (24)$$

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-123-130

Производная SQNL является линейной, что на порядок ускоряет процесс обратного распространения ошибки по сравнению с традиционными AF [9].

LiSHT – это непараметрическая функция, предложенная для решения проблем затухающего градиента при сохранении преимуществ гиперболического тангенса:

$$f(x) = x \cdot \tanh(x). \quad (25)$$

Функция является симметричной и выдает только неотрицательные значения в диапазоне $[0,\infty)$. В отличие от ReLU, LiSHT использует информацию от отрицательных входов, масштабируя их, что может улучшить обучение в архитектурах вроде LSTM или глубоких остаточных сетях [9].

Bent Identity представляет собой изогнутую функцию тождественности, которая вводит нелинейность, сохраняя при этом общую линейную форму:

$$f(x) = \frac{\sqrt{x^2+1}-1}{2} + x. \quad (26)$$

Эта AF действует как гладкая аппроксимация ReLU, обеспечивая наличие градиента даже при отрицательных значениях, что делает ландшафт функции потерь более стабильным для оптимизации [9].

Заключение

Таким образом, функции активации (AF) – критически важные компоненты нейронных сетей, определяющих их способность к обучению и обобщению. Основная роль функций активации заключается во внедрении нелинейности, что позволяет глубоким сетям аппроксимировать сложные зависимости и не превращаться в простые линейные модели.

AF прошли путь от простейших линейных функций, используемых преимущественно в задачах регрессии, до классических S-образных кривых (Sigmoid, Tanh). Переход к семейству ReLU стал революционным шагом, позволившим эффективно обучать сверхглубокие сети за счет устранения проблемы затухающих градиентов в положительной области.

Современный этап развития нейронных сетей характеризуется использованием адаптивных функций, таких как Swish и Mish, которые за счет своей немонотонности и гладкости обеспечивают лучшую сходимость и точность в сложных архитектурах.

Выбор конкретной AF должен быть строго продиктован спецификой задачи и типом слоя. Если функции семейства ReLU доминируют в скрытых слоях, то для выходных слоев незаменимыми остаются Softmax (в задачах многоклассовой классификации) и Sigmoid (для бинарного вывода), обеспечивающие вероятностную интерпретацию результатов.

На примере библиотеки TensorFlow можно увидеть, как современные фреймворки автоматизируют сложные вычисления производных, упрощая и визуализируя изменения данных. Применяя классы или строковые параметры, можно сокращать затраты времени на определение AF, фокусируясь на реализации и обучении нейронных сетей, позволяя TensorFlow определять и оптимизировать математические расчеты.

Список цитированных источников

1. Документация TesnorFlow. – URL: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf (дата обращения: 13.02.2026).
2. Документация Keras. – URL: https://keras.io/api/layers/activations (дата обращения: 13.02.2026).
3. Bouraya, S. A comparative analysis of activation functions in neural networks: unveiling categories / S. Bouraya, A. Belangour // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2024. – Vol. 13. – 8 c.
4. Gustineli, M. A survey on recently proposed activation functions for Deep Learning / M. Gustineli // Cornell University. – 2022. – 7 c.
5. Activation Functions: Comparison of Trends in Practice and Research for Deep Learning / C. E. Nwankpa, W. Ijomah, A. Gachagan, S. Marshall // Cornell University. – 2018. – 20 c.
6. Dubey, S. R. Activation Functions in Deep Learning: A Comprehensive Survey and Benchmark / S. R. Dubey, S. K. Singh, B. B. Chaudhuri // Cornell University. – 2022. – 18 c.
7. Titiya, M. D. Analyzing the Effect of Different Activation Functions in Deep Learning on Accuracy and Execution time / M. D. Titiya, A. V. Bala, S. Degadwala // International Journal of intelligent systems and applications in engineering. – 2024. – 8 c.
8. Демещенко, М. В. Функции активации / М. В. Демещенко, Р. С. Марковец, Т. А. Сугако, В. Д. Владымцев // Компьютерные системы и сети : сборник статей 59-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 17–21 апр. 2023 г. / БГУИР. – Минск, 2023. – С. 333–340.
9. Kunc, V. Three decades of activations: a comprehensive survey of 400 activation functions for neural networks / V. Kunc, J. Klema // Cornell University. – 2024. – 107 c.
10. Хашин, С. И. Сравнение активаторных функций нейросети / С. И. Хашин // Вестник Ивановского государственного университета. Серия: Естественные, общественные науки. – 2020. – Вып. 2. – С. 106–111.
11. Kingma, D. P. Adam: a method for stochastic optimization / D. P. Kingma, J. L. Ba // 3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015, San Diego, CA, USA, May 7–9, 2015, Conference Track Proceedings. – 2015. – 15 p.
12. Ruder, S. An overview of gradient descent optimization algorithms / S. Ruder // Cornell University. – Dublin, 2016. – 14 p.
13. Kochenderfer, M. J. Algorithms for Optimization / M. J. Kochenderfer, T. A. Wheeler // The MIT Press. – Cambridge, Massachusetts, 2019. – P. 79–82.
14. Géron, A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems / A. Géron. – 2nd ed. – O'Reilly Media, Inc., 2019. – 856 p.
15. Singh, P. Learn TensorFlow 2.0: Implement Machine Learning and Deep Learning Models with Python / P. Singh, A. Manure // Apress. – Berkeley, CA, 2020. – 177 p. – DOI: 10.1007/978-1-4842-5558-2.
16. Рашка, С. Python и машинное обучение / С. Рашка, А. В. Логунова. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 418 с.
17. Рамсундар, Б. TensorFlow для глубокого обучения / Б. Рамсундар, Р. Б. Заде ; пер. с англ. А. В. Логунова. – СПб. : БХВ-Петербург, 2019. – 256 с.
18. Шукла, Н. Машинное обучение и TensorFlow / Н. Шукла, К. Фритлас ; пер. с англ. А. А. Слинкина. – СПб. : Питер, 2019. – 336 с.
19. Поляк, Б. Т. Введение в оптимизацию / Б. Т. Поляк. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 384 с.
20. Траск, Э. Грокаем глубокое обучение / Э. Траск ; пер. с англ. А. А. Слинкина. – СПб. : Питер, 2019. – 352 с.
21. Потапов, А. С. Технологии искусственного интеллекта : учебное пособие / А. С. Потапов. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2010. – 218 с.
22. Шолле, Ф. Глубокое обучение на Python / Ф. Шолле ; пер. с англ. А. Н. Киселева. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2023. – 576 с.
23. Рашид, Т. Создай свою нейронную сеть / Т. Рашид ; [пер. с англ. А. В. Логунова]. – СПб. : Альфа-книга, 2017. – 272 с.
24. Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль ; [пер. с англ. А. А. Слинкина]. – М. : ДМК Пресс, 2018. – 652 с.
25. Современные численные методы оптимизации / А. В. Гасников, А. А. Дородницына, Ю. Г. Евтушенко [и др.] // Современные численные методы оптимизации : в 2 ч. / под ред. А. В. Гасникова. – М. : МЦНМО, 2021. – Ч. 1. – 272 с.
26. Матренин, П. В. Методы стохастической оптимизации / П. В. Матренин, М. Г. Гриф, В. Г. Секаев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – 67 с.
27. Гасников, А. В. Основные конструкции над алгоритмами выпуклой оптимизации и их приложения к получению новых оценок для сильно выпуклых задач / А. В. Гасников, Д. И. Камзолов, М. А. Мендель // Труды МФТИ. – 2016. – Т. 8, № 4 (32). – С. 36–52.
28. Воронцова, Е. А. Выпуклая оптимизация : учебное пособие / Е. А. Воронцова. – М. : МФТИ, 2021. – 364 с.

29. Nocedal, J. Numerical Optimization / J. Nocedal, S. J. Wright. – 2nd ed. – New York : Springer Science+Business Media, LLC, 2006. – 664 p.
30. Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning / C. M. Bishop. – New York : Springer Science+Business Media, LLC, 2006. – 738 p.

References

1. Dokumentaciya TesnorFlow. – URL: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf (data obrashcheniya: 13.02.2026).
2. Dokumentaciya Keras. – URL: https://keras.io/api/layers/activations (data obrashcheniya: 13.02.2026).
3. Bouraya, S. A comparative analysis of activation functions in neural networks: unveiling categories / S. Bouraya, A. Belangour // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2024. – Vol. 13. – 8 c.
4. Gustineli, M. A survey on recently proposed activation functions for Deep Learning / M. Gustineli // Cornell University. – 2022. – 7 c.
5. Activation Functions: Comparison of Trends in Practice and Research for Deep Learning / C. E. Nwankpa, W. Ijomah, A. Gachagan, S. Marshall // Cornell University. – 2018. – 20 c.
6. Dubey, S. R. Activation Functions in Deep Learning: A Comprehensive Survey and Benchmark / S. R. Dubey, S. K. Singh, B. B. Chaudhuri // Cornell University. – 2022. – 18 c.
7. Titiya, M. D. Analyzing the Effect of Different Activation Functions in Deep Learning on Accuracy and Execution time / M. D. Titiya, A. V. Bala, S. Degadwala // International Journal of intelligent systems and applications in engineering. – 2024. – 8 c.
8. Demeshchenko, M. V. Funkcii aktivacii / M. V. Demeshchenko, R. S. Markovec, T. A. Sugako, V. D. Vladymcev // Komp'yuternye sistemy i seti : sbornik statej 59-j nauch. konf. aspirantov, magistrantov i studentov, Minsk, 17–21 apr. 2023 g. / BGUIR. – Minsk, 2023. – S. 333–340.
9. Kunc, V. Three decades of activations: a comprehensive survey of 400 activation functions for neural networks / V. Kunc, J. Klema // Cornell University. – 2024. – 107 c.
10. Hashin, S. I. Sravnenie aktivatornyh funkcij nejroseti / S. I. Hashin // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye, obshchestvennye nauki. – 2020. – Vyp. 2. – S. 106–111.
11. Kingma, D. P. Adam: a method for stochastic optimization / D. P. Kingma, J. L. Ba // 3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015, San Diego, CA, USA, May 7–9, 2015, Conference Track Proceedings. – 2015. – 15 p.
12. Ruder, S. An overview of gradient descent optimization algorithms / S. Ruder // Cornell University. – Dublin, 2016. – 14 p.
13. Kochenderfer, M. J. Algorithms for Optimization / M. J. Kochenderfer, T. A. Wheeler // The MIT Press. – Cambridge, Massachusetts, 2019. – P. 79–82.
14. Géron, A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems / A. Géron. – 2nd ed. – O'Reilly Media, Inc., 2019. – 856 p.
15. Singh, P. Learn TensorFlow 2.0: Implement Machine Learning and Deep Learning Models with Python / P. Singh, A. Manure // Apress. – Berkeley, CA, 2020. – 177 p. – DOI: 10.1007/978-1-4842-5558-2.
16. Rashka, S. Python i mashinnoe obuchenie / S. Rashka, A. V. Logunova. – M. : DMK Press, 2017. – 418 s.
17. Ramsundar, B. TensorFlow dlya glubokogo obucheniya / B. Ramsundar, R. B. Zade ; per. s angl. A. V. Logunova. – SPb. : BHV-Peterburg, 2019. – 256 s.
18. SHukla, N. Mashinnoe obuchenie i TensorFlow / N. SHukla, K. Fritlas ; per. s angl. A. A. Slinkina. – SPb. : Piter, 2019. – 336 s.
19. Polyak, B. T. Vvedenie v optimizaciyu / B. T. Polyak. – M. : Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoj literatury, 1983. – 384 s.
20. Trask, E. Grokaem glubokoe obuchenie / E. Trask ; per. s angl. A. A. Slinkina. – SPb. : Piter, 2019. – 352 s.
21. Potapov, A. S. Tekhnologii iskusstvennogo intellekta : uchebnoe posobie / A. S. Potapov. – SPb. : SPbGU ITMO, 2010. – 218 s.
22. SHolle, F. Glubokoe obuchenie na Python / F. SHolle ; per. s angl. A. N. Kiseleva. – 2-e izd. – SPb. : Piter, 2023. – 576 s.
23. Rashid, T. Sozdaj svoyu nejronnuyu set' / T. Rashid ; [per. s angl. A. V. Logunova]. – SPb. : Al'fa-kniga, 2017. – 272 s.
24. Gudfellou, YA. Glubokoe obuchenie / YA. Gudfellou, I. Bendzhio, A. Kurvill' ; [per. s angl. A. A. Slinkina]. – M. : DMK Press, 2018. – 652 s.
25. Sovremennye chislennye metody optimizacii / A. V. Gasnikov, A. A. Dorodnicyna, YU. G. Evtushenko [i dr.] // Sovremennye chislennye metody optimizacii : v 2 ch. / pod red. A. V. Gasnikova. – M. : MCNMO, 2021. – CH. 1. – 272 s.
26. Matrenin, P. V. Metody stohasticheskoj optimizacii / P. V. Matrenin, M. G. Grif, V. G. Sekaev. – Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2016. – 67 s.
27. Gasnikov, A. V. Osnovnye konstrukcii nad algoritmami vypukloj optimizacii i ih prilozheniya k polucheniyu novyh ocenok dlya sil'no vypuklyh zadach / A. V. Gasnikov, D. I. Kamzolov, M. A. Mendel' // Trudy MFTI. – 2016. – T. 8, № 4 (32). – S. 36–52.
28. Voroncova, E. A. Vypuklaya optimizaciya : uchebnoe posobie / E. A. Voroncova. – M. : MFTI, 2021. – 364 s.
29. Nocedal, J. Numerical Optimization / J. Nocedal, S. J. Wright. – 2nd ed. – New York : Springer Science+Business Media, LLC, 2006. – 664 p.
30. Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning / C. M. Bishop. – New York : Springer Science+Business Media, LLC, 2006. – 738 p.

Материал поступил 03.03.2026, одобрен 17.03.2026, принят к публикации 30.03.2026

УДК 621.22:538.975

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ

Е. В. Овчинников[1], В. Ю. Фалёса[2], А. И. Веремейчик[3], Д. А. Линник[4], Е. И. Амирханов[5], В. М. Хвисевич[6], А. И. Адамчик[7]

[1] Д. т. н., доцент, заведующий кафедрой архитектуры и строительства, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: ovchin@grsu.by

[2] Директор акционерного общества "Научно-исследовательский институт эластомерных материалов и изделий Санкт-Петербург", Санкт-Петербург, Россия, e-mail: mail@niiemispb.ru

[3] К. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vai_mrtm@bstu.by

[4] К. т. н., доцент, декан инженерного факультета, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: d.linnik@grsu.by

[5] Заместитель директора акционерного общества "Научно-исследовательский институт эластомерных материалов и изделий Санкт-Петербург", Санкт-Петербург, Россия, e-mail: evg.amirkhanov@gmail.com

[6] К. т. н., доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vmhvisevich@bstu.by

[7] Аспирант инженерного факультета, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: adamchik_radiovolna@mail.ru

Реферат

В работе представлены результаты исследования структуры, морфологии и физико-механических свойств наноструктурированных композиционных покрытий, сформированных на стальных подложках. Актуальность работы обусловлена перспективностью использования тонкопленочных покрытий на основе фторсодержащих олигомеров (ФСО) в современном машиностроении благодаря их уникальным эксплуатационным характеристикам. Целью работы являлось изучение влияния технологических режимов формирования и последующей термической обработки на свойства покрытий двух типов: на основе нитрида титана (TiN), модифицированного фторсодержащими олигомерами, и на основе алмазоподобного углерода (a-C:H), а также их композиций с ФСО. Базовые покрытия из нитрида титана и алмазоподобного углерода осаждались методами электродугового испарения и импульсной катодно-дуговой плазмы, соответственно. Модифицирование поверхности проводилось растворным методом с использованием фторсодержащих олигомеров марок Ф-АК1 и Ф1 с последующей термообработкой в интервале температур от 373 до 573 К. Установлено, что морфология композиционных покрытий на основе TiN существенно зависит от режимов нанесения и температуры пост-обработки. Показано, что термообработка при 373 К способствует растеканию олигомера и заполнению микродефектов, формируя гладкую однородную пленку. Повышение температуры до 473 К инициирует кристаллизационные процессы с образованием структур типа «чешуек», а при 523 К наблюдается частичная десорбция пленки и укрупнение кристаллитов. Для алмазоподобных покрытий выявлено наличие полос поглощения, соответствующих связям C–H, C–C, C=C и C≡C. Показано, что термообработка композиционных алмазоподобных покрытий, модифицированных ФСО, приводит к сложным структурным перестройкам, изменению соотношения sp^2/sp^3-гибридизированного углерода и, в конечном итоге, к росту микротвердости в определенном интервале температур. Превышение температуры 573 К вызывает деструкцию как алмазоподобного покрытия, так и слоя ФСО, снижение адгезии и падение эксплуатационных характеристик. Установлено, что нанесение фторсодержащих олигомеров снижает поверхностную энергию покрытий, повышая их гидрофобность.

Ключевые слова: покрытие, нитрид титана, алмазосодержащие соединения, плазма, фторсодержащие олигомеры, структура, свойство.

PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE FLUORINE-CONTAINING COATINGS

E. V. Ovchinnikov, V. Yu. Falyosa, A. I. Verameichyk, D. A. Linnik, E. I. Amirkhanov, V. M. Khvisevich, A. I. Adamchyk

Abstract

This paper presents the results of a study of the structure, morphology, and physical and mechanical properties of nanostructured composite coatings formed on steel substrates. The relevance of this study stems from the potential of thin-film coatings based on fluorine-containing oligomers (FCOs) in modern mechanical engineering due to their unique performance characteristics. The aim of the study was to investigate the influence of formation process modes and subsequent heat treatment on the properties of two types of coatings: those based on titanium nitride (TiN) modified with fluorine-containing oligomers and those based on diamond-like carbon (a-C:H), as well as their composites with FCOs. Base coatings of titanium nitride and diamond-like carbon were deposited using electric arc evaporation and pulsed cathodic arc plasma, respectively. Surface modification was performed using a solution method using fluorine-containing oligomers of the F-AK1 and F1 grades, followed by heat treatment in the temperature range from 373 to 573 K. It was found that the morphology of TiN-based composite coatings significantly depends on the application modes and post-treatment temperature. Heat treatment at 373 K was shown to promote oligomer spreading and fill microdefects, forming a smooth, uniform film. Increasing the temperature to 473 K initiates crystallization processes with the formation of "flake"-type structures, and at 523 K, partial desorption of the film and coarsening of crystallites are observed. For diamond-like coatings, the presence of absorption bands corresponding to C–H, C–C, C=C, and C≡C bonds was detected. It has been shown that heat treatment of composite diamond-like coatings modified with fluorinated oligomers leads to complex structural changes, changes in the sp^2/sp^3 ratio of hybridized carbon, and, ultimately, an increase in microhardness within a certain temperature range. Exceeding 573 K causes destruction of both the diamond-like coating and the fluorinated oligomer layer, reduced adhesion, and a drop in performance characteristics. It has been established that the application of fluorinated oligomers reduces the surface energy of the coatings, increasing their hydrophobicity.

Keywords: coating, titanium nitride, diamond-containing compounds, plasma, fluorinated oligomers, structure, properties.

Введение

В условиях интенсификации развития машиностроения одной из ключевых задач является повышение надежности, долговечности и износостойкости деталей и механизмов технологического оборудования [1–6]. Эффективным способом решения этой задачи признано нанесение тонкослойных покрытий, которые позволяют кардинально изменять поверхностные свойства материалов, не влияя на объемные характеристики изделий [7, 11–21]. Среди широкого спектра функциональных покрытий особое место занимают материалы на основе фторсодержащих полимеров и олигомеров, что подтверждается многочисленными исследованиями [1, 3, 6, 8–10]. Интерес к данному классу соединений обусловлен их уникальной способностью сочетать высокую химическую инертность с низкой поверхностной энергией, что обеспечивает высокие антифрикционные и антиадгезионные характеристики.

Традиционно формирование тонких покрытий толщиной, как правило, не превышающей 1–3 мкм, было сопряжено с определенными технологическими трудностями. На сегодняшний день существуют несколько основных подходов к формированию тонких покрытий. Первый – плазмохимическое осаждение из активной газовой фазы, позволяющее получать высококачественные пленки за счет ионизации и разложения газообразных прекурсоров в газоразрядной плазме (PECVD). Вторым методом является физическое осаждение в вакууме из активной газовой фазы (PVD). Перспективным методом является также растворный, который стал доступен относительно недавно благодаря синтезу специальных растворимых фракций фторсодержащих олигомеров. Именно растворная технология вызывает сегодня наибольший интерес в научном и инженерном сообществе. Главным преимуществом данной методики является экономическая доступность и технологическая простота, так как процесс не требует применения сложного вакуумного и дорогостоящего плазмохимического оборудования, а может быть реализован методами окунания, распыления, полива. Покрытия, сформированные из растворов, обладают целым комплексом высоких эксплуатационных характеристик. Это объясняется особенностями молекулярного строения фторсодержащих олигомеров. Во-первых, наличие прочных связей углерод-фтор (C–F) в основной цепи обеспечивает материалу исключительную химическую стойкость к воздействию агрессивных сред, масел и органических растворителей. Во-вторых, присутствие химически активных концевых функциональных групп позволяет молекулам олигомеров прочно закрепляться на поверхности подложки или взаимодействовать с компонентами композита, образуя стабильную структуру. В-третьих, наличие в структуре макромолекулы эфирных связей (R-O-R') в сочетании со сравнительно невысокой молекулярной массой придает цепи гибкость и подвижность. Это способствует быстрому залечиванию микродефектов на поверхности исходного субстрата и пар трения, а также перераспределению напряжений в трущихся слоях, что напрямую влияет на долговечность покрытия [1, 3, 4, 9, 10].

С точки зрения трибологии, наиболее эффективными покрытиями, обеспечивающими максимальную износостойкость и минимальный коэффициент трения, являются двухкомпонентные или двухслойные системы. Их работа основана на принципе функционального разделения: твердая подложка или подслой, который воспринимает основную механическую нагрузку и обеспечивает несущую способность, в то время как сравнительно мягкий, пластичный поверхностный слой выполняет роль «твердой смазки». Этот слой должен обладать высокой способностью к пластической деформации и релаксации напряжений без образования трещин и разрушения. В качестве материала для такого пластичного слоя могут выступать различные вещества, обладающие низким сопротивлением сдвигу. Классическими примерами являются медь и ее сплавы, полиэтилен, а также политетрафторэтилен (ПТФЭ), известный своим достаточно низкими значениями коэффициента трения. Нанесение этих материалов на поверхность может осуществляться как упомянутыми выше методами плазмохимической обработки, так и другими технологиями, широко применяемыми в промышленности переработки пластических масс, например, напылением из растворов или расплавов.

Целью данной работы является исследование структуры и физико-механических свойств наноструктурированных покрытий на основе нитрида титана, алмазоподобного углерода и фторсодержащих соединений, получаемых как растворными, так и плазмохимическими методами.

Методика эксперимента

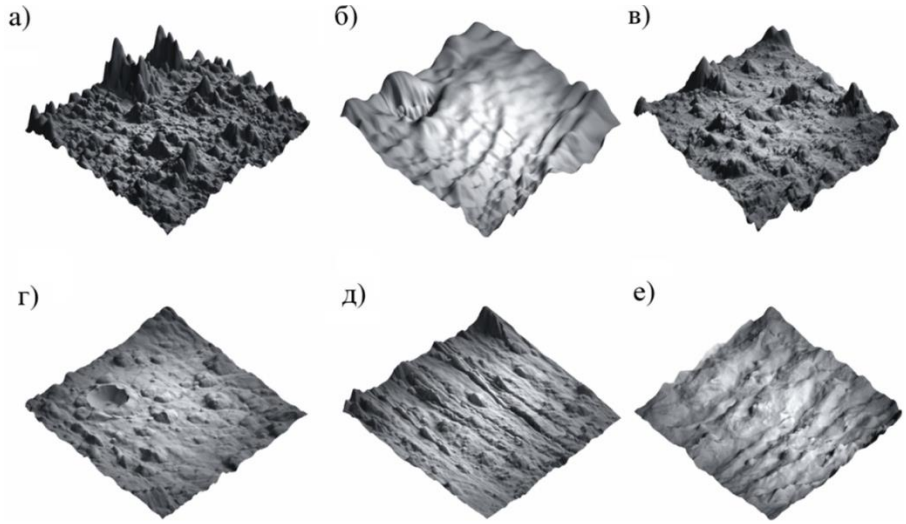
Процесс формирования основного слоя из нитрида титана выполнялся методом реактивного электродугового испарения с использованием установки УРМ3.279.048. Субстратом служили образцы из стали 45 толщиной до 1 мм. Стальной материал предварительно закаливался, затем отпускался до твердости 20–30 HRC и имел шероховатость поверхности R_a = 0,25 мкм. Перед нанесением покрытия подложка подвергалась очистке и нагреву с помощью бомбардировки ионами титана; скорость нагрева поддерживалась в диапазоне 3,2–3,5 К/с. Осаждение покрытия происходило в атмосфере азота при токе испарителя 110–130 А и напряжении 40–50 В. Алмазоподобные пленки (АПП) наносились на подложки из углеродистой стали 45, термообработанной по выше указанной технологии (закалка + отпуск). АПП формировали путем осаждения из импульсной плазмы, генерируемой катодно-дуговым разрядом, в среде паров углеводородов (ацетилена, метана или пропана). Итоговая толщина алмазоподобного слоя не превышала 2 мкм. Для некоторых модельных экспериментов в качестве подложек использовались полированные германиевые пластины. Исследование строения фторорганических соединений, сформированных на субстратах из нитрида титана и алмазоподобных покрытий проводили на ИК-спектрофотометре TENSOR-27.

Композиционные тонкопленочные покрытия получали путем погружения подложек из стали 45 с предварительно нанесенным слоем нитрида титана в модифицирующий раствор. В качестве модификатора использовали 1–2 % масс. раствор фторсодержащего олигомера во фреоне-113 (хладоне-113). Для модификации применялся олигомер марки Фолеокс Ф-АК1, структурная формула которого соответствует типу R_f-R (где R_F – фторированный радикал, R_f-полярная группа), с концевыми группами -$CONH_2$ и -COOH. Анализ морфологии поверхности полученных композиционных покрытий проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Оценку значений удельной поверхностной энергии активности выполняли прямотеневым методом, фиксируя изменение краевого угла смачивания. Расчет поверхностной энергии осуществляли с использованием двух тестовых жидкостей: полярной (дистиллированная вода) и неполярной (вазелиновое масло). Для придания покрытиям гидрофобных свойств образцы подвергались трехкратной обработке в 2 % растворе фторсодержащих олигомеров в хладоне. Для исследования термического влияния на полученные композиционные покрытия их подвергали последующей термообработке путем нагрева образцов в интервале температур от 300 до 580 К (выдержка 1 час). Измерения микротвердости проводились на приборе HWMMT-X7 при нагрузке на индентор 50 г. Коррозионные испытания осуществляли в камере соляного тумана НС-168700-000 путем распыления раствора хлорида натрия. Степень коррозионного поражения оценивалась визуально с определением типа повреждений и последующим измерением площади, подвергнутой коррозионному воздействию.

Результаты исследований

Морфология формируемых нанокомпозиционных покрытий на основе нитрида титана и фторсодержащего олигомера Ф-АК1 представлена на рисунке 1. Анализ структуры композитов показывает, что их топография напрямую зависит от технологических параметров осаждения. Так, при расположении подложки под углом 30–60° к нормали рабочей поверхности катода формируется покрытие с ярко выраженной капельной фазой, содержащее сферические фрагменты размером от 0,5 до 10 мкм (рисунок 1). Снижение силы тока и уменьшение угла наклона подложки способствует получению гладких, однородных покрытий, лишенных крупных агрегатов. Нанесение слоя фторсодержащих олигомеров (или ПТФЭ, либо их комбинации) на пленку нитрида титана придает поверхности образца гладкий и однородный характер. На начальном этапе фолеокс Ф-АК1 заполняет микронеровности (рисунок 1), снижая количество поверхностных дефектов. В последствии олигомер формирует собственную структуру, где дефекты подложки выступают в роли центров кристаллизации.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-131-137



а) нитрид титана; б) нитрид титана + Ф-АК1; в) нитрид титана + Ф-АК1 + термообработка при Т = 373К; г) нитрид титана + Ф-АК1 + термообработка при Т = 473К; д) нитрид титана + Ф-АК1+ термообработка при Т = 523К; е) нитрид титана + Ф-АК1 + термообработка при Т = 573К

Рисунок 1 – Морфология нитрида титана, модифицированного фторсодержащим олигомером Ф-АК1. Площадь сканирования 25 × 25 мкм.

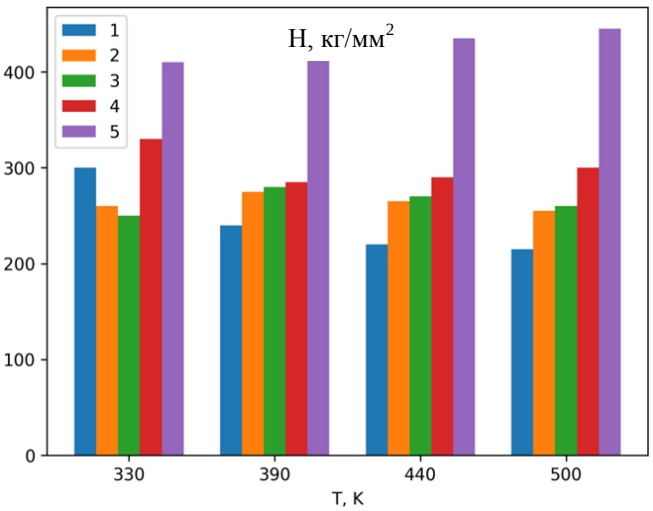
Особый интерес представляет анализ кривых опорной поверхности, позволяющих судить о распределении материала в шероховатом слое [1, 3]. Установлено, что нанесение ФСО модифицирует первый участок опорной кривой, соответствующий сечению наиболее глубоких впадин. При этом наблюдается увеличение доли материала на втором участке и ее уменьшение на третьем, который отвечает за самые высокие выступы подложки. Параметры шероховатости при этом составляют Ra = 155,9 нм, R_{max} возрастает до 2200 нм. Характер опорной кривой свидетельствует о том, что основной объем вещества сосредоточен под ее вторым участком. Текстурированность в пленках ФСО на нитриде титана не обнаружена. Последующая термообработка приводит к снижению параметров шероховатости: R_a уменьшается до 62,7 нм, R_{max} – до 600 нм.

Анализ опорной кривой показывает сокращение площадей первого и третьего участков, что указывает на значительное сглаживание поверхности нитрида титана после модификации фторсодержащим олигомером (ФСО). Термообработка при Т = 373 К приводит в покрытиях фторсодержащих олигомеров ориентационной упорядоченности молекул. Образование текстуры в слоях ФСО способно существенно влиять на свойства композиционных покрытий, поскольку текстурированные образцы, как известно, демонстрируют улучшенные физико-механические характеристики вдоль направления текстуры.

Повышение температуры до 473 К инициирует кристаллизационные процессы в пленках ФСО. Этот этап сопровождается ростом параметров шероховатости: R_a достигает 120,6 нм, а R_{max} – 1500 нм. Формируются кристаллические структуры, напоминающие «чешуйки», латеральным размером 4,8 × 2,4 мкм. Характерно также образование значительного числа мелких кристаллитов размером от 190 до 600 нм. Наблюдается сокращение количества впадин и перераспределение материала в сторону второй и третьей частей опорной кривой, при этом текстурированность пленок снижается.

Дальнейший нагрев до Т = 523 К вызывает частичную десорбцию пленки ФСО, обнажая поверхность подложки нитрида титана. Параллельно активизируется кристаллизация за счет повышенной подвижности молекул олигомера и их миграции к центрам кристаллизации. Это приводит к укрупнению кристаллических образований (до 2,4 × 4,8 мкм) и резкому сокращению числа мелких кристаллов. Значения R_a и R_{max} снижаются до 84,4 нм и 1100 нм, соответственно. Сформированные кристаллические структуры из ФСО обнаруживают ориентацию вдоль определенного направления. Увеличение значений термообработки свыше 573 К приводит к частичной десорбции покрытий фторсодержащего олигомера и обнажению исходного рельефа субстрата (рисунок 1 е).

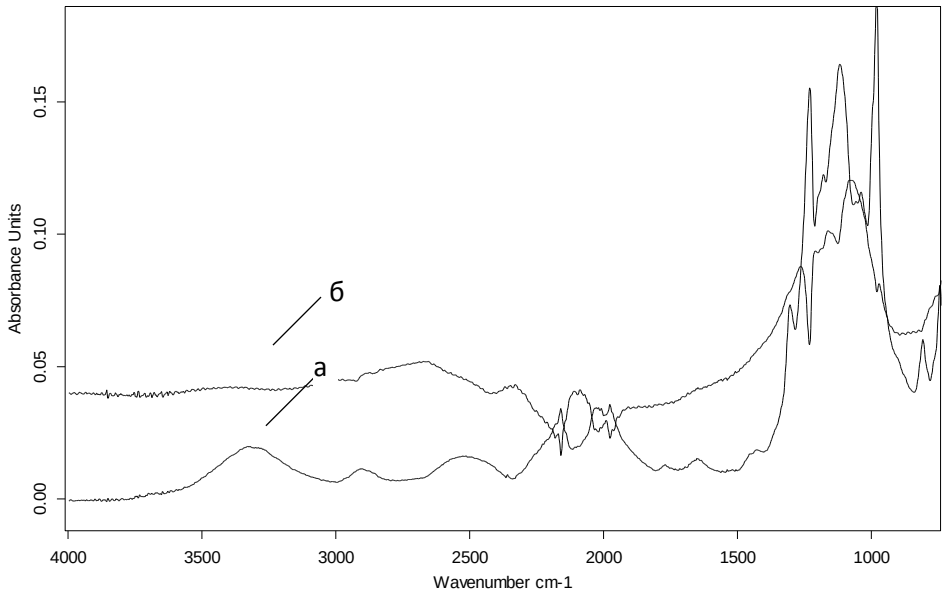
Исследования микротвердости выявили неоднозначный характер ее изменений. Нанесение пленки фолеокса Ф-АК1 на нитрид титана снижает микротвердость до 408 кг/мм² (рисунок 2). Последующая термообработка способствует росту микротвердости благодаря «залечиванию» поверхностных дефектов и кристаллизации олигомера. Резкое падение микротвердости при Т = 523 К, вероятно, связано с рекристаллизационными процессами в стальной подложке, что ведет к снижению прочности и твердости всей системы. Согласно данным [4], формирование алмазоподобных покрытий (a-C:H) на стали сопровождается появлением полос поглощения в области 950–1300 $см^{-1}$ (валентные колебания С-Н групп). Спектры в диапазоне 2200–3000 $см^{-1}$ включают пики карбонильных групп, связей С-С, С=С и деформационных колебаний С-Н. Также фиксируются пики при 2100 и 1000 $см^{-1}$, соответствующие валентным колебаниям С≡С-связей. Авторы [4] отмечают, что спектры МНПВО покрытий, синтезированных из различных углеводородов (октан, толуол, циклогексан), не имеют существенных различий и аналогичны спектрам пленок, полученных из ацетилена. Это позволяет предположить, что ИК-спектры данных покрытий не зависят от природы исходного углеводорода. Дополнительная обработка алмазоподобных пленок фторсодержащим олигомером (фолеокс Ф1) приводит к появлению в спектре композиционных покрытий дополнительных новых полос поглощения (рисунок 3).



1 – нитрид титана + фторопласт; 2 – нитрид титана + Ф-АК1; 3 – нитрид титана; 4 – нитрид титана + Ф-АК2; 5 – нитрид титана + Ф-14

Рисунок 2 – Зависимость микротвердости от температуры термообработки подложек

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-131-137



а) с пленкой ФСО Ф1; б) исходное покрытие

Рисунок 3 – ИК-спектр алмазоподобного покрытия (образец № 1)

В ИК-спектрах фторсодержащих олигомеров (ФСО) марок Ф1 и Ф14 основные полосы поглощения находятся в диапазоне 700–1700 см$^{-1}$. Полоса при 900 см$^{-1}$ обусловлена поглощением CF_3-групп макромолекул [4]. Интенсивные полосы в области 1130–1340 см$^{-1}$ относятся к валентным колебаниям связей C-F и C-F_2 [4]. При нанесении ФСО марки Ф1 на алмазоподобную подложку в спектре появляются дополнительные полосы: при 1050 см$^{-1}$ и 1670 см$^{-1}$, а также широкая полоса в районе 3500 см$^{-1}$, что указывает на наличие карбоксильных групп (COOH). Слабая полоса при 780 см$^{-1}$ соответствует поглощению CF_3-групп, находящихся в аморфных областях полимер-олигомерного покрытия. С увеличением толщины пленки ФСО контрастность спектров МНПВО возрастает. Однако оптическая плотность полос поглощения изменяется нелинейно, что свидетельствует об оптической неоднородности слоев разной толщины. Данный эффект, вероятно, связан с изменением ориентационной упорядоченности макромолекул ФСО по мере роста толщины покрытия.

Согласно данным работы [4], термическая обработка приводит к заметным визуальным изменениям поверхности покрытий фторсодержащих соединений. Алмазоподобная пленка, полученная электролитическим методом, после отжига при 573 К в вакууме меняет цвет со светло-коричневого на темный (почти черный), сохраняя сплошность. Повышение температуры до 873 К усиливает эффект: пленка становится черной с глянцевым блеском. После отжига при 1173 К пленка приобретает прозрачность. Как отмечено в работе [4], в ИК-спектрах исходных алмазоподобных углеродных пленок, синтезированных электролитически, присутствуют две широкие полосы поглощения с максимумами около 1580 см$^{-1}$ и 1350 см$^{-1}$. Термообработка при 573 К не вносит существенных изменений в спектр по сравнению с исходным образцом.

Термообработка исходных алмазоподобных покрытий (АПП) при 393 К приводит к существенным изменениям в их ИК-спектрах, которые различаются в зависимости от типа образца. Для образца 1 характерно исчезновение полос в области 1100–1300 см$^{-1}$ и формирование размытого пика в диапазоне 1000–1400 см$^{-1}$. В спектре образца 2 после аналогичной обработки наблюдается рост интенсивности пика при 800 см$^{-1}$, а также появление дополнительных полос в областях 1400–1600 см$^{-1}$ и 1800–2100 см$^{-1}$. В случае композиционных покрытий (АПП, модифицированные ФСО) термообработка при 393 К вызывает, как правило, исчезновение полос поглощения в диапазонах 750–900 см$^{-1}$ и 1400–1800 см$^{-1}$. Для образца 1, обработанного олигомером Ф1, характерно резкое увеличение интенсивности полос в области 1800–2300 см$^{-1}$. Повышение температуры до 493 К не вносит значимых структурных изменений ни в исходные, ни в модифицированные АПП, что подтверждается данными ИК-спектроскопии НПВО. Наблюдается лишь вырождение малоинтенсивных пиков в размытую полосу 900–1600 см$^{-1}$, фиксировавшуюся уже при 373 К [1, 4].

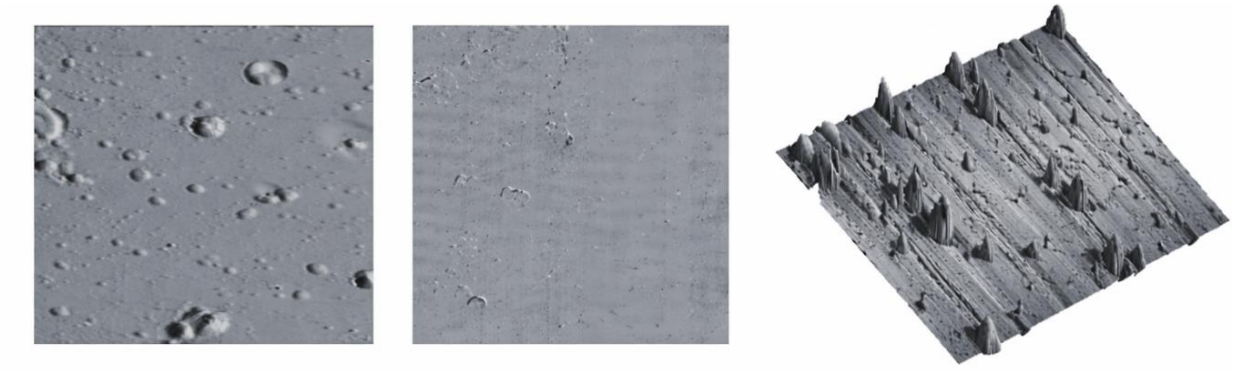
Дальнейший нагрев до 573 К приводит к деструкции фторсодержащих олигомеров на поверхности АПП. Это подтверждается исчезновением полос в области 1000–1800 см$^{-1}$ и появлением узких пиков при 800 см$^{-1}$ (для образца 2) и 1000 см$^{-1}$ (для образца 1). Дальнейшие исследования при данной температуре были признаны нецелесообразными, так как после часовой выдержки при 573 К зафиксировано снижение адгезии и практически полное отслаивание покрытий от стальной подложки.

Структурные изменения, обусловленные нагревом, коррелируют с изменением морфологии тонкослойных АПП. Данные оптической микроскопии (в отраженном и поляризованном свете) показывают, что исходная морфология покрытий представляет собой совокупность мелкодисперсных частиц. Латеральный размер частиц составляет 1–3 мкм для образца 1 и 4–8 мкм для образца 2 (рисунки 4, 5). В структуре образца 2 также присутствуют кристаллические образования глобулярной формы размером 10–15 мкм (рисунок 5).

Термообработка приводит к уменьшению дисперсности частиц в 1,2–1,8 раза для обоих типов покрытий. При повышении температуры до 493 К наблюдается укрупнение частиц на фоне существенного сокращения их поверхностной плотности.

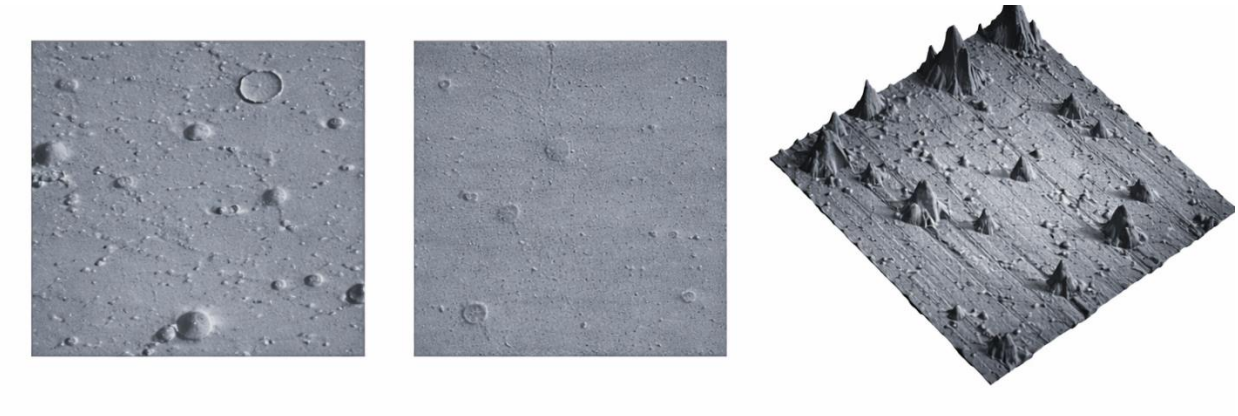
Изменения в структуре и морфологии алмазоподобных покрытий, а также композиций на их основе, неизбежно влекут за собой изменение их поверхностной энергии и физико-механических характеристик [4, 11–20]. В ходе исследований по определению поверхностной энергии термообработанных алмазоподобных покрытий (рисунок 6) было установлено, что повышение температуры отжига способствует росту значений поверхностной энергии. Зафиксированное изменение энергетических параметров служит подтверждением структурных преобразований в материале покрытия под воздействием температуры. Однако нагрев выше 573 К приводит к резкому падению значений поверхностной энергии, что обусловлено началом деструкции алмазоподобного покрытия. Модифицирование поверхности алмазоподобных пленок фторсодержащими олигомерами, напротив, снижает показатель поверхностной энергии (рисунок 6). Это указывает на увеличение адгезионного взаимодействия на границе раздела покрытие ФСО-алмазоподобное покрытие. Последующая термообработка такого композита, как и в случае с исходной (необработанной) подложкой, инициирует рост поверхностной энергии. При этом деструкция фторсодержащего олигомера в процессе нагрева приводит к тому, что значения поверхностной энергии возвращаются к уровню, характерному для исходной алмазоподобной подложки.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-131-137



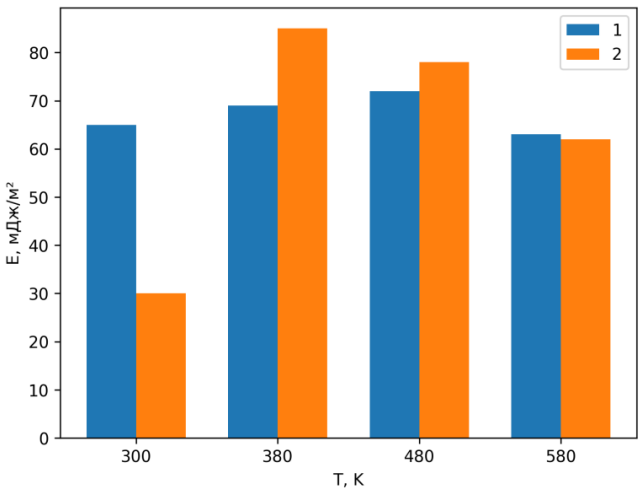
а) б) в)

а) топография; б) фазовый контраст; г) 3D-изображение, площадь сканирования 10 × 10 мкм
Рисунок 4 – Алмазоподобное покрытие на стальной подложке (образец № 1)

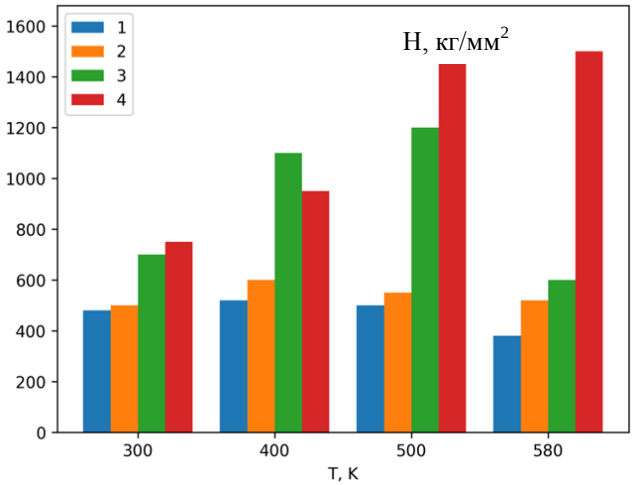


а) б) в)

а) топография; б) фазовый контраст; г) 3D-изображение, площадь сканирования 25 × 25 мкм
Рисунок 5 – Алмазоподобное покрытие на стальной подложке (образец № 2)



1 – исходная; 2 – обработанные ФСО Ф1
Рисунок 6 – Значения поверхностной энергии для алмазоподобного покрытия в зависимости от различных режимов термической обработки



1, 3 – исходные; 2, 4 – модифицированные фторсодержащим олигомером Ф1; 1, 2 – образец № 1; 3, 4 – образец № 2
Рисунок 7 – Значения микротвердости (кг/мм^2) алмазоподобных покрытий

Термическая обработка приводит к изменению доли дисперсной фазы в алмазоподобных покрытиях. Показано, что воздействие температуры по-разному сказывается на содержании углерода с sp^2-гибридизацией, причем на характер этих изменений оказывает существенное влияние при каких технологических режимах формировалось алмазоподобное покрытие (рисунок 7).

Нанесение фторсодержащих олигомеров на поверхность нанокомпозиционных АПП покрытий с последующей термообработкой также сопровождается перераспределением указанных структурных составляющих. Отмеченные структурные, морфологические и энергетические преобразования в алмазоподобных покрытиях закономерно отражаются на их механических свойствах [15–21]. Это подтверждается результатами измерений микротвердости, представленными на рисунке 7.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-131-137

Заключение

В работе показана возможность формирования наноструктурированных композиционных покрытий путем комбинирования твердых износостойких слоев (нитрид титана, алмазоподобный углерод) и фторсодержащих олигомеров (ФСО), наносимых растворным методом. Установлено, что применение растворимых соединений ФСО является эффективным способом модификации поверхности, не требующим сложного оборудования. Методами атомно-силовой микроскопии и профилометрии показано, что морфология композиционных покрытий на основе нитрида титана критически зависит от температуры последующей термообработки. Оптимальное сглаживание рельефа (уменьшение параметра R_a со 155,9 до 62,7 нм) и формирование однородной структуры достигаются при температуре 373 К. Повышение температуры до 473 К инициирует кристаллизационные процессы, приводящие к образованию упорядоченных структур, тогда как нагрев до 523 К вызывает частичную десорбцию пленки ФСО. Методом ИК-спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО) идентифицирован химический состав алмазоподобных покрытий (a-C:H) и композиций на их основе. Подтверждено наличие связей C–H, C–C, C=C, а при модификации ФСО – характерных полос поглощения CF_3-, CF- и CF_2-групп. Обнаружена оптическая неоднородность слоев ФСО различной толщины, что свидетельствует об изменении ориентации макромолекул в пленке. Установлено, что алмазоподобные покрытия, синтезированные импульсным катодно-дуговым методом, характеризуются глобулярной структурой с размерами частиц от 1 до 15 мкм. Выявлена корреляция между дисперсностью структуры и прочностными характеристиками: покрытия с более крупными глобулами (образец № 2) обладают повышенной микротвердостью. Определены термические границы стабильности исследуемых покрытий. Нагрев до 573 К является критическим: происходит деструкция фторсодержащего слоя, а также резкое снижение адгезии и отслаивание алмазоподобных покрытий от стальной подложки вследствие рекристаллизационных процессов в стали. Показано, что модификация поверхности фторсодержащими олигомерами приводит к закономерному снижению поверхностной энергии покрытий (усилению гидрофобных свойств), что перспективно для создания антифрикционных и антиадгезионных слоев. Термообработка композиционных покрытий позволяет регулировать их физико-механические характеристики, в частности, микротвердость, в широких пределах.

Список цитированных источников

1. Овчинников, Е. В. Тонкие пленки фторсодержащих олигомеров: основы синтеза, свойства и применение / Е. В. Овчинников, В. А. Струк, В. А. Губанов. – Гродно : ГГАУ, 2007. – 326 с.
2. Gleiter, H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. / H. Gleiter // Acta mater, 2000. − Vol. 48. − P. 1–29.
3. Fluorine-Containing Nanocomposite Materials Based on Vulcanized Rubber / V. D. Polonik, A. V. Struk, D. A. Prushak [et al.] // Mechanica-2010: Proceedings of 15th International Conference, Kaunas, Lithuania, 8, 9 April 2010 / Kaunas University of Technology ; edit. B. Bakšys [et al.]. – Kaunas, 2010. – P. 356–361.
4. Нанокомпозиционные вакуумные покрытия : коллективная монография / Е. В. Овчинников, Н. М. Чекан, И. П. Акула [и др.] ; Гродненский государственный университет имени Янки Купалы. – Гродно : ГрГУ им. Янки Купалы, 2024. – 187 с.
5. Andrievsky, R. A. Size effects in nanocrystalline materials. Part 1 / R. A. Andrievsky, A. M. Glezer // Physics of Metals and Metal Science. – 2000. − Vol. 88, Iss. 1. − P. 50.
6. Овчинников, Е. В. Триботехнические характеристики резинотехнических изделий, модифицированных фторсодержащими олигомерами / Е. В. Овчинников // Трение и износ. – 2004. – Т. 25, № 5. – С. 542–547.
7. Триботехнические характеристики композиционных многослойных покрытий / Е. В. Овчинников, С. Д. Лещик, В. А. Струк [и др.] // Трение и износ. – 2000. – Т. 21, № 2. – С. 147–155.
8. Struk, W. Besondeiheitender Struktur verschleiβfester schichten fluorhailtiger oligomere an metallen und polymeren / W. Struk, E. Owtchinnikow, O. Choladilov // Tribology – solving friction and wear problems: Proceedings of 10th International Colloqium, Esslingen, 09–10 jan. 1996 / Techische akademie Esslingen ; editor: W. J. Bartz – Esslingen, 1996. – Vol. 3 – P. 1983–1988.
9. Structure and tribotechnical properties of the thin films of fluorine containing oligomers / V. A. Struk, E. V. Ovchinnikov, V. A. Gubanov, P. E. Trojchanskaya // Tribological problems in exposed friction systems (Intertribo'96) : Proseedings of VIth international symposium, The High Tatras, 23–26 April 1996. / Hotel Academia; editor: P. Blaskovic. – Bratislava, 1996. – P. 307–310.
10. Lubricating Properties of Thin Film Coatings on the Basis of Fluorine Oligomers / V. A. Struk, E. V. Ovchinnikov, O. V. Cholodilov, U. S. Boiko // Industrial and automotive lubrication : Proceedings of 11th International Colloquium, Esslingen, 13–15 jan. 1998 / Techische Akademie Esslingen ; editor: W. J. Bartz. – Esslingen, 1998. – Vol. 2. – P.1059–1064.
11. Investigation of tribological behaviour of a-C:H coatings for dry deep drawing of aluminium alloys / R. Zhao, J. Steiner, K. Andreas [et al.] // Tribology International. – 2017. – Vol. 118. – P. 484–490.
12. Banerji, A. High temperature tribological behavior of W containing diamond-like carbon (DLC) coating against titanium alloys / A. Banerji, S. Bhowmick, A. T. Alpas // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 241. – P. 93–104.
13. Li, Z. Comparative study on the load carrying capacities of DLC, GLC and CrN coatings under sliding-friction condition in different environments / Z. Li // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 321. – P. 350–357.
14. Tribological behavior of diamond-like carbon thin films deposited by the pulse laser technique at different substrate temperatures / N. Salah, A. Alshahrie, J. Iqbal [et al.] // Tribology International. – 2016. – Vol. 103. – P. 274–280.
15. Tribological properties of nanostructured DLC coatings deposited by C60 ion beam / O. V. Penkov, V. E. Pukha, E. N. Zubarev, S. S. Yoo // Tribology International. – 2013. – Vol. 60. – P. 127–135.
16. Karslioglu, R. Comparison microstructure and sliding wear properties of nickel-cobalt/CNT composite coatings by DC, PC and PRC current electrodeposition / R. Karslioglu, H. Akbulut // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 353. – P. 615–627.
17. High throughput deposition of hydrogenated amorphous carbon coatings on rubber with expanding thermal plasma / Y. T. Pei, A. R. Eivani, T. Zaharia [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 245. – P. 74–83.
18. Madej M. The effect of TiN and CrN interlayers on the tribological behavior of DLC coatings / M. Madej // Wear. – 2014. – Vol. 317. – P. 179–187.
19. Toriz, F. C. Flight Service Evaluation of Thermal Barrier Coatings by Physical Vapor Deposition at 5200 H. / F. C. Toriz, A. B. Thakker, S. K. Gupta // Surface and Coatings Technology. – 1989. – Vol. 39–40. – P. 161–172.
20. Assessment of a multifunctional tribological coating (nitride+DLC) deposited on grey cast iron in a mixed lubrication regime / D. B. Salvaro, R. O. Giacomelli, R. Binder [et al.] // Wear. – 2017. – Vol. 376–377. – P. 803–812.
21. Электроискровые фторсодержащие покрытия / Е. В. Овчинников, А. Ч. Свистун, А. И. Веремейчик [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2025. – № 2 (137). – С. 68–72.

References

1. Ovchinnikov, E. V. Tonkie plenki ftorsoderzhashchih oligomerov: osnovy sinteza, svojstva i primenenie / E. V. Ovchinnikov, V. A. Struk, V. A. Gubanov. – Grodno : GGAU, 2007. – 326 s.
2. Gleiter, H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. / H. Gleiter // Acta mater, 2000. − Vol. 48. − P. 1–29.
3. Fluorine-Containing Nanocomposite Materials Based on Vulcanized Rubber / V. D. Polonik, A. V. Struk, D. A. Prushak [et al.] // Mechanica-2010: Proceedings of 15th International Conference, Kaunas, Lithuania, 8, 9 April 2010 / Kaunas University of Technology ; edit. B. Bakšys [et al.]. – Kaunas, 2010. – P. 356–361.
4. Nanokompozicionnye vakuumnye pokrytiya : kollektivnaya monografiya / E. V. Ovchinnikov, N. M. CHekan, I. P. Akula [i dr.] ; Grodnenskij gosudarstvennyj universitet imeni YAnki Kupaly. – Grodno : GrGU im. YAnki Kupaly, 2024. – 187 s.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-131-137

5. Andrievsky, R. A. Size effects in nanocrystalline materials. Part 1 / R. A. Andrievsky, A. M. Glezer // Physics of Metals and Metal Science. – 2000. − Vol. 88, Iss. 1. − P. 50.
6. Ovchinnikov, E. V. Tribotekhnicheskie harakteristiki rezino-tekhnicheskih izdelij, modificirovannyh ftorsoderzhashchimi oligomerami / E. V. Ovchinnikov // Trenie i iznos. – 2004. – T. 25, № 5. – C. 542–547.
7. Tribotekhnicheskie harakteristiki kompozicionnyh mnogoslojnyh pokrytij / E. V. Ovchinnikov, S. D. Leshchik, V. A. Struk [i dr.] // Trenie i iznos. – 2000. – T. 21, № 2. – C. 147–155.
8. Struk, W. Besondeiheitender Struktur verschleiβfester schichten fluorhailtiger oligomere an metallen und polymeren / W. Struk, E. Owtchinnikow, O. Choladilov // Tribology – solving friction and wear problems: Proceedings of 10th International Colloqium, Esslingen, 09–10 jan. 1996 / Techische akademie Esslingen ; editor: W. J. Bartz – Esslingen, 1996. – Vol. 3 – P. 1983–1988.
9. Structure and tribotechnical properties of the thin films of fluorine containing oligomers / V. A. Struk, E. V. Ovchinnikov, V. A. Gubanov, P. E. Trojshanskaya // Tribological problems in exposed friction systems (Intertribo'96) : Proseedings of VIth international symposium, The High Tatras, 23–26 April 1996. / Hotel Academia; editor: P. Blaskovic. – Bratislava, 1996. – P. 307–310.
10. Lubricating Properties of Thin Film Coatings on the Basis of Fluorine Oligomers / V. A. Struk, E. V. Ovchinnikov, O. V. Cholodilov, U. S. Boiko // Industrial and automotive lubrication : Proceedings of 11th International Colloquium, Esslingen, 13–15 jan. 1998 / Techische Akademie Esslingen ; editor: W. J. Bartz. – Esslingen, 1998. – Vol. 2. – P.1059–1064.
11. Investigation of tribological behaviour of a-C:H coatings for dry deep drawing of aluminium alloys / R. Zhao, J. Steiner, K. Andreas [et al.] // Tribology International. – 2017. – Vol. 118. – P. 484–490.
12. Banerji, A. High temperature tribological behavior of W containing diamond-like carbon (DLC) coating against titanium alloys / A. Banerji, S. Bhowmick, A. T. Alpas // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 241. – P. 93–104.
13. Li, Z. Comparative study on the load carrying capacities of DLC, GLC and CrN coatings under sliding-friction condition in different environments / Z. Li // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 321. – P. 350–357.
14. Tribological behavior of diamond-like carbon thin films deposited by the pulse laser technique at different substrate temperatures / N. Salah, A. Alshahrie, J. Iqbal [et al.] // Tribology International. – 2016. – Vol. 103. – P. 274–280.
15. Tribological properties of nanostructured DLC coatings deposited by C60 ion beam / O. V. Penkov, V. E. Pukha, E. N. Zubarev, S. S. Yoo // Tribology International. – 2013. – Vol. 60. – P. 127–135.
16. Karslioglu, R. Comparison microstructure and sliding wear properties of nickel-cobalt/CNT composite coatings by DC, PC and PRC current electrodeposition / R. Karslioglu, H. Akbulut // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 353. – P. 615–627.
17. High throughput deposition of hydrogenated amorphous carbon coatings on rubber with expanding thermal plasma / Y. T. Pei, A. R. Eivani, T. Zaharia [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 245. – P. 74–83.
18. Madej M. The effect of TiN and CrN interlayers on the tribological behavior of DLC coatings / M. Madej // Wear. – 2014. – Vol. 317. – P. 179–187.
19. Toriz, F. C. Flight Service Evaluation of Thermal Barrier Coatings by Physical Vapor Deposition at 5200 H. / F. C. Toriz, A. B. Thakker, S. K. Gupta // Surface and Coatings Technology. – 1989. – Vol. 39–40. – P. 161–172.
20. Assessment of a multifunctional tribological coating (nitride+DLC) deposited on grey cast iron in a mixed lubrication regime / D. B. Salvaro, R. O. Giacomelli, R. Binder [et al.] // Wear. – 2017. – Vol. 376–377. – P. 803–812.
21. Elektroiskrovye ftorsoderzhashchie pokrytiya / E. V. Ovchinnikov, A. CH. Svistun, A. I. Veremejchik [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2025. – № 2 (137). – S. 68–72.

Материал поступил 03.03.2026, одобрен 16.03.2026, принят к публикации 17.03.2026

УДК 004.72

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ АППАРАТНОЙ И ПРОГРАММНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ: ОТ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АППАРАТНЫХ ПЛАТФОРМ К ПРОГРАММНО-КОМПОЗИРУЕМЫМ СРЕДАМ

Ю. В. Савицкий[1], Г. Л. Муравьев[2]

[1] К. т. н., доцент, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: yury.savitsky@tut.by

[2] К. т. н., доцент, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: mgl_work@mail.ru

Реферат

В настоящее время современные компьютерные сети претерпевает фундаментальную реорганизацию, определяемую требованиями облачных вычислений (Cloud Computing), интернета вещей (IoT, Internet of Things), больших данных (Big Data) и необходимости чрезвычайно высокой гибкости и адаптивности. Данная статья посвящена исследованию и всестороннему анализу методов и средств аппаратной и программной организации сетей, переживающих эпоху глубокой декомпозиции и конвергенции. В работе исследуется эволюция аппаратных платформ от закрытых, специализированных интегральных схем (ASIC) вендор-специфичного оборудования (функционирующего оптимально только в рамках собственной экосистемы производителя – вендора) к открытым, программируемым архитектурам, сетевым процессорам (SmartNIC) и процессорам для обработки данных (DPU), что стирает границу между сетевым и вычислительным узлом. Также анализируется трансформация сетевого ПО: от монолитных операционных систем (являющихся частной собственностью разработчика, имеющих закрытый исходный код, а также ограничения на использование, модификацию и распространение) к парадигмам программно-определяемых сетей (SDN) и виртуализации сетевых функций (NFV).

В статье систематизированы современные средства организации сетей, включая языки программирования плоскостей данных (data plane programming languages), такие как P4. Основной вывод исследования заключается в том, что современная организация сети характеризуется переходом от жестко связанных, вертикально интегрированных аппаратно-программных архитектур к горизонтальным, программно-композируемым и децентрализованным моделям. В таких моделях сетевые сервисы и функции динамически развертываются на множестве гетерогенных вычислительных ресурсов под управлением интеллектуальных контроллеров и оркестраторов (централизованных инструментов, автоматизирующих управление, координацию, развертывание и масштабирование распределенных контейнерных приложений). Предлагаются перспективные направления будущих исследований, включая интеграционные платформы и средства комплексной организации сетей, в частности гиперконвергентные инфраструктуры; облачные нативные сетевые плагины для контейнерных оркестраторов; облачные сетевые сервисы.

Ключевые слова: аппаратная организация сетей, программная организация сетей, SDN, NFV, P4, SmartNIC, DPU, гиперконвергентная инфраструктура (HCI), IBN, декомпозиция, облачные нативные сети, оркестратор.

KEY TRENDS IN THE HARDWARE AND SOFTWARE ORGANIZATION OF MODERN COMPUTER NETWORKS: FROM SPECIALIZED HARDWARE PLATFORMS TO SOFTWARE-COMPOSABLE ENVIRONMENTS

Y. V. Savitsky, G. L. Muravyov

Abstract

Modern computer networks are currently undergoing a fundamental reorganization driven by the demands of cloud computing, the Internet of Things (IoT), big data, and the need for extreme flexibility and adaptability. This article explores and comprehensively analyzes the methods and tools for hardware and software network organization in an era of deep decomposition and convergence. The paper examines the evolution of hardware platforms from closed, application-specific integrated circuits (ASICs) of vendor-specific hardware (operating optimally only within the manufacturer's ecosystem) to open, programmable architectures, network processors (SmartNICs), and data processing units (DPUs), blurring the line between network and computing nodes. The paper also analyzes the transformation of network software: from monolithic operating systems (proprietary, closed-source, and subject to restrictions on use, modification, and distribution) to software-defined networking (SDN) and network functions virtualization (NFV) paradigms.

The paper systematizes modern networking tools, including data-plane programming languages such as P4. The main conclusion of the study is that modern networking is characterized by a transition from tightly coupled, vertically integrated hardware-software architectures to horizontal, software-composable, and decentralized models. In such models, network services and functions are dynamically deployed across multiple heterogeneous computing resources under the control of intelligent controllers and orchestrators (centralized tools that automate the management, coordination, deployment, and scaling of distributed containerized applications). Promising areas for future research are proposed, including integration platforms and tools for complex networking, in particular hyperconverged infrastructures; Cloud-native networking plugins for container orchestrators; cloud networking services.

Keywords: hardware networking, software networking, SDN, NFV, P4, SmartNIC, DPU, hyperconverged infrastructure (HCI), IBN, decomposition, cloud native networks, orchestrator.

Введение

Компьютерные сети прошли эволюцию от простых коммуникационных сред в критические, активные и интеллектуальные платформы, которые формируют основу цифровой трансформации практически всех сфер деятельности. Однако исторически сложившаяся архитектура сетей, основанная на специализированных аппаратных устройствах, управляемых проприетарным программным обеспечением (защищенным авторским правом, являющимся частной собственностью разработчика, имеющим закрытый исходный код и строгие ограничения на использование, модификацию и распространение) с распределенной логикой, перестала удовлетворять динамичным требованиям современного общества. Запросы на быстрое масштабирование, высокую степень автоматизации, снижение эксплуатационных расходов и реализация новых сетевых услуг вступили в противоречие с инерционной, сложной в управлении и дорогой традиционной инфраструктурой.

Данная работа направлена на комплексное исследование методов и средств аппаратной и программной организации современных сетей, которые находятся в состоянии активной трансформации. Актуальность темы обусловлена переходом от статичных, аппаратно-центричных моделей к динамичным, программно-управляемым средам, что требует переосмысления как принципов построения, так и инструментария проектировщиков и администраторов сетей.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-138-144

Объектом исследования являются современные компьютерные сети, рассматриваемые через призму их аппаратно-программной организации.

Предмет исследования – эволюционные и революционные методы, модели, архитектуры и инструментальные средства, определяющие аппаратную реализацию и программное управление сетевыми инфраструктурами.

Цель исследования – системный анализ и классификация современных подходов к аппаратно-программной организации сетей, выявление ключевых трендов и определение перспектив их развития.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие *задачи*:

– выполнить анализ эволюции аппаратных платформ сетевых устройств от специализированных решений к открытым и программируемым;

– выполнить анализ трансформации программного стека управления сетями от распределенных CLI-интерфейсов к централизованным контроллерам и декларативным моделям;

– исследовать ключевые интеграционные парадигмы: SDN, NFV, IBN;

– систематизировать инструментальные средства и методологии, такие как IaC и P4, формирующие практики современной сетевой инженерии;

– сформулировать основные тенденции и перспективы развития аппаратно-программной организации сетей.

1 Эволюция аппаратной организации компьютерных сетей: путь к гибкости и открытости

Этап аппаратной организации на базе специализированных интегральных схем (ASIC) и вертикальной интеграции

Более двух десятилетий производительность в ядре сети определялась специализированными интегральными схемами (ASIC). Эти интегральные схемы (СБИС, VLSI), оптимизированные для сверхбыстрой коммутации и маршрутизации пакетов по фиксированным алгоритмам, создавали высокий технологический барьер. Аппаратные платформы ведущих производителей (Cisco, Juniper) представляли собой Black Boxes (закрытые «черные ящики»), где аппаратная часть, системная шина и программная прошивка были тесно интегрированы в единую систему сетевой обработки [1–4].

Этап применения программируемых устройств NPU, FPGA

Для оборудования, требующего большей адаптивности (уровень доступа, агрегации), стали применяться сетевые процессоры (NPU) и программируемые пользователем вентильные матрицы (FPGA) [5, 6]. NPU представляли собой микропроцессоры с набором специализированных инструкций для обработки пакетов, что позволяло пользователю обновлять микрокод. FPGA давали еще большую свободу, позволяя перепрограммировать саму аппаратную логику. Исследованные данные по архитектуре, принципу обработки, производительности, гибкости и стоимости вышеуказанных устройств сетевой обработки сведены в таблицу 1 и таблицу 2.

Таблица 1 – Сравнительные данные по архитектуре и принципу обработки устройств ASIC, NPU, FGPA

Характеристика	ASIC	NPU	FPGA
Архитектура	Жестко зашитая логика. Конвейер предопределен производителем	Многоядерная, многопоточная (PIC-микроядро). SIMD. Гибкий RISC-подобный набор инструкций для пакетов	Матрица программируемых логических вентилей и блоков памяти
Единица обработки	Поток битов через фиксированный конвейер	Микропрограммы (Micro-engines / Threads)	Логическая схема под конкретный алгоритм
Программирование	Отсутствует (ASIC), или прошивка микрокода (микрокод, закрытый от конечного пользователя)	C/C++, микрокод, P4. Загрузка бинарного кода в ядра	HDL (Verilog/VHDL), HLS

Таблица 2 – Производительность, гибкость и стоимость устройств ASIC, NPU, FGPA

Критерий	ASIC	NPU	FPGA
Скорость (Tbps)	**Наивысшая** (12,8–51,2 Тбит/с). Сквозная задержка фиксирована (<1 мкс)	**Высокая** (до нескольких Тбит/с). Зависит от сложности кода. Может быть выше, чем FPGA	**Средняя/Высокая.** Упирается в рабочую частоту схемы (<500 МГц)
Гибкость / Адаптация	**Нулевая**. Новый стандарт предполагает разработку нового чипа (2–3 года)	**Очень высокая**. Полная перепрограммирумость логики обработки	**Максимальная**. Изменение на уровне вентилей. Полная ориентация на конечного пользователя
Энергоэффективность	**Абсолютный лидер**. Нет накладных расходов на декодирование инструкций	**Хорошая,** но ниже ASIC. Декодирование инструкций требует энергии	**Ниже NPU.** Программируемые соединения значительно потребляют энергию
Стоимость единицы оборудования (при соответствующем объеме)	**Низкая** (миллионы штук). NRE распределен	**Высокая** (сложная многоядерная структура)	**Высокая** (малая серия, большой кристалл)

Анализ данных таблицы 1 и таблицы 2 демонстрирует наилучшие показатели производительности, энергоэффективности и стоимости устройств ASIC, однако они по степени адаптивности безнадежно проигрывают сетевым устройствам NPU и FPGA, оставляя за последними перспективы развития.

Программируемый конвейер обработки пакетов: язык P4 и архитектура PISA

Прорывной технологией стал язык программирования плоскостей данных *P4 (Programming Protocol-independent Packet Processors)* и соответствующая архитектура *PISA (Protocol-Independent Switch Architecture)* [7]. В отличие от программирования NPU, P4 описывает *что* должна делать плоскость данных (обработка заголовков, меток, модификации), а не *какой* должна быть реализация. Компилятор P4 транслирует программу в конфигурацию для целевой платформы (ASIC, FPGA, программный коммутатор). VLSI Intel Tofino являются первыми массовыми ASIC, полностью программируемыми на P4. Это позволяет:

– определять новые протоколы и форматы заголовков;

– реализовывать сложные, специфичные для приложений политики, например, балансировка нагрузки 5-го уровня (согласно модели OSI, работает балансировка нагрузки 5-го уровня на сеансовом уровне, обеспечивая управление диалогом, контроль сеансов и восстановление соединения для поддержки устойчивых подключений между клиентом и сервером);

– создавать высоко адаптивные перепрограммируемые ASIC, функциональность которых может меняться программно в течение жизненного цикла устройства.

Полная конвергенция: применение интеллектуальных сетевых карт (SmartNIC) и процессоров данных (DPU)

Крайней формой декомпозиции является перенос сетевых функций непосредственно на серверную платформу. *Смарт-сетевые карты (SmartNIC)* и технологически более совершенные *процессоры для обработки данных (Data Processing Unit, DPU)* представляют собой мощные многоядерные системы на кристалле (практически всегда базирующиеся на архитектуре ARM – Advanced RISC Machine – семействе микропроцессорных ядер, основанных на RISC-принципах, отличающихся высокой производительностью) со своей памятью, установленные на PCIe-карте.

Проведенный детальный анализ данных устройств позволил сформулировать базовые характеристики данного семейства, сведенные в таблицу 3.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-138-144

Таблица 3 – базовые характеристики семейства Smart NIC, DPU

Параметр	SmartNIC (Интеллектуальная сетевая карта)	DPU (Процессор данных)
Основная идея	Сетевая карта, которая берет на себя задачи обработки сетевого трафика, чтобы разгрузить CPU сервера	Программируемый специализированный чип (система на кристалле, SoC), предназначенный для обработки данных в центре обработки данных (ЦОД). Является **третьим основным вычислительным элементом** (наравне с CPU и GPU)
Основная цель	**Ускорение сети и разгрузка CPU.** Освобождение процессора от рутинных операций с сетевыми пакетами (например, вычисление контрольных сумм, инкапсуляция туннелей VXLAN)	**Инфраструктурная разгрузка (Infrastructure offload).** Перенос с CPU всего стека "инфраструктурных" задач (сеть, хранилище, безопасность) в выделенное аппаратное обеспечение для создания изолированной и безопасной "облачной" среды
Архитектура / Состав	1. **FPGA** (программируемая логика) или **ASIC** для быстрой обработки пакетов. 2. Несколько ядер ARM (для управления)	Сложная **SoC** (Система-на-чипе), включающая: 1. Многоядерный **CPU** (как правило, ARM) для управления. 2. Мощный **ASIC** для обработки данных. 3. **Высокоскоростные интерфейсы** памяти и PCIe
Программируемость	Ограниченная. Часто программируется на низком уровне (P4, C/C++ для FPGA) или использует фиксированные функции	Высокая. Поддерживает стандартные языки (C, C++), фреймворки (DOCA от NVIDIA) и запуск полноценных ОС (Linux) непосредственно на DPU
Основные задачи	– разгрузка сетевого стека (TCP/UDP) – обработка туннелей (VXLAN, Geneve) – отбрасывание DDoS-атак на ранних стадиях	**Полная виртуализация сети и хранилища** – шифрование данных на лету (IPsec, TLS); – изоляция "шумных соседей" в облаке; – управление жизненным циклом сервера (из удаленного центра); – запуск ПО для безопасности (Next-Gen Firewall)
Управление и контроль	Управляется драйверами с **хост-сервера** (CPU). Является периферийным устройством	Управляет хост-сервером. Имеет собственную операционную систему и IP-адрес вне зависимости от основного сервера. Может перезагружать, переустанавливать ОС на сервере или полностью его обесточить
Безопасность	Аппаратная изоляция сетевых функций	**Аппаратный корень доверия (Root of Trust).** Обеспечивает полную изоляцию инфраструктуры (гипервизора, сети хранения) от тенанта (виртуальной машины пользователя), что невозможно на обычном CPU
Область применения	Высоконагруженные веб-серверы, телекоммуникационное оборудование (vRAN), сетевые экраны начального уровня	Крупные публичные облака (AWS, Azure, GCP), частные облака корпоративного уровня (VMware vSphere 8+), HPC (высокопроизводительные вычисления), финансовый сектор (алготрейдинг)

Они выполняют следующие задачи виртуализации и обработки сетевого трафика с аппаратным ускорением:

– выполнение функций виртуального коммутатора (Open vSwitch) и маршрутизатора;

– обеспечение политик безопасности (брандмауэринг, шифрование);

– оркестрация ускоренного доступа к хранилищам (NVMe over Fabrics).

2 Трансформация программного стека управления: централизация, декларативность и автоматизация

Виртуализация сетевых функций (NFV): переход от аппаратных устройств к программным образам

Парадигма NFV декомпозирует не плоскость управления, а сами сетевые функции (firewall, load balancer, WAN accelerator), перенося их с проприетарного аппаратного уровня на стандартные серверы в виде виртуальных машин (VNF) или контейнеров (CNF) [8–10]. Архитектура ETSI NFV определяет ключевые программные компоненты (рисунок 1):

– *менеджер виртуализированных инфраструктур (VIM):* OpenStack, VMware vSphere – управляет физическими ресурсами;

– *оркестратор NFV (NFVO):* Open Source MANO (OSM), платформы вендоров – отвечает за жизненный цикл VNF/CNF (развертывание, масштабирование, обновление).

Таким образом, NFV превращает сеть в набор программных сервисов, которые можно быстро инсталлировать, масштабировать и размещать оптимальным образом.

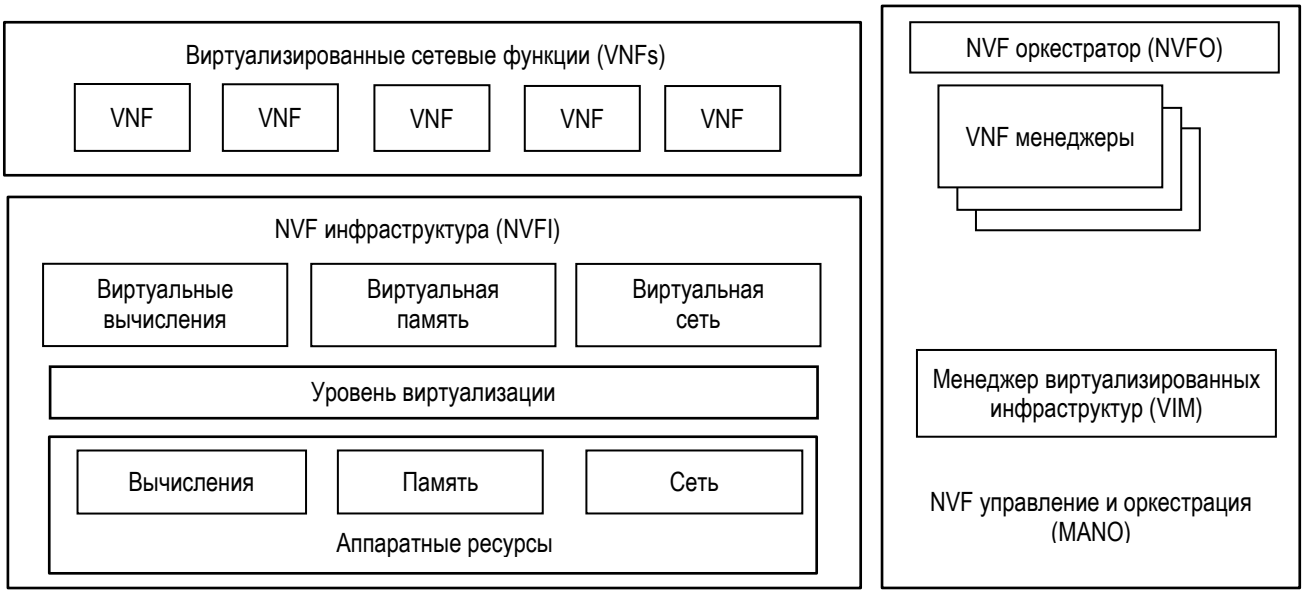


Рисунок 1 – Виртуализация сетевых функций (NFV)

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-138-144

Программно-определяемые сети (SDN)

SDN представляет собой архитектурный подход, отделяющий уровень управления сетью (уровень логики) от уровня передачи данных (аппаратных коммутаторов) [11–13]. Централизованный программный контроллер динамически управляет трафиком, обеспечивая автоматизацию, гибкость, масштабируемость и улучшенную безопасность, заменяя традиционную настройку каждого устройства по отдельности (рисунок 2).

Результаты анализа технологии SDN совместно с технологией NVF приведен в таблице 4.

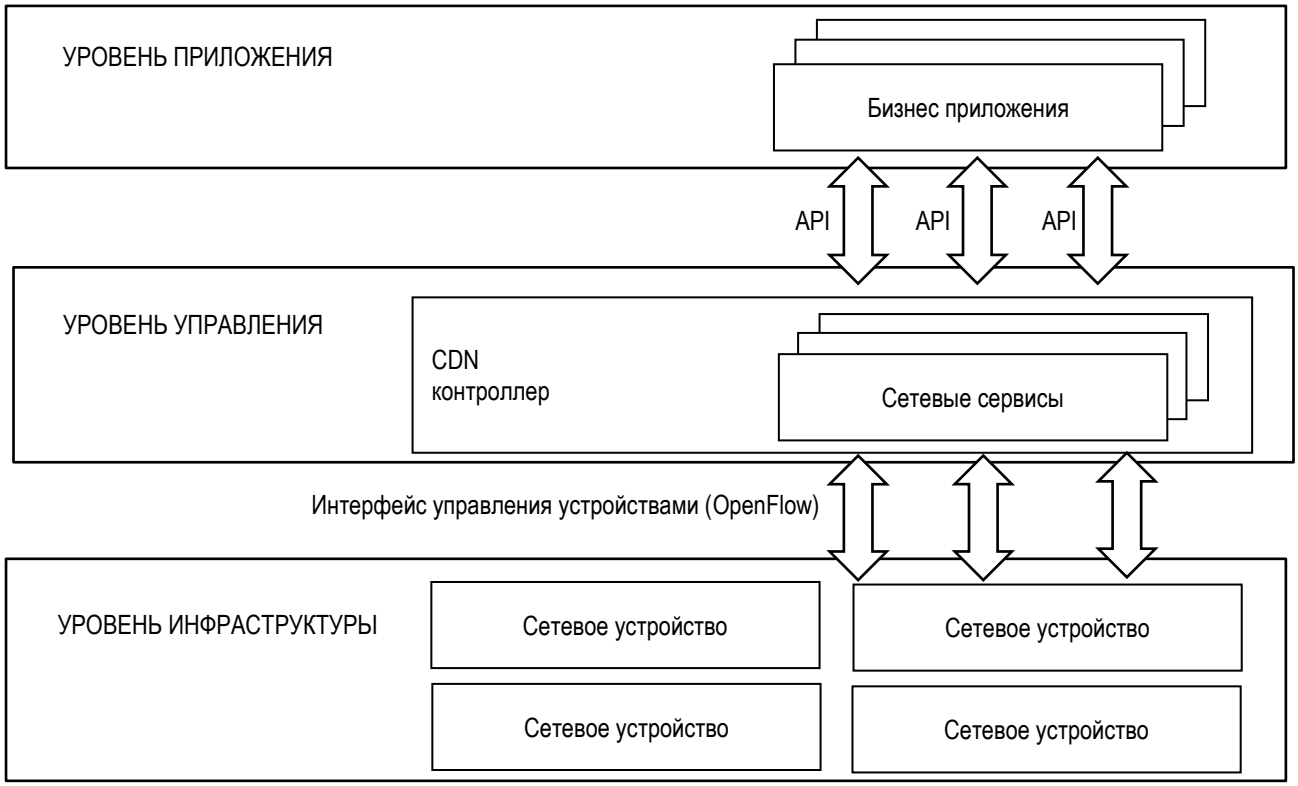


Рисунок 2 – Технология программно-определяемых сетей SDN

Таблица 4 – Концептуальное сравнение технологий SDN и NVF

Критерий сравнения	SDN (Программно-определяемая сеть)	NFV (Виртуализация сетевых функций)
Основная цель	Централизованное управление трафиком, отделение управления от пересылки. ***Централизация управления***. Управление сетью осуществляется через единый контроллер, который видит всю сеть целиком	Замена аппаратных устройств (брендмауэров, маршрутизаторов) программным обеспечением на стандартных серверах. Заставить сеть функционировать дешевле и гибче
Область фокуса (Scope)	Контроль и управление потоками трафика (2–3 уровень модели OSI – инфраструктура)	Виртуализация конкретных сервисов (4–7 уровень модели OSI – приложения/функции)
Архитектура	Разделение Control Plane и Data Plane. Централизованный контроллер – *разделение плоскостей (Plane Separation)*. Уровень управления (Control Plane) отделен от уровня пересылки данных (Data Plane)	Совокупность VNF (Virtual Network Functions), работающих поверх NFVI (инфраструктуры) и управляемых оркестратором MANO
Аппаратная зависимость	Требует поддержки протоколов SDN (например, OpenFlow) на коммутаторах/маршрутизаторах, но может работать с commodity- hardware	Агностична к железу. Работает на любых стандартных промышленных серверах (COTS – Commercial Off-The-Shelf)
Истоки происхождения	Информационные технологии (ИТ), центры обработки данных (ЦОД)	Телекоммуникационная отрасль (операторы связи, такие как Telefonica, AT&T)
Орган стандартизации	Open Networking Foundation (ONF), протокол OpenFlow	European Telecommunications Standards Institute (ETSI)

Сравнительный анализ технологий SDN и NFV по стоимости

Вышеупомянутое семейство технологий в настоящий момент является критический важным при построении сетевых инфраструктур. Поэтому целесообразным является исследование их параметров с точки зрения их функциональности и эффективности через призму стоимостных характеристик. Ключевые, доступные в открытых источниках [14, 15] приведены в диаграммах на рисунках 3 и 4. Однако прежде, чем перейти к этому, необходимо зафиксировать ключевое различие, которое пронизывает все источники (таблица 5).

Из результатов, сведенных в таблицу 5, можно сделать следующий вывод: NFV дает прямой и измеримый эффект снижения CAPEX за счет отказа от аппаратного обеспечения; SDN дает более сложно измеримый, но значительный эффект снижения OPEX за счет автоматизации и снижения требований к квалификации персонала.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-138-144

Таблица 5 – Сравнительные данных природы затрат технологий SDN, NVF

Параметр	SDN (Программно-определяемые сети)	NFV (Виртуализация сетевых функций)
Основная статья экономии	Операционные затраты (OPEX) на управление и администрирование	Капитальные затраты (CAPEX) на специализированное аппаратное обеспечение
Источник затрат	Внедрение контроллеров, обучение персонала, переход на новые модели управления	Вычислительные ресурсы (CPU, RAM) для виртуализации, лицензии ПО
Кто основной бенефициар	Крупные ЦОДы, гиперскейлеры (Google, Facebook), вендоронезависимые компании	Телеком-операторы, сервис-провайдеры, предприятия

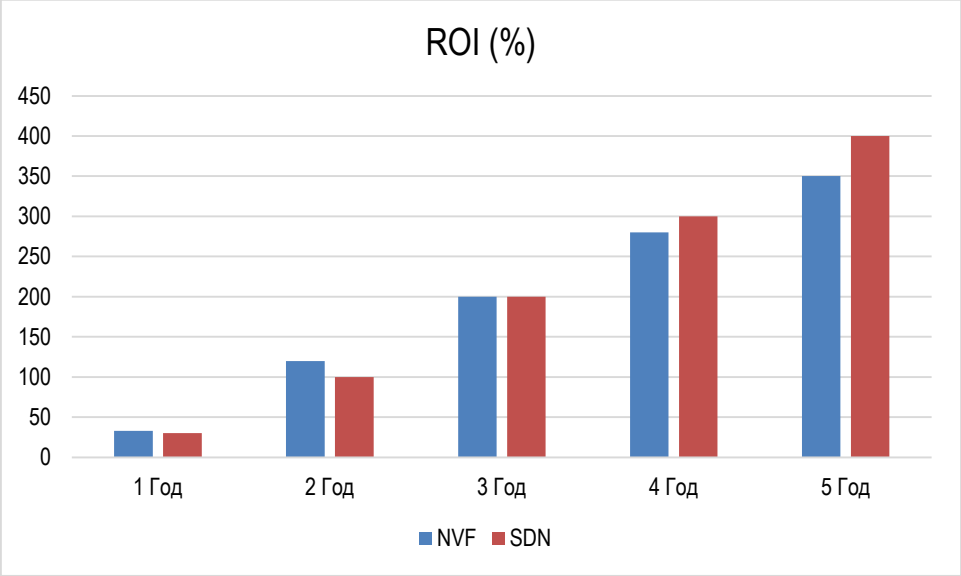


Рисунок 3 – Динамика ROI NFV за 5 лет внедрения и эксплуатации

На рисунке представлена динамика ROI технологии NVF и SGN за пять лет. ROI (Return on Investment) – это показатель, который простыми словами отвечает на вопрос окупаемости вложенных средств и какова полученная прибыль. Таким образом, это мера доходности или убыточности инвестиций, обычно измеряемая в процентах. Чем выше процент ROI, тем выгоднее проект. Исходя из рисунка 3 очевидно, что обе технологии имеют хорошую прибыльность (приблизительно от 30–33 % до 330–400 %) за пять лет внедрения и эксплуатации.

На рисунке 4 White box экономия – оценочный показатель, прямо не указан в источниках, выведен из контекста. Более дешевые White box существенно повышают ROI.

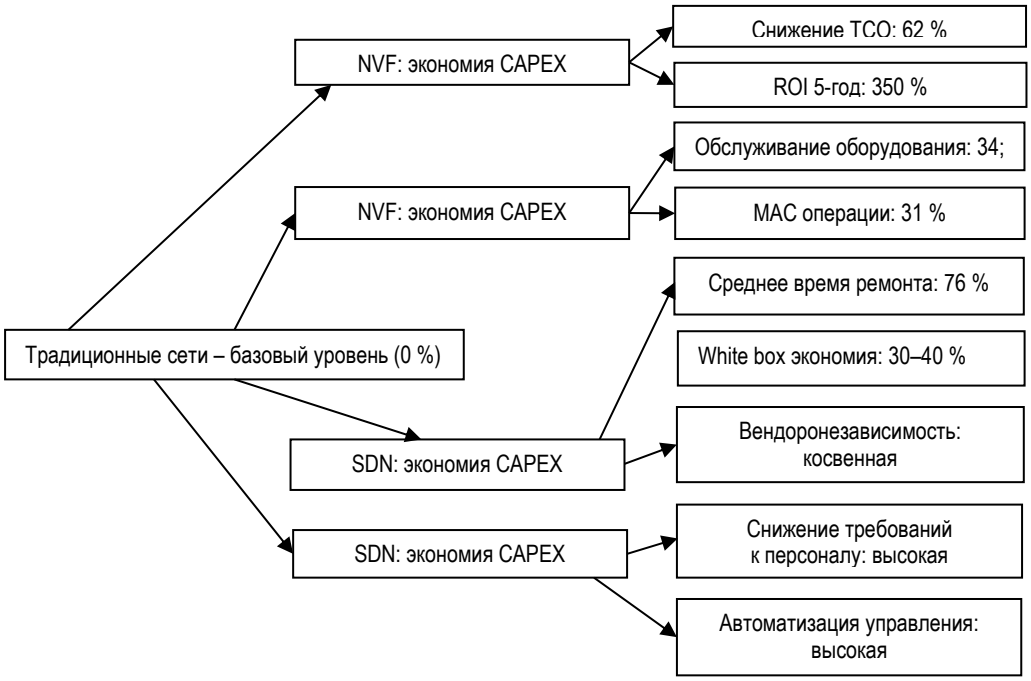


Рисунок 4 – Динамика ROI NFV за пять лет внедрения и эксплуатации

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-138-144

NFV демонстрирует измеримые количественные показатели, SDN – преимущественно качественные.

Сети на основе намерений (Intent-Based Networking – IBN). IBN представляет собой эволюцию SDN, направленную на создание самообучающихся и самоуправляемых систем. Это интеллектуальная сетевая архитектура, использующая искусственный интеллект и автоматизацию для настройки инфраструктуры в соответствии с бизнес-целями. Она переводит административные задачи с ручного управления на декларативный уровень, обеспечивая автоматическое развертывание, мониторинг и оптимизацию [16].

3 Анализ ключевых трендов и перспективы развития

Проведенное исследование позволяет сформулировать и выделить следующие устойчивые и формирующиеся тренды в аппаратно-программной организации сетей:

– *программируемость на всех уровнях* – от языков уровня плоскости данных (P4) до декларативных моделей управления (IaC). Научно-обоснованный анализ подтверждает, что современная программируемость сетей представляет собой вертикально-интегрированный стек. На нижнем уровне язык P4 обеспечивает гибкость обработки трафика, стирая границы между аппаратным и программным обеспечением. Это дает основание и необходимость переходить на принципиально новые подходы к проектированию сетей, масштабируемость и надежность всей инфраструктуры;

– *современная аппаратная основа* сочетает высокопроизводительные программируемые ASIC (PISA) в ядре, DPU на границе серверов и облачные сервисы на периферии. Научно-инженерный анализ определяет выбор платформы экономическими затратами и жесткими требованиями к задержке передачи сетевого трафика;

– *конвергенция сетевой инфраструктуры.* Поведенный научно-обоснованный анализ процессов передачи, хранения и безопасности сетевого трафика говорит о том, что единственным эффективным путем соответствия качества данных процессов потребностями современного общества является слияние, интеграция критически важных ресурсов в единую распределенную вычислительную среду. Таким образом, будущие технологии связаны с платформами, которые могут динамически компоновать необходимые ресурсы из общего пула под нужды конкретного приложения;

– *усиление автономности и интеллекта.* Развитие и интеграция искусственного интеллекта (искусственных нейронных сетей различной архитектуры и иных технологий машинного обучения) создает предпосылки к появлению высокоадаптивных сложных систем, где функции управления, восстановления, оптимизации, восстановления на всех уровнях сетевой модели взаимодействия, аппаратном и программном стеках будут максимально выполняться методами и средствами ИИ. Научный анализ данной проблемы позволил выделить целый пул критически важных задач, которые могли бы эффективно быть решены методами ИИ, реализованными в частности, в нейросетевом базисе (контроль безопасности протоколов передачи, мониторинг сетевого трафика и ресурсов, адаптивное управление нагрузкой, сетевыми устройствами, прогнозирование сетевого трафика и перегрузок и многие другие).

В качестве **перспектив дальнейшего развития в рамках данной работы** можно выделить следующие приоритетные направления:

– технология «инфраструктура как код (Infrastructure as Code – IaC) – представляет собой подход к управлению ИТ-инфраструктурой (серверы, компьютерные сети, базы данных) через декларативные конфигурационные файлы, а не ручную настройку; в качестве передовых инструментов можно выделить а) *конфигурационный менеджмент; б) - оркестрация инфраструктуры [17];*

– интеграционные платформы и средства комплексной организации сетей. Яркими представителями их являются: а) *гиперконвергентные инфраструктуры (Hyper-Converged Infrastructure – HCI) [18, 19];* б) *облачные нативные сетевые плагины для контейнерных оркестраторов [20, 21];* в) *облачные сетевые сервисы (Cloud Networking Services) [22].*

Заключение

Проведенное исследование современных методов и средств аппаратной и программной организации компьютерных сетей демонстрирует фундаментальный сдвиг от статической, аппаратно-зависимой инженерии к динамической, программно-управляемой технологии построения и конфигурирования компьютерных сетей и распределенных вычислительных сред. Основные принципы новой парадигмы – декомпозиция (разделение функций), абстракция (скрытие аппаратных деталей) и автоматизация (управление через код и замкнутые циклы).

В такой реализации аппаратная платформа становится стандартизированным, гибким и высокопроизводительным фундаментом, способным выполнять логику обработки данных, заданную программно. Программный стек, в свою очередь, эволюционирует в сторону облачных нативных принципов, централизованной интеллектуальной логики и бесшовной интеграции с системами оркестрации приложений.

Главным результатом такой трансформации является не просто повышение эффективности, а приобретение сетью качества адаптивности. В будущем сеть не будет «проектироваться» в традиционном смысле, а будет программироваться и оркестрироваться как часть единой цифровой среды. Это предъявляет новые требования к специалистам, требуя от них навыков разработки, работы с API, аналитики данных и системного мышления.

Список цитированных источников

1. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб. : Питер, 2021. – 944 с.
2. Куроуз, Дж. Ф. Компьютерные сети. Нисходящий подход / Дж. Ф. Куроуз, К. В. Росс. – М. : Питер, 2021. – 789 с.
3. Таненбаум, Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл. – СПб. : Питер, 2019. – 992 с.
4. Петерсон, Л. Л. Компьютерные сети: системный подход / Л. Л. Петерсон, Б. Дэви. – СПб. : БХВ-Петербург, 2018. – 944 с.
5. Бруно, Ф. Программирование FPGA для начинающих / Ф. Бруно. – М. : ДМК Пресс, 2022. – 304 с.
6. Dhar, S. FPGA Accelerated FPGA Placement / S. Dhar, L. Singhal, M. Iyer // 29th International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL). – Barcelona, Spain, 2019. – P. 404–410.
7. P4: Programming Protocol-Independent Packet Processors / P. Bosshart, D. Daly, G. Bibb [et al.] // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 2014. – Vol. 44, № 3. – P. 87–95.
8. A Comprehensive Survey of Network Function Virtualization / B. Yi, X. Wang, K. Li, M. Huang // Computer Networks. – 2018. – Vol. 133. – P. 212–262.
9. Mijumbi, R. Network Function Virtualization: State-of-the-art and Research Challenges / R. Mijumbi, J. Serrat, J. L.Gorricho // IEEE Communications Surveys and Tutorials. – 2015. – Vol. 18. – P. 236–262.
10. Callegati, F. Virtual Networking Performance in OpenStack Platform for Network Function Virtualization / F. Callegati, W. Cerroni, C. Contoli // Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2016. – P. 1–15.
11. Найдхарт, Т. Программируемые сети: от идеи к реализации. Основы автоматизации сетей с помощью Linux, Python, Ansible и OpenDaylight / Т. Найдхарт. – М. : ДМК Пресс, 2019. – 264 с.
12. Kim, H. Improving Network Management with Software Defined Networking / H. Kim, N. Feamster. // IEEE Communications Magazine. – 2013. – Vol. 51, № 2. – P. 114–119.
13. Kreutz, D. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey / D. Kreutz, F. M. Ramos, P. E. Verissimo // Proceedings of the IEEE. – 2015. – Vol. 103, № 1. – P. 14–76.
14. SD-WAN ROI: How to Quantify Cost Savings and Operational Efficiency. – URL: https://www.scc.com/insights/it-services/networking/sd-wan-roi-how-to-quantify-cost-savings-and-operational-efficiency (date of access: 27.12.2025).
15. NFV Will Drive Enterprise SDN Adoption. – URL: https://www.sdxcentral.com/analysis/nfv-will-drive-enterprise-sdn-adoption (date of access: 27.12.2025).
16. Prakash, V. Intent-Based Networking for Modern Infrastructure / V. Prakash, R. Singh. – USA, Sebastopol : O'Reilly Media, 2023. – 310 p.
17. Моррис, К. Инфраструктура как код: управление серверами в облаке / К. Моррис ; пер. с англ. А. С. Киселева. – СПб. : Питер, 2021. – 384 с.

18. Halabi, S. Hyperconverged Infrastructure Data Centers: Demystifying HCI / S. Halabi. – USA, Indianapolis : Cisco Press, 2019. – 544 p.
19. Blokdyk, G. Hyperconverged Infrastructure: A Complete Guide / G. Blokdyk. – Toronto : 5STARCooks, 2021. – 312 p.
20. Project Calico. Calico documentation. – URL: https://projectcalico.docs.tigera.io (date of access: 15.12.2025).
21. Cilium – Cloud Native, eBPF-based Networking, Observability, and Security. – URL: https://cilium.io (date of access: 22.12.2025).
22. AWS. What is Cloud Networking? – URL: https://aws.amazon.com/what-is/cloud-networking (date of access: 28.12.2025).

References

1. Olifer, V. G. Komp'yuternye seti. Principy, tekhnologii, protokoly : uchebnik dlya vuzov / V. G. Olifer, N. A. Olifer. – SPb. : Piter, 2021. – 944 s.
2. Kurouz, Dzh. F. Komp'yuternye seti. Niskhodyashchij podhod / Dzh. F. Kurouz, K. V. Ross. – M. : Piter, 2021. – 789 s.
3. Tanenbaum, E. Komp'yuternye seti / E. Tanenbaum, D. Uezeroll. – SPb. : Piter, 2019. – 992 s.
4. Peterson, L. L. Komp'yuternye seti: sistemnyj podhod / L. L. Peterson, B. Devi. – SPb. : BHV-Peterburg, 2018. – 944 s.
5. Bruno, F. Programmirovanie FPGA dlya nachinayushchih / F. Bruno. – M. : DMK Press, 2022. – 304 s.
6. Dhar, S. FPGA Accelerated FPGA Placement / S. Dhar, L. Singhal, M. Iyer // 29th International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL). – Barcelona, Spain, 2019. – P. 404–410.
7. P4: Programming Protocol-Independent Packet Processors / P. Bosshart, D. Daly, G. Bibb [et al.] // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 2014. – Vol. 44, № 3. – P. 87–95.
8. A Comprehensive Survey of Network Function Virtualization / B. Yi, X. Wang, K. Li, M. Huang // Computer Networks. – 2018. – Vol. 133. – P. 212–262.
9. Mijumbi, R. Network Function Virtualization: State-of-the-art and Research Challenges / R. Mijumbi, J. Serrat, J. L.Gorricho // IEEE Communications Surveys and Tutorials. – 2015. – Vol. 18. – P. 236–262.
10. Callegati, F. Virtual Networking Performance in OpenStack Platform for Network Function Virtualization / F. Callegati, W. Cerroni, C. Contoli // Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2016. – P. 1–15.
11. Najdhart, T. Programmiruemye seti: ot idei k realizacii. Osnovy avtomatizacii setej s pomoshch'yu Linux, Python, Ansible i OpenDaylight / T. Najdhart. – M. : DMK Press, 2019. – 264 s.
12. Kim, H. Improving Network Management with Software Defined Networking / H. Kim, N. Feamster. // IEEE Communications Magazine. – 2013. – Vol. 51, № 2. – P. 114–119.
13. Kreutz, D. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey / D. Kreutz, F. M. Ramos, P. E. Verissimo // Proceedings of the IEEE. – 2015. – Vol. 103, № 1. – P. 14–76.
14. SD-WAN ROI: How to Quantify Cost Savings and Operational Efficiency. – URL: https://www.scc.com/insights/it-services/networking/sd-wan-roi-how-to-quantify-cost-savings-and-operational-efficiency (date of access: 27.12.2025).
15. NFV Will Drive Enterprise SDN Adoption. – URL: https://www.sdxcentral.com/analysis/nfv-will-drive-enterprise-sdn-adoption (date of access: 27.12.2025).
16. Prakash, V. Intent-Based Networking for Modern Infrastructure / V. Prakash, R. Singh. – USA, Sebastopol : O'Reilly Media, 2023. – 310 p.
17. Morris, K. Infrastruktura kak kod: upravlenie serverami v oblake / K. Morris ; per. s angl. A. S. Kiseleva. – SPb. : Piter, 2021. – 384 s.
18. Halabi, S. Hyperconverged Infrastructure Data Centers: Demystifying HCI / S. Halabi. – USA, Indianapolis : Cisco Press, 2019. – 544 p.
19. Blokdyk, G. Hyperconverged Infrastructure: A Complete Guide / G. Blokdyk. – Toronto : 5STARCooks, 2021. – 312 p.
20. Project Calico. Calico documentation. – URL: https://projectcalico.docs.tigera.io (date of access: 15.12.2025).
21. Cilium – Cloud Native, eBPF-based Networking, Observability, and Security. – URL: https://cilium.io (date of access: 22.12.2025).
22. AWS. What is Cloud Networking? – URL: https://aws.amazon.com/what-is/cloud-networking (date of access: 28.12.2025).

Материал поступил 06.02.2026, одобрен 16.02.2026, принят к публикации 17.02.2026

УДК 621.373.8

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 45 ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ

И. В. Царенко[1], В. Г. Кудрицкий[2], Д. М. Гуцев[3]

[1] К. т. н., доцент кафедры технологии машиностроения, автоматизации и робототехники, УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Гомель, Беларусь, e-mail: tsarenkoira@gstu.by
[2] Научный сотрудник отдела «Трение, смазка и эксплуатационная стойкость материалов», ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси», Гомель, Беларусь, e-mail: vladukas@mail.ru
[3] К. т. н., доцент, заведующий сектором «Специальные смазочные материалы», ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси», Гомель, Беларусь, e-mail: gucevd@mail.ru

Реферат

В статье дана характеристика особенностей морфологии поверхности стали после лазерной закалки. Изучено влияние технологических параметров, таких как сила тока, время импульса и энергия в импульсе на формирование морфологических особенностей стальной поверхности после лазерной закалки. Структурные особенности были изучены с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Было установлено, что использование различных комбинаций технологических параметров (изменения силы тока в диапазоне от 60 до 180 А, времени импульса от 5 до 20 ms, энергии в импульсе в пределах от 0,3 Дж до 10,0 Дж) дает возможность получения большого разнообразия вариантов топографии поверхности стали после лазерной обработки, отвечающих разным триботехническим характеристикам структур: от пористых до ярко выраженных зон неравномерного оплавления, кристаллических дендридных и с хорошо упорядоченной упаковкой зерен.

Согласно результатам микроскопических исследований обработка с энергией до 1 Дж не приводит к нагреву с оплавлением поверхности: при обработке с энергией в импульсе менее 1 Дж токами менее 100 А топография поверхности после обработки отличается от первоначальной только появлением следов выхода на поверхность практически всех имеющихся в металле элементов. При обработке с энергией в импульсе более 1 Дж на поверхности наблюдаются зоны оплавления. Всего в структурах обработанных лазерным излучением образцов можно выделить четыре типа основных структурных элементов: зона без выраженных кристаллитов, зона роста дендридов, зона ярко выраженных кристаллитных структур, зона отслаиваемых образований.

В результате подробного спектрального анализа было обнаружено формирование отдельных гетерогенных мультиэлементных областей, причем была установлена зависимость интенсивности образования мультиэлементных зон от энергии в импульсе: чем выше энергия – тем больший объем металла подвергается тепловому воздействию и тем интенсивнее процесс образования этих зон. Несмотря на то, что энергию в импульсе определяют и сила тока накачки, и время импульса, было установлено, что влияние этих технологических факторов на свойства мультиэлементных зон неоднозначно. Увеличение силы тока способствует росту мультиэлементных зон, тогда как увеличение времени импульса способствует их отслаиванию. Было обнаружено, что когезия мультиэлементных областей зависит от режимов обработки. Особенно важным фактором для получения оптимальной структуры поверхности является время импульса. С увеличением времени выдержки импульса усиливается окисление поверхности, приводящее к ослаблению когезионных сил. Обработка импульсом более 15 ms приводит к массовому отслаиванию образовавшихся на поверхности мультиэлементных областей.

Ключевые слова: морфология поверхности, сталь, лазерная обработка, упрочнение, износостойкость.

MORPHOLOGICAL FEATURES OF STEEL 45 SURFACE AFTER LASER TREATMENT

I. V. Tsarenko, V. G. Kudrytski, D. M. Gutsev

Abstract

Characterization of morphological features of steel surface after laser treatment was done. Influence of basic technological parameters such as current, time, energy in laser beam for formation of morphological features of steel surface after laser treatment was studied. Structural features of steel surface after laser treatment were investigated by electron microscopy technique.

It was found that using various combinations of process parameters (current ranging from 60 to 180 A, pulse duration from 5 to 20 ms, and pulse energy from 0,3 J to 10,0 J) enables a wide variety of surface topographies to be achieved after laser treatment, corresponding to different tribological characteristics of structures: from porous to clearly defined zones of uneven melting, crystalline dendritic grains, and those with well-ordered grain packing.

According to microscopic studies, treatment with an energy of up to 1 J does not result in heating and surface melting. When treated with a pulse energy of less than 1 J and currents of less than 100 A, the post-treatment surface topography differs from the initial surface only by the appearance of traces of virtually all elements present in the metal emerging on the surface. When treated with a pulse energy greater than 1 J, melting zones are observed on the surface. Four types of main structural elements can be identified in the structures of laser-treated samples: a zone without distinct crystallites, a zone of dendrite growth, a zone of clearly defined crystallite structures, and a zone of exfoliated formations.

A detailed spectral analysis revealed the formation of individual heterogeneous multi-element regions, and a dependence was established between the intensity of multi-element zone formation and pulse energy: the higher the pulse energy, the greater the volume of metal subjected to thermal action and the more intense the formation of these zones. Although pulse energy is determined by both pump current and pulse duration, it was found that the influence of these process factors on the properties of multi-element zones is ambiguous. Increasing current promotes the growth of multi-element zones, while increasing pulse duration promotes their exfoliation. It was found that the cohesion of multi-element regions depends on the processing conditions. Pulse duration is a particularly important factor for achieving an optimal surface structure. Increasing the pulse exposure time intensifies surface oxidation, weakening cohesive forces. Pulse durations longer than 15 ms lead to massive exfoliation of the multi-element regions formed on the surface.

Keywords: surface morphology, steel, laser treatment, hardening, wear resistance.

Введение

Повышение износостойкости поверхности традиционно остаётся одной из ключевых задач машиностроительных технологий [1]. На сегодняшний день существует огромный арсенал технологий, направленных на повышение износостойкости: легирование специальными дорогостоящими материалами, объёмная или поверхностная ТВЧ закалка, наплавка высокотвёрдыми износостойкими материалами с последующей механообработкой, химико-термическая

обработка, как, например, хромирование, азотирование или цементация поверхности и т. д. [2–4]. Эти процессы широко известны, и в определённой степени повышают износостойкость и срок службы деталей. Однако они достаточно трудоёмки, энерго- и материалоёмки, имеют продолжительный технологический цикл [5, 6].

Среди методов упрочнения поверхности особое место принадлежит лазерной закалке. Эффекта воздействия на металлическую поверхность, который достигается с помощью лазерного луча, невозможно достичь никаким другим методом обработки [7]. Лазерный луч, являясь высококонцентрированным источником энергии, обеспечивает широкие возможности управления термическими процессами, протекающими в поверхностном слое металла при облучении. Это позволяет целенаправленно придавать поверхности необходимые физико-механические свойства за счет изменения структуры, химического и фазового состава [8, 9]. Технология лазерного упрочнения дает возможность повысить износостойкость и срок службы деталей без применения дорогостоящих расходных материалов, без необходимости трудоемких и энергоемких подготовительных и последующих доводочных операций, так как может производиться без нарушения макро- и микрогеометрии поверхности детали, отличается коротким технологическим циклом, оперативностью выполнения работ, относительно низкой удельной энерго-трудо-материалоемкостью и, соответственно, низкой стоимостью. А благодаря локальности воздействия может обрабатываться не вся деталь, а только ее быстроизнашивающиеся участки [10, 11].

Несмотря на большое количество исследований лазерной обработки стали 45 наличие большого количества противоречивых мнений (предположения о насыщении жидкого металла азотом, о влиянии азота атмосферы, о формировании микрообъемных зон нагрева чрезвычайно метастабильного состояния) говорит о многогранности характера лазерного упрочнения и перспективности его дальнейшего изучения [12, 13].

Цель данной работы – оценить влияние технологических параметров процесса лазерной обработки поверхности стали на морфологию полученных в результате лазерной закалки структур, что позволит разработать полезные рекомендации для получения максимальных параметров износостойкости с помощью лазерной обработки.

Материалы и методика эксперимента

Лазерной закалке подвергали образцы из стали 45, химический состав которой, согласно ГОСТ 1050-2013, представлен в таблице 1.

Обработку лазерным импульсом проводили на экспериментальной лазерной технологической установке на базе твердотельного лазера TL-400, представленной на рисунке 1 а. Установка является конструкторской разработкой ГГУ имени Ф. Скорины (г. Гомель) [14–16]. Оптическая схема установки позволяет изменять диаметр пятна лазерного пучка в зоне обработки от 0,1 до $3 \cdot 10^{-3}$ м. Лазерное излучение в излучателе генерируется в кристаллах АИГ: Nd^{+3}. Длина волны излучения – 1,064 мкм, максимальное значение средней мощности – 400 Вт. Размер активных элементов – $6,3 \times 130 \times 10^{-3}$ м. Диаметр лазерного пучка на выходе из резонатора 6×10^{-3} м. Для обеспечения необходимого температурного режима работы активных элементов использовалось водяное охлаждение. Процесс лазерной обработки представлен на рисунке 1 б.

Таблица 1 – Химический состав в % стали 45

Fe	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
около 97	0,42–0,5	0,17– 0,37	0,5–0,8	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,3	до 0,08



а б

Рисунок 1 – Лазерная установка (а) и процесс лазерной обработки (б)

Топография поверхности изучалась на растровом электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan, Чехия) при увеличениях от 100 до 5000 крат. Элементный анализ проводился методом EDX (энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии) на этом же микроскопе с использованием приставки INCA X-act (Oxford Instruments, Англия).

Энергия лазера в импульсе определялась с помощью измерителя энергии ИКТ1-Н.

Триботехнические испытания проводились с помощью микротрибометра MTU-2K7 (ИММС НАН Беларуси, Гомель) [17–19] по схеме возвратно-поступательного движения сферы-контртела относительно плоскости исследуемого образца. Прибор обеспечивает измерение сил (коэффициента) трения пары сфера/плоскость в автоматическом режиме. Испытания проводились при нормальной нагрузке 500 mN, линейной скорости 2,5 мм/с, длине единичного хода 5 мм.

Результаты исследований

Изменение силы тока в диапазоне от 60 до 180 А и времени импульса от 5 до 20 ms позволило варьировать энергию в импульсе в пределах от 0,3 Дж до 10,0 Дж (таблица 2) и получить большое разнообразие вариантов топографии поверхности стали после лазерной обработки, отвечающих разным триботехническим характеристикам [20].

Таблица 2 – Зависимость энергии в импульсе *E* (Дж) от времени импульса *τ* (ms) и тока накачки *I* (А)

Ток накачки, *I* (А)	Энергия в импульсе *E* (Дж) в зависимости от времени импульса *τ* (ms)				
	5	10	15	20	25
60	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2
120	0,8	1,4	2,0	3,5	4,1
180	2,5	4,0	6,0	8,0	10,0

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-145-152

На рисунке 2 представлены фотографии поверхности образцов до (рисунок 2 а) и после лазерной обработки различными режимами (рисунок 2 б–к).

На сегодняшний день структурные изменения, происходящие при лазерной закалке стали 45 достаточно хорошо изучены. Как правило, ее исходная равновесная структура состоит из примерно одинакового количества феррита и перлита. В момент импульса лазерного излучения происходит полная фазовая перекристаллизация с образованием аустенита. Но степень его гомогенизации зависит от времени теплового воздействия. Сразу после прекращения лазерного импульса начинается охлаждение нагретого объема. Тепло главным образом отводится вглубь детали. Вследствие высокой теплопроводности металлов и с учетом того, что нагретый объем составляет незначительную часть всего изделия скорость отвода тепла (скорость охлаждения) оказывается выше критической скорости закалки и, таким образом, при лазерном упрочнении не требуется принудительное охлаждение, так как происходит автозакалка.

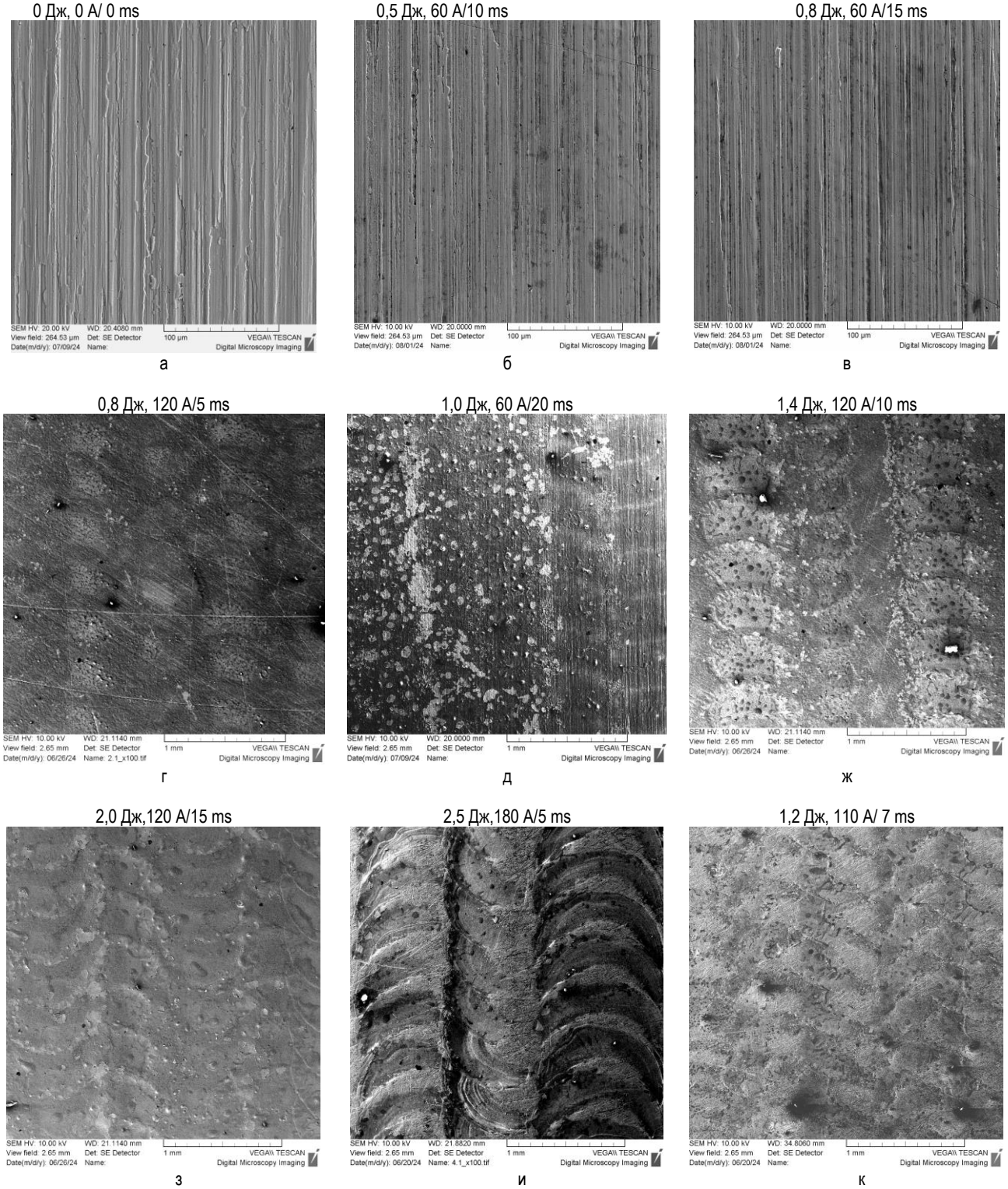


Рисунок 2 – Фотографии поверхности образцов до и после лазерной обработки различными режимами

Как показывают результаты микроскопических исследований обработка с энергией до 1 Дж не приводит к нагреву с оплавлением поверхности (рисунок 3). При обработке с энергией в импульсе менее 1 Дж токами менее 100 А топография поверхности после обработки отличается от первоначальной только появлением следов выхода на поверхность практически всех имеющихся в металле элементов (на рисунке 3 б и 3 в они, как показали спектральные исследования, отображаются темными пятнами).

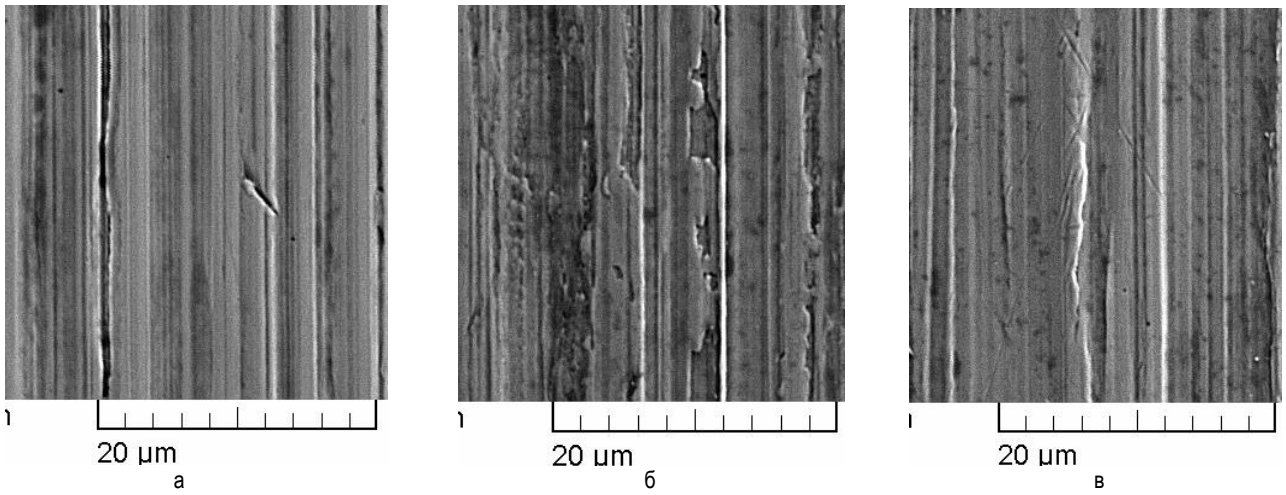
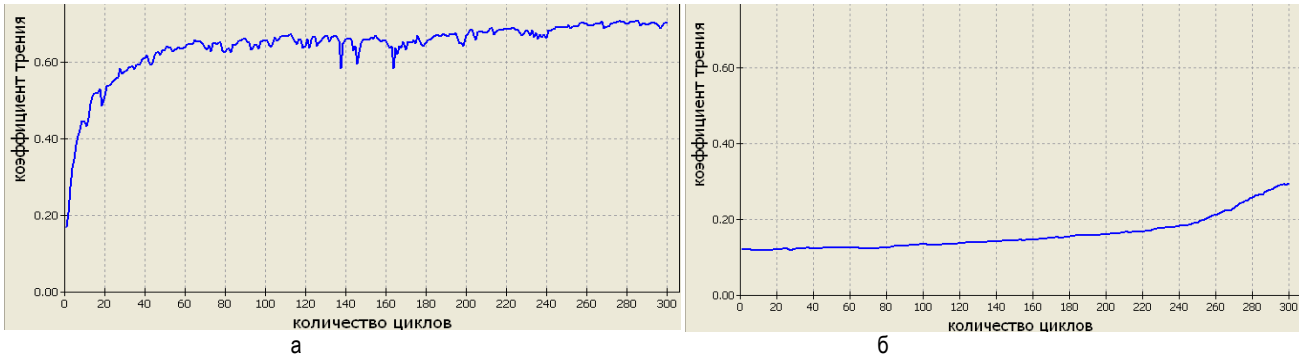


Рисунок 3 – Фотографии поверхности стали до обработки (а) и после обработки низкоэнергетическими импульсами: 0,5 Дж при 60 А/10 ms (б) и 0,8 Дж при 60 А/15 ms

При обработке с энергией в импульсе более 1 Дж на поверхности можно наблюдать зоны оплавления (рисунок 2 ж–к). Оплавление в сочетании с последующей автозакалкой представляет собой специфический вид термообработки – закалку из жидкого состояния. В результате быстрого затвердевания в тонких поверхностных слоях образуются метастабильные структуры. Формирование таких метастабильных структур может приводить к повышению эксплуатационных характеристик изделия [21]. Как показали результаты триботехнических испытаний, представленные в [20], такие поверхности характеризуются более высокими показателями твердости и низким коэффициентом трения (рисунок 4).



а) поверхность без лазерной обработки; б) поверхность после лазерной обработки

Рисунок 4 – Влияние количества циклов на коэффициент трения при проведении триботехнических испытаний образцов стали 45

Использование различных комбинаций технологических параметров дает возможность получения большого разнообразия структур: от пористых (рисунок 5 а) до ярко выраженных зон неравномерного оплавления (рисунок 5 б, в), кристаллических дендридных (рисунок 5 г, д, е) и с хорошо упорядоченной упаковкой зерен (рисунок 5ж). При кристаллизации из жидкого состояния металлы и сплавы чаще всего приобретают дендритную структуру. В условиях быстрого теплоотвода, характерного для охлаждения после лазерного нагрева, образуются столбчатые микрокристаллы, растущие перпендикулярно к границе между расплавившимся слоем и оставшейся в твердом состоянии основной массой изделия.

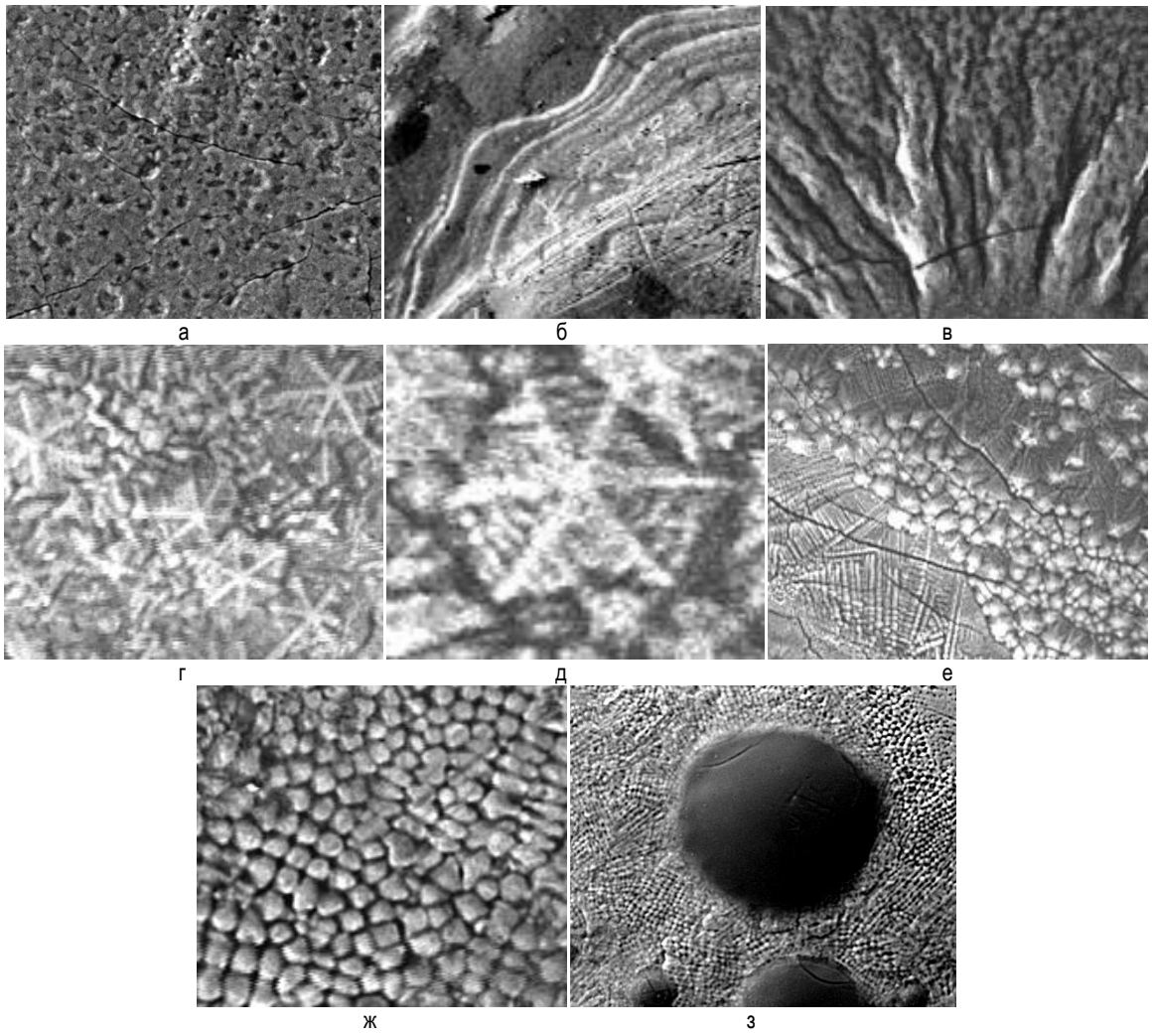
На всех обработанных лазером поверхностях обнаруживается появление темных пятен (рисунок 5 з), химический состав которых был изучен спектроскопическими методами и описан ниже.

Структура без выраженных кристаллитов (рисунок 6 а) наблюдается при недостаточной для роста кристаллитов энергии импульса (до 1 Дж). С увеличением энергии в импульсе сначала можно различить появление четко выраженных дендритных структур, из которых при увеличении энергии формируются упаковки кристаллитов. Время импульса является ключевым фактором, так как даже на поверхности обработанной энергией 2,5 Дж, но при времени воздействия всего 5 ms четко наблюдается этап дендритного роста (рисунок 6 б). При обработке импульсом в течении 10 и более ms можно наблюдать ярко выраженную кристаллитную структуру (рисунок 6 в). В тоже время с увеличением времени импульса растет количество поверхностных дефектов – областей отслаивания (рисунок 6 г).

Всего в структурах обработанных лазерным излучением образцов можно выделить четыре типа основных структурных элементов, отраженных на рисунке 6:

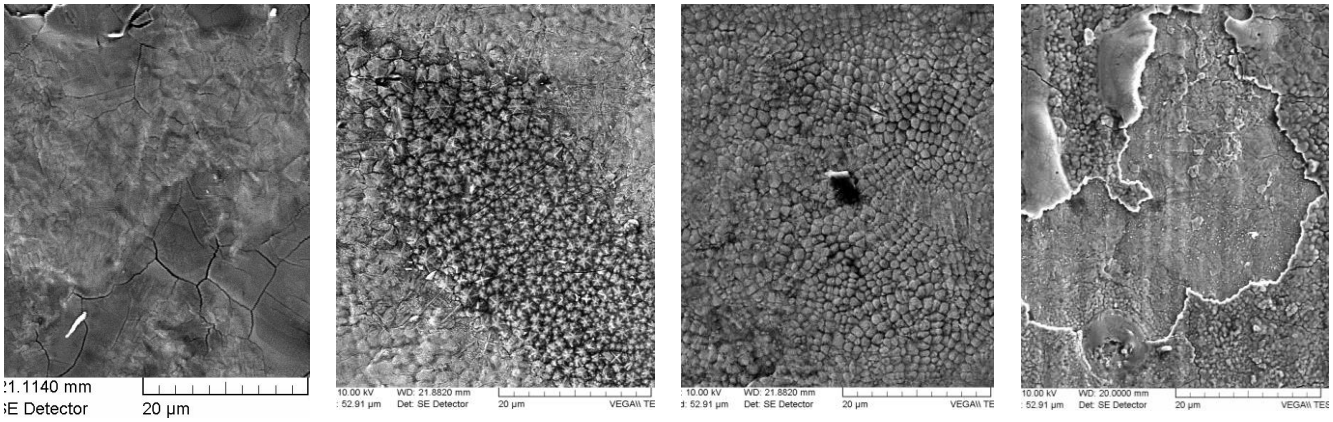
- зона без выраженных кристаллитов (рисунок 6 а);
- зона роста дендритов (рисунок 6 б);
- зона ярко выраженных кристаллитных структур (рисунок 6 в);
- зона отслаиваемых образований (рисунок 6 г).

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-145-152



а) пористых; б, в) зоны выраженного неравномерного оплавления; г, д, е) кристаллические дендридные структуры; ж) структуры с хорошо упорядоченной упаковкой зерен; з) пятнистые

Рисунок 5 – Фотографии поверхности образцов до и после лазерной обработки различными режимами, отражающие появление различных структур

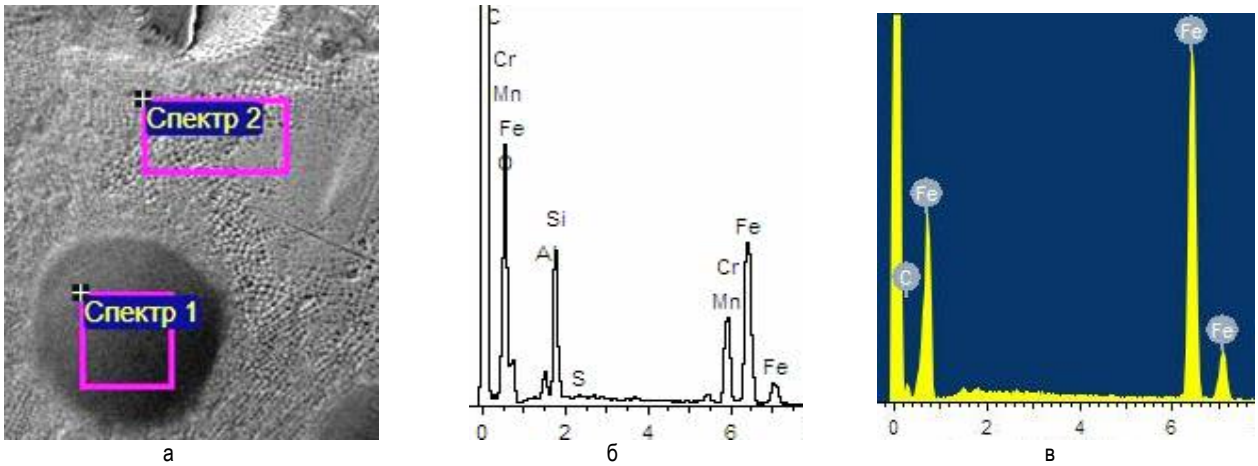


а) зона аморфная, без выраженных кристаллитов; б) зона роста дендритов; в) зона ярко выраженных кристаллитных структур; г) зона отслаиваемых образований

Рисунок 6 – Основные структурные элементы

Отслаиванию подвергаются аморфные области. Причем образование аморфных зон (на фотографиях проявляющиеся темными пятнами) было отмечено на всех образцах. Подробный спектральный анализ этих образований указывает на повышенную в них концентрацию

практически всех содержащихся в стали 45 химических элементов (таблица 1): кремния, марганца, хрома, серы (рисунок 7 б). Причем концентрация этих элементов в этих образованиях несоизмеримо выше, чем их содержание в объеме металла. Очевидно импульсное повышение температуры поверхности приводит к ускоренной диффузии этих элементов из объема металла на поверхность и сосредоточении в отдельные гетерогенные мультиэлементные области. Спектральный анализ кристаллитных структур вокруг этих областей показывает присутствие только двух элементов: железа и углерода (рисунок 7 в), причем концентрация углерода в новообразованных кристаллитах несоизмеримо выше, чем в спектре необработанной лазером поверхности. Было отмечено, что энергия в импульсе влияет на интенсивность образования мультиэлементных зон: чем выше энергия – тем больший объем металла подвергается тепловому воздействию и тем интенсивнее процесс образования этих зон. Как указывалось выше, энергию в импульсе определяют сила тока накачки и время импульса. Но влияние этих технологических факторов на свойства мультиэлементных зон неоднозначно. Увеличение силы тока способствует росту мультиэлементных зон, тогда как увеличение времени импульса способствует их отслаиванию.

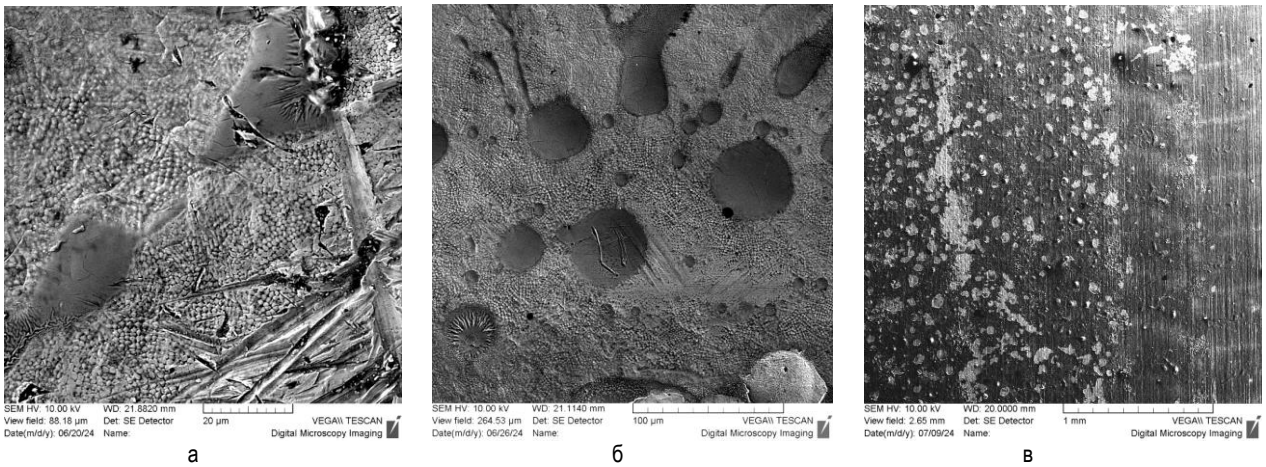


а б в

а) фотография области исследования; б) спектр отслаиваемой зоны; в) спектр «чистой» зоны

Рисунок 7 – Спектроскопический анализ областей отслаивания

Было обнаружено, что когезия этих образований зависит от режимов обработки. Особенно на нее влияет время обработки. На поверхности, полученной после 5 ms обработки, они держатся настолько прочно, что механические царапины приводят скорее к их расплющиванию, чем к сколу (рисунок 8 а). Однако с увеличением времени выдержки импульса можно наблюдать ослабление когезионных сил. И если при 10 ms выдержки можно наблюдать лишь единичные области отслаивания (рисунок 8 б), то после 15 ms обработки наблюдается массовое отслаивание (рисунок 8 в). Изучение элементного состава спектров мультиэлементных зон в зависимости от времени импульса показало рост содержания кислорода в их спектре с увеличением времени импульса. Очевидно, именно окисление приводит к ослаблению когезионных сил и шелушению поверхности.



а б в

а) 5 ms; б) 10 ms; в) 15 ms

Рисунок 8 – Образование мультиэлементных зон при обработке технологическими режимами, отличающимися по времени воздействия лазерного импульса

Сравнивая структуры поверхности образцов, полученных при воздействии одинаковой энергии в импульсе, но при разных значениях силы тока и времени импульса можно оценить влияние технологических параметров (сила тока и время импульса). На рисунке 2 представлены фотографии двух поверхностей, полученных в результате обработки лазером с энергией 0,8 Дж: на рисунке 2 в – в результате воздействия силы тока 60 А в течение 15 ms, на рисунке 2 г – в результате воздействия силы тока 120 А в течение 5 ms. Несмотря на одинаковую энергию воздействия полученные структуры значительно отличаются.

Заключение

Использование различных комбинаций технологических параметров (изменения силы тока в диапазоне от 60 до 180 А, времени

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-145-152

импульса от 5 до 20 ms, энергии в импульсе в пределах от 0,3 Дж до 10,0 Дж) дает возможность получения большого разнообразия вариантов топографии поверхности стали после лазерной обработки, отвечающих разным триботехническим характеристикам структур: от пористых до ярко выраженных зон неравномерного оплавления, кристаллических дендритных и с хорошо упорядоченной упаковкой зерен.

Согласно результатам микроскопических исследований, обработка с энергией до 1 Дж не приводит к нагреву с оплавлением поверхности: при обработке с энергией в импульсе менее 1 Дж токами менее 100 А топография поверхности после обработки отличается от первоначальной только появлением следов выхода на поверхность практически всех имеющихся в металле элементов. При обработке с энергией в импульсе более 1 Дж на поверхности наблюдаются зоны оплавления. Всего в структурах обработанных лазерным излучением образцов можно выделить четыре типа основных структурных элементов: а) зона без выраженных кристаллитов; б) зона роста дендритов; в) зона ярко выраженных кристаллитных структур; г) зона отслаиваемых образований.

В результате подробного спектрального анализа было обнаружено формирование отдельных гетерогенных мультиэлементных областей, причем была установлена зависимость интенсивности образования мультиэлементных зон от энергии в импульсе: чем выше энергия – тем больший объем металла подвергается тепловому воздействию и тем интенсивнее процесс образования этих зон. Несмотря на то, что энергию в импульсе определяют и сила тока накачки, и время импульса, было установлено, что влияние этих технологических факторов на свойства мультиэлементных зон неоднозначно. Увеличение силы тока способствует росту мультиэлементных зон, тогда как увеличение времени импульса способствует их отслаиванию. Было обнаружено, что когезия мультиэлементных областей зависит от режимов обработки. Особенно важным фактором для получения оптимальной структуры поверхности является время импульса. С увеличением времени выдержки импульса усиливается окисление поверхности, приводящее к ослаблению когезионных сил. Обработка импульсом более 15 ms приводит к массовому отслаиванию образовавшихся на поверхности мультиэлементных областей.

Было установлено, что при энергии импульса менее 1 Дж на обработанной поверхности образование структуры кристаллитов не наблюдается: энергии менее 1 Дж недостаточно для роста кристаллитов.

Список цитированных источников

1. Ведерникова, И. И. Применение лазерного модифицирования для упрочнения рабочих поверхностей деталей машин / И. И. Ведерникова, В. А. Полетаев // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2019. – № 15. – С. 18–25.
2. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки : учебное пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров ; под ред. А. Г. Григорьянца. – М. : МГТУ им. Баумана, 2006. – 664 с.
3. Астапчик, С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. – Минск : Белорусская наука, 2008. – 250 с.
4. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий / А. В. Белый, А. С. Калиниченко, О. Г. Девойно, В. А. Кукареко. – Минск : Беларуская навука, 2017. – 456 с.
5. Surface Hardening of Gears by Laser Beam Processing / H. Zhang, Y. Shi, C.Y. Xu, M. Kutsuna // Surface Engineering. – 2003. – Vol. 19, No. 2. – P. 134–136.
6. Mordike, B. L. Improvement of Wear Properties by Laser Surface Treatment / B. L. Mordike // Laser Treatment of Materials. ECLAT'90 : Proc. 3rd European Conf. // Eds. H. W. Bergmann, R. Kupfer. – Germany, 1990. – Vol. 1. – P. 371–376.
7. Сафонов, А. Н. Изучение структуры и твердости поверхности железоуглеродистых сплавов после их оплавления лазерным излучением / А. Н. Сафонов // МиТОМ. – 1999. – № 1. – С. 7–10.
8. Оценка влияния параметров режима лазерной закалки на качество поверхности и поверхностного слоя деталей станков (обзор) / С. В. Петроченко, Ц. Хао, С. Юй, К. Чжао // Омский научный вестник. – 2024. – № 1. – С. 56–65.
9. Огин, П. А. Влияние мощности лазерного излучения и скорости движения луча на геометрию зоны оплавления при лазерной закалке стали 40Х / П. А. Огин, Д. Л. Мерсон, С. И. Яресько // Вектор науки ТГУ. – 2016. – № 2 (36). – С. 46–51. – DOI: 10.18323/2073-5073-2016-2-46-51.
10. Структурные фазовые превращения в быстрорежущей стали при лазерной закалке с оплавлением поверхности многоканальным CO_2 лазером / Л. Е. Афанасьева, И. А. Барабонова, Е. В. Ботянов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 8 (104). – С. 10–13.
11. Гуреев, Г. Д. Совмещение лазерного и ультразвукового воздействий для термообработки поверхности стали / Г. Д. Гуреев, Д. М. Гуреев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2007. – № 1 (14). – С. 90–95.
12. Патент RU 2375465, МПК C21D1/09, C21D7/06. Способ поверхностного упрочнения : № 2008131983 : заявл. 01.08.2008 : опубл. 10.12.2009 / Кукин С. Ф., Девойно О. Г., Баркун А. А., Кукин А. С. – 7 с.
13. Патент BY 12978, МПК C21D1/09, C21D1/78. Способ поверхностного упрочнения изделия из железоуглеродистого или титанового сплава : № 20080514 : заявл. 18.04.2008 : опубл. 30.04.2010 / Кукин С. Ф., Девойно О. Г., Баркун А. А., Кукин А. С. – 6 с.
14. Бровер, А. В. Особенности лазерной упрочняющей обработки деталей машин и инструмента / А. В Бровер // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 6 (42). – С. 12–16.
15. Лазерная установка с оптоволоконной приставкой и процессы сварки изделий из нержавеющей стали / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. В. Шалупаев, С. Н. Юркевич // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 84–87.
16. Патент RU 34426, МПК B23K 26/00, B23K 26/02, B23K 26/03, B23K 26/067. Установка для лазерной обработки : № 2003117186/20 : заявл. 11.06.2003; опубл. 10.12.2003. / Бренько А. А., Мышковец В. Н., Максименко А. В., Рыбин В. И., Тучин А. Н., Юркевич С. Н., Прищепов Е. Г. – 11 с.
17. Оборудование для лазерной технологии обработки материалов / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Г. А. Баевич, В. В. Грищенко // Технологии, оборудование, качество. Белорусский промышленный форум-2006 : материалы 9 международного симпозиума, Минск, 16–19 мая 2006 г. – Минск, 2006. – С. 87.
18. Возвратно-поступательный миллитрибометр МТУ-2К7 / А. Я. Григорьев, Д. М. Гуцев, А. П. Зозуля [и др.] // Трение и износ. – 2014. – Т. 35, № 6. – С. 664–669.
19. Reciprocating MTU2K7 Millitribometer / A. Ya. Grigoriev, D. M. Gutsev, A. P. Zozulya [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2014. – Vol. 35, No. 6. – P. 455–459.
20. Влияние лазерной закалки на триботехнические свойства стали 45 / Е. Г. Акунец, Д. М. Гуцев, В. Г. Кудрицкий [и др.] // Трение и износ. – 2025. – Т. 46, № 2. – С. 111–120.
21. Коваленко, В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головко, В. С. Черненко. – Киев : Тэхника, 1990. – 190 с.

References

1. Vedernikova, I. I. Primenenie lazernogo modificirovaniya dlya uprochneniya rabochih poverhnostej detalej mashin / I. I. Vedernikova, V. A. Poletaev // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2019. – № 15. – S. 18–25.
2. Grigor'yanc, A. G. Tekhnologicheskie processy lazernoj obrabotki : uchebnoe posobie / A. G. Grigor'yanc, I. N. SHiganov, A. I. Misyurov ; pod red. A. G. Grigor'yanca. – M. : MGTU im. Baumana, 2006. – 664 s.
3. Astapchik, S. A. Lazernye tekhnologii v mashinostroenii i metalloobrabotke / S. A. Astapchik, V. S. Golubev, A. G. Maklakov. – Minsk : Belorusskaya nauka, 2008. – 250 s.

4. Inzheneriya poverhnostej konstrukcionnyh materialov s ispol'zovaniem plazmennyh i puchkovyh tekhnologij / A. V. Belyj, A. S. Kalinichenko, O. G. Devojno, V. A. Kukareko. – Minsk : Belaruskaya navuka, 2017. – 456 s.
5. Surface Hardening of Gears by Laser Beam Processing / H. Zhang, Y. Shi, C.Y. Xu, M. Kutsuna // Surface Engineering. – 2003. – Vol. 19, No. 2. – P. 134–136.
6. Mordike, B. L. Improvement of Wear Properties by Laser Surface Treatment / B. L. Mordike // Laser Treatment of Materials. ECLAT'90 : Proc. 3rd European Conf. // Eds. H. W. Bergmann, R. Kupfer. – Germany, 1990. – Vol. 1. – P. 371–376.
7. Safonov, A. N. Izuchenie struktury i tverdosti poverhnosti zhelezouglerodistyh splavov posle ih oplavleniya lazernym izlucheniem / A. N. Safonov // MiTOM. – 1999. – № 1. – S. 7–10.
8. Ocenka vliyaniya parametrov rezhima lazernoj zakalki na kachestvo poverhnosti i poverhnostnogo sloya detalej stankov (obzor) / S. V. Petrochenko, C. Hao, S. YUj, K. CHzhao // Omskij nauchnyj vestnik. – 2024. – № 1. – S. 56–65.
9. Ogin, P. A. Vliyanie moshchnosti lazernogo izlucheniya i skorosti dvizheniya lucha na geometriyu zony oplavleniya pri lazernoj zakalke stali 40X / P. A. Ogin, D. L. Merson, S. I. YAres'ko // Vektor nauki TGU. – 2016. – № 2 (36). – S. 46–51. – DOI: 10.18323/2073-5073-2016-2-46-51.
10. Strukturnye fazovye prevrashcheniya v bystrorezhushchej stali pri lazernoj zakalke s oplavleniem poverhnosti mnogokanal'nym SO2 lazerom / L. E. Afanas'eva, I. A. Barabonova, E. V. Botyanov [i dr.] // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. – 2013. – № 8 (104). – S. 10–13.
11. Gureev, G. D. Sovmeshchenie lazernogo i ul'trazvukovogo vozdejstvij dlya termoobrabotki poverhnosti stali / G. D. Gureev, D. M. Gureev // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki. – 2007. – № 1 (14). – S. 90–95.
12. Patent RU 2375465, MPK S21D1/09, S21D7/06. Sposob poverhnostnogo uprochneniya : № 2008131983 : zayavl. 01.08.2008 : opubl. 10.12.2009 / Kukin S. F., Devojno O. G., Barkun A. A., Kukin A. S. – 7 s.
13. Patent BY 12978, MPK S21D1/09, S21D1/78. Sposob poverhnostnogo uprochneniya izdeliya iz zhelezouglerodistogo ili titanovogo splava : № 20080514 : zayavl. 18.04.2008 : opubl. 30.04.2010 / Kukin S. F., Devojno O. G., Barkun A. A., Kukin A. S. – 6 s.
14. Brover, A. V. Osobennosti lazernoj uprochnyayushchej obrabotki detalej mashin i instrumenta / A. V Brover // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. – 2008. – № 6 (42). – S. 12–16.
15. Lazernaya ustanovka s optovolokonnoj pristavkoj i processy svarki izdelij iz nerzhaveyushchej stali / V. N. Myshkovec, A. V. Maksimenko, S. V. SHalupaev, S. N. YUrkevich // Materialy. Tekhnologii. Instrumenty. – 2003. – T. 8, № 4. – S. 84–87.
16. Patent RU 34426, MPK V23K 26/00, V23K 26/02, V23K 26/03, V23K 26/067. Ustanovka dlya lazernoj obrabotki : № 2003117186/20 : zayavl. 11.06.2003; opubl. 10.12.2003. / Bren'ko A. A., Myshkovec V. N., Maksimenko A. V., Rybin V. I., Tuchin A. N., YUrkevich S. N., Prishchepov E. G. – 11 s.
17. Oborudovanie dlya lazernoj tekhnologii obrabotki materialov / V. N. Myshkovec, A. V. Maksimenko, G. A. Baevich, V. V. Grishchenko // Tekhnologii, oborudovanie, kachestvo. Belorusskij promyshlennyj forum-2006 : materialy 9 mezhdunarodnogo simpoziuma, Minsk, 16–19 maya 2006 g. – Minsk, 2006. – S. 87.
18. Vozvratno-postupatel'nyj millitribometr MTU-2K7 / A. YA. Grigor'ev, D. M. Gucev, A. P. Zozulya [i dr.] // Trenie i iznos. – 2014. – T. 35, № 6. – S. 664–669.
19. Reciprocating MTU2K7 Millitribometer / A. Ya. Grigoriev, D. M. Gutsev, A. P. Zozulya [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2014. – Vol. 35, No. 6. – P. 455–459.
20. Vliyanie lazernoj zakalki na tribotekhnicheskie svojstva stali 45 / E. G. Akunec, D. M. Gucev, V. G. Kudrickij [i dr.] // Trenie i iznos. – 2025. – T. 46, № 2. – S. 111–120.
21. Kovalenko, V. S. Uprochnenie i legirovanie detalej mashin luchom lazera / V. S. Kovalenko, L. F. Golovko, V. S. CHernenko. – Kiev : Tekhnika, 1990. – 190 s.

Материал поступил 13.02.2026, одобрен 24.02.2026, принят к публикации 11.03.2026

УДК 656.007

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМ ПАССАЖИРСКИМ ТРАНСПОРТОМ

А. В. Ярошевич

К. т. н., доцент, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: yerotey@gmail.com

Реферат

Перевозка пассажиров в больших городах маршрутизированным транспортом обладает всеми признаками сложных систем. Большинство компонент этой системы имеют стохастический характер, число связей элементов очень велико, размерность информационных массивов большая. Разработка глобальной математической модели для автоматизации управления не представляется возможной. При этом в системе существуют закономерности и признаки, позволяющие установить детерминированные связи элементов. Последнее позволяет выполнить декомпозицию системы на более простые блоки и разработать алгоритмы управления. Решение перечисленных выше проблем можно найти путем: 1) обобщения структуры ресурсов, работ и технологических процессов для построения общей информационной модели календарного планирования городского пассажирского транспорта; 2) декомпозиции общей задачи на ряд задач достаточной для получения решения размерности; 3) выбора критерия эффективности, свободного от издержек стоимостных оценок и учитывающего интересы пассажиров с одной стороны и транспортных предприятий с другой; 4) учета перераспределения пассажиропотоков между маршрутами при построении комплекса согласованных математических моделей календарного планирования; 5) уточнения расчетных методов получения данных о пассажиропотоках.

Целью настоящей работы является выделение этих закономерностей и разработка технологической информационной модели управления городским пассажирским транспортом.

Путь, на котором эта проблема может быть решена, предполагает построение простых и понятных для транспортников моделей, ориентированных: на решение задач локального характера, обеспечивающих быстрое получение экономического эффекта. Для решения задач комплексного характера следует создавать программные системы, состоящие из независимых и простых программных модулей.

Ключевые слова: перевозка пассажиров, городской маршрут, математическая модель, декомпозиция, автоматизация управления.

TECHNOLOGICAL INFORMATION MODEL FOR MANAGING URBAN PASSENGER TRANSPORT

A. V. Yrashevich

Abstract

Transportation of passengers in large cities by routed transport has all the characteristics of complex systems. Most of the components of this system are stochastic in nature, the number of links between elements is very large, and the dimension of information arrays is large. It is not possible to develop a global mathematical model for control automation. At the same time, there are patterns and features in the system that allow you to establish deterministic relationships between elements. The latter allows you to decompose the system into simpler blocks and develop control algorithms. The solution to the above problems can be found by: 1) generalization of the structure of resources, works and technological processes for building a general information model of urban passenger transport calendar planning; 2) decomposition of the general problem into a series of problems of sufficient dimension to obtain a solution; 3) choosing an efficiency criterion that is free from cost estimates and takes into account the interests of passengers on the one hand and transport companies on the other; 4) taking into account the redistribution of passenger flows between routes when constructing a set of coordinated mathematical models of calendar planning; 5) refinement of calculation methods for obtaining passenger traffic data.

The purpose of this paper is to identify these patterns and develop a technological information model for managing urban passenger transport.

The way in which this problem can be solved involves the construction of simple and understandable models for transport operators, focused on solving local problems that ensure a quick economic effect. To solve complex problems, you should create software systems consisting of independent and simple software modules.

Keywords: passenger transportation, urban route, mathematical model, decomposition, control automation.

Введение

Работа транспортных единиц на городских маршрутах регламентируется графиками движения. Составление графика требует обработки большого числа исходных данных и обоснованного решения задач нормирования времени кругорейса, распределения ресурсов транспортных единиц, закрепления транспортных единиц за маршрутами.

Известные в литературе постановки и решения на ЭВМ задач составления графиков движения выполнены без учета особенностей календарного планирования пассажирских перевозок как этапа единого процесса принятия управленческих решений.

Важнейшим вопросом автоматизации календарного планирования внутригородских пассажирских перевозок является выбор математических моделей, описывающих процесс принятия управленческих решений. Среди работ, посвященных общим методологическим проблемам построения математических моделей, следует выделить [1, 3]. Невысокая степень использования существующих моделей для решения практических задач транспортного планирования объясняется большой универсальностью (глобальностью) моделей, их сложностью и высокой стоимостью сбора исходных данных и проведения расчетов, недостаточней обозримостью для специалистов, ответственных за окончательное принятие решений.

Путь, на котором эта проблема может быть решена, предполагает построение простых и понятных для транспортников моделей, ориентированных: на решение задач локального характера, обеспечивающих быстрое получение экономического эффекта. Для решения задач комплексного характера следует создавать программные системы, состоящие из независимых и простых программных модулей. Важным является обеспеченно диалога между лицом, принимающим решение и электронно-вычислительной машиной.

Высказанные соображения соответствуют системному принципу разумной сложности моделей и должны лежать в основе разработки АСУ городским пассажирским транспортом.

При разработке математических моделей можно выделить три уровня исследования: макроскопический, стохастический и микроскопический [2].

На макроскопическом уровне система рассматривается как черный ящик. На основе корреляционного анализа статистических рядов получают усредненные детерминированные соотношения входных и выходных параметров. Среди таких моделей можно отметить уже упомянутые выше модели разделения маршрутов по рангам [6], модели определения дальности поездок [4, 5], объемов перевозок [6, 7], исследования скоростей движения транспортных единиц [8–10],

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-153-156

прогнозирования [11]. Несмотря на то, что модели этого типа подкупающе просты, они не могут использоваться в АСУ пассажирскими перевозками по причинам, указанным в [12] Н. Винером: "... долговременные статистические ряды, составленные при весьма изменчивых условиях, дают лишь кажущуюся, ложную точность. Современный аппарат теории малых выборок, как только он выходит за рамки простого подсчета своих собственных, специально определенных параметров и превращается в метод положительных статистических выводов для новых случаев уже не внушает мне никакого доверия".

Под математическими моделями второго уровня понимаются модели, построенные на основе теории систем массового обслуживания. Наибольшее распространение получили модели, рассматривающие маршрут городского пассажирского транспорта как систему массового обслуживания с пуассоновским потоком поступления заявок (интенсивностью пассажиропотока ***l)*** и интенсивностью обслуживания ***m*** [13–20]. В работе [21] маршрут рассматривается как одноканальная система массового обслуживания. Для определения времени ожидания пассажиров используются следующие параметры маршрута:

N – число транспортных единиц на маршруте;

l – интенсивность пассажиропотоков;

t – интервал движения транспортных единиц;

Ткр – время кругорейса;

C – средняя вместимость транспортной единицы;

L – длина маршрута;

A – средняя дальность поездки на маршруте.

Поступление заявок в системе является пуассоновским с интенсивностью ***l***. Время обслуживания распределено по произвольному закону с дисперсией ***D(t)***, интенсивностью обслуживания ***m*** и определяется выражением $m = (N * C * L)/(Tкр * A)$.

Математическое ожидание времени ожидания одного пассажира определяется на основе модели Поллачека – Хинчина [22], где $r = 1/m < 1. M(Тож) = (1 * D(T) + r)/(2 * l * <1 – r).$

Суммарное время ожидания всех пассажиров на отрезке времени ***T0*** составит $Tc = M(Тож) * l * T0.$ Среднее время ожидания пассажира при выполнении условия регулярности движения ***(t = const***)

$$T = (r^2 + l * t)/(2 * l * (1 - r)).$$

При отклонениях от графика с дисперсией ***D(T)*** среднее время ожидания

$$T = (r^2 + l * t + (l * VD + r^2)/t)/(2 * l * (1 - r)).$$

Следует отметить, что модели на основе теории систем массового обслуживания являются достаточно простыми и могут быть использованы при разработке АСУ городским пассажирским транспортом для описания отдельных сторон функционирования системы.

К моделям третьего уровня относят аналитические и алгоритмические модели, основанные на использовании общих методов и вычислительно-поисковых процедур математического программирования, а также методов теории расписаний [23]. Модели названного класса получили наиболее широкое распространение. Серьезные успехи достигнуты в области построения моделей формирования пассажирских транспортных потоков.

Сложность, случайный характер процессов в системе, ограниченное время для принятия решений обусловливает моделирование с использованием ЭВМ как единственный метод, позволяющий решать задачи управления транспортом. Разработанные модели, как правило, ориентированы на решение задач одного из следующих классов: проектирование структуры и ресурсов системы, календарное планирование и оперативное управление. Наиболее распространены в нашей стране и за рубежом математические модели проектирования маршрутных схем. Ведется интенсивная разработка моделей календарного планирования (составление графиков движения и расписаний).

Информационная технологическая модель управления

Необходимо разработать комплекс согласованных математических моделей, удовлетворяющий следующим общим требованиям:

– полный учет всех сторон деятельности системы и интересов всех составных частей;

– простота и понятность отдельных процедур принятия решений для лиц, принимающих в системе управленческие решения;

– возможность реализации алгоритмов существующими техническими средствами.

Конкретным специфическим для внутригородских пассажирских перевозок является требование учета перераспределения пассажиропотоков между маршрутами при изменении интервала движения транспортных единиц.

Решение перечисленных выше проблем можно найти путем:

– обобщения структуры ресурсов, работ и технологических процессов для построения общей информационной модели календарного планирования городского пассажирского транспорта;

– декомпозиции общей задачи на ряд задач достаточной для получения решения размерности;

– выбора критерия эффективности, свободного от издержек стоимостных оценок и учитывающего интересы пассажиров с одной стороны и транспортных предприятий с другой;

– учета перераспределения пассажиропотоков между маршрутами при построении комплекса согласованных математических моделей календарного планирования;

– уточнения расчетных методов получения данных о пассажиропотоках.

Целью автоматизации календарного планирования внутригородских пассажирских перевозок является получение графиков движения транспортных единиц по маршрутной сети города, обеспечивающих удовлетворение потребностей пассажиров в перевозках при минимальных затратах транспортных предприятий и городских структур.

Основные предпосылки для формулировки общей задачи календарного планирования пассажирских перевозок получаются через обобщение структуры ресурсов и технологических операций процесса перевозки пассажиров. Для такого обобщения выполняется анализ городского пассажирского транспорта как сложной системы. Система понимается как целостность, определяемая некоторой организующей общностью этого целого [1]. Организующей общностью являются в первую очередь: задача перевозки пассажиров в пределах города, общность средств выполнения задачи, исторически сложившаяся структура управления. Представление системы в виде компонент, между которыми выполнены некоторые отношения, является моделью, позволяющей понять и описать поведение системы. Модель системы в виде компонент и их отношений может быть представлена различными способами. Следует учесть, что городской пассажирский транспорт является подсистемой более общей системы "город".

Для постановки общей задачи календарного планирования внутригородских пассажирских перевозок наибольший интерес представляют параметрические связи компонент.

Транспортная сеть города характеризуется тремя основными группами параметров: условия движения, связность транспортной сети, обеспечивающая проезд между любыми двумя пунктами и наличие мест допустимых остановок транспортных единиц. К условиям движения относятся: покрытие улиц, интенсивность транспортных потоков, геометрия улиц, ограничения правил дорожного движения, включая перекрестки, светофоры, дорожные знаки, мосты, переезды и т. п. Интенсивность транспортных потоков и ограничения дорожного движения (светофоры, помехи) имеют случайный характер.

Характеристиками маршрутной сети являются:

– граф сети, определяющий номера маршрутов и перечень остановочных пунктов на каждом маршруте;

– координаты дуг и вершин графа на транспортной сети города;

– интенсивность появления пассажиров на остановке ***i*** с целью проезда к остановке ***j*** в зависимости от времени;

– координаты пунктов отстоя транспортных единиц;

– координаты пунктов контроля соблюдения графиков движения.

Следует отметить, что интенсивность пассажиропотоков имеет случайный характер и может быть оценена по среднему значению для множества реализаций в сходных условиях перевозок. Граф сети меняется как целенаправленно, так и случайным образом при незапланированных закрытиях транспортных магистралей.

Основными параметрами транспортных предприятий являются: число транспортных единиц и их типы, координаты предприятий на транспортной сети, мощность обслуживающих и ремонтных служб, финансовые возможности, число и квалификация водителей.

Транспортные единицы характеризуются вместимостью, требованиями к квалификации водителей, принадлежностью к транспортному предприятию, техническими характеристиками.

Характеристики пассажиропотоков проявляются через интенсивность появления пассажиров на остановочных пунктах маршрутов.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-153-156

Задача управления как целенаправленного процесса переработки информации в городском пассажирском транспорте может быть сформулирована в общем виде так (рисунок 1). На территории города имеются источники пассажирского спроса с интенсивностью ***Ai(t)*** и точки завершения поездок с интенсивностью ***Bj(t)***. Потребность в поездках от источников ***i*** к стокам ***j*** характеризуется матрицей пассажирских корреспонденций ***L[i, j, t]*** Перевозки могут осуществляться по транспортной сети города, на которой имеется множество путей от каждого источника к стоку ***S(i, j) = {s(i, j, k)}, k = 1…K(i, j)***. Зная характеристики транспортной сети и транспортных единиц, требуется найти такое множество путей транспортных единиц ***Pn(t),*** которое обеспечивало бы потребности в поездках минимальным числом ***N*** транспортных единиц.



Рисунок 1 – Общая информационная модель системы пассажирских перевозок

Сформулированная оптимизационная задача не может быть решена на глобальной модели в виду целого ряда причин. Кроме причин общего характера, а именно: необозримость внутренних связей модели с точки зрения разработчика; ограничения, накладываемые средствами вычислительной техники и системами программирования; ограниченность времени разработки, существует ряд специфических особенностей рассматриваемой системы, вызывающих необходимость декомпозиции управляющей структуры. Социальный характер системы приводит к ограничениям психологического типа. Определенный уровень профессиональной квалификации водителя, диспетчера (т. е. лица, принимающего решения в системе управления), ограниченные знания пассажиром территории города, возможности оперативной информации о пути следования транспортных единиц, естественно привели к выделению одного из уровней иерархии в управлении городским пассажирским транспортом – введении достаточно стабильной сети маршрутов ***M = {m}*** движения транспортных единиц. В связи с этим возникает задача маршрутизации, т. е. разработки сети маршрутов городского пассажирского транспорта. Частота принятия решений на этом уровне колеблется от нескольких лет до нескольких раз в год.

С введением маршрутов появляется возможность получения информации о числе вошедших в транспортную единицу на каждом остановочном пункте пассажиров ***Ai(t)*** и числе вышедших ***Bj(t).*** Полной информацией о пассажиропотоках является матрица межостановочных корреспонденций ***Xij(t).*** На основе этих данных и данных о числе транспортных единиц решается задача планирования работы транспортных единиц на маршрутах. Такая задача решается от сотен до нескольких тысяч раз в год.

Стохастические изменения пассажиропотоков ***DXij(t),*** технического состояния транспортных единиц ***DN*** и условий движения ***DM*** требуют введения еще одного уровня иерархии управления – оперативного диспетчерского управления. Его назначение – своевременная корректировка графиков движения.

Управление на третьем уровне иерархии производится в реальном масштабе времени, периодичность решения задач – десятки тысяч раз в год.

По числу информационных связей между собой и с внешними системами (например, "город"), по методам получения исходной информации и периодичности принятия управленчески: решений целесообразно выделить три уровня иерархии системы управления городским пассажирским транспортом: маршрутизация, календарное планирование, оперативное управление (рисунок 2).

Следует отметить, выбранное подразделение системы на иерархические уровни во многом соответствует сложившейся организации управления, однако в данном случае основным признаком подразделения является временной.

Иерархическая структура управления обладает рядом преимуществ по сравнению с централизованной. Можно отметить возможность разумного сочетания локальных критериев каждого уровня и глобального критерия системы в целом, значительное сокращение потоков информации на каждом уровне по сравнению с централизованной системой, увеличение надежности и гибкости системы о целом.

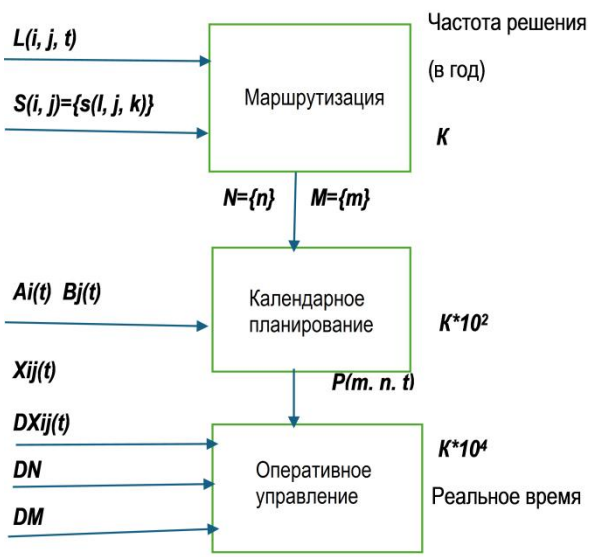


Рисунок 2 – Технологическая информационная модель управления городскими пассажирскими перевозками

Объектом дальнейшего рассмотрения является второй уровень иерархии в системе управления – календарное (текущее) планирование (рисунок 3).

По аналогии с традиционной задачей календарного планирования производства задачу планирования внутригородских пассажирских перевозок можно сформулировать следующим образом.

Имеется потребность в поездках по маршрутной сети города ***I(t),*** заданная матрицами межостановочных корреспонденций ***{Xijm(t)}***, где ***m*** – маршрут, ***i*** – номер начальной остановки, ***j*** – номер конечной остановки поездки, ***X*** – число пассажиров. Поездки выполняются на маршрутной сети ***{m}***.

Потребность в поездках удовлетворяется ***N*** транспортными единицами, каждая из которых ***n*** на маршруте ***m*** имеет производительность по снятию потребности ***Cnm*** за некоторую единицу времени. Определим такую последовательность выхода каждой транспортной единицы ***n*** на маршруте ***m*** в рейс ***r Tnmr***, чтобы суммарное время ожидания пассажиров было минимальным. Схематически задачу можно изобразить таким образом (рисунок 3):

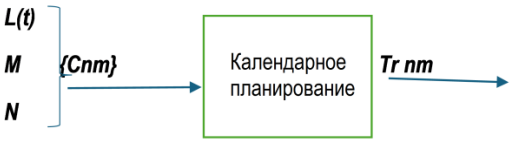


Рисунок 3 – Информационная технологическая модель задачи календарного планирования

Размерность такой задачи очень велика с точки зрения получения точного решения. Так, для города с миллионным населением число элементов матриц корреспонденций порядка К * 10^6, число координат векторов маршрутов – К * 10^3, число транспортных единиц – К * 10^3. Решение задачи точными методами невозможно.

Заключение

Несмотря на большую размерность, результаты решения должны быть получены в короткие сроки, задача должна решаться многократно для исправления графиков движения в связи с изменением ситуации. В силу описанных особенностей решение задачи календарного планирования внутригородских пассажирских перевозок следует искать на пути декомпозиции ее на ряд более простых, т. е. решения приближенными методами с использованием различных правил предпочтения.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-153-156

Список цитированных источников

1. Гвардейцев, М. И. Специальное математическое обеспечение управления / М. И. Гвардейцев, В. П. Морозов, В. А. Розенберг. – М. : Сов. радио, 1980. – 536 с.
2. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М. : Наука, 1978. – 400 с.
3. Советов, Б. Я. Моделирование систем : учебник для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – 7-е изд. – М. : Юрайт, 2025. – 343 с.
4. Мельников, В. П. Логистика : учебник для вузов / В. П. Мельников, А. Г. Схиртладзе, А. К. Антонюк ; под общ. ред. В. П. Мельникова. – М. : Юрайт, 2022. – 288 с.
5. Ольховский, С. Ю. Исследование и разработка методов совершенствования пассажирской транспортной системы города : автореф. дисс. … канд. техн. наук : 05.22.02 / Ольховский Сергей Юрьевич. – М. : ИКТП, 1983. – 22 с.
6. Кобзев, П. П. Моделирование объёмных показателей работы городского пассажирского транспорта / П. П. Кобзев // Моделирование процессов управления транспортными системами. – Владивосток, 1977. – С. 64–67.
7. Ярошевич, А. В. Состояние и перспективы автоматизации управления городским пассажирским транспортом / А. В. Ярошевич. – Брест, 1983. – 48 с.
8. Кравченко, Е. А. Исследование скоростей движения автобусов на городских и пригородных маршрутах : автореф. дисс. … канд. техн. наук : 05.02.11 / Кравченко Евгений Алексеевич ; МАДИ. – М., 1974. – 32 с.
9. Ярошевич, А. В. Программное обеспечение автоматизированной информационной системы специального назначения / А. В. Ярошевич // Проблемы создания и совершенствования технических и программных средств ЭВМ широкого применения. – Минск, 1982. – С. 126.
10. Чернышевский, П. В. К вопросу о нормировании скоростей движения городских автобусов / П. В. Чернышевский // Резервы повышения экономической эффективности работы автотранспортных предприятий. – Саратов, 1979. – С. 48–52.
11. Дармоян, П. А. Методы прогнозирования пассажирских перевозок / П. А. Дармоян, Н. Г. Кучевский. – Минск : Наука и техника, 1975. – 88 с.
12. Винер, Н. Кибернетика / Н. Винер. – 2-е изд.– М. : Сов. Радио, 1983. – 216 с.
13. Баскин, Э. М. О времени ожидания пассажира на автобусной остановке / Э. М. Баскин // Теория и средства автоматики. – М. : Наука, 1968.
14. Воркут, А. И. Моделирование процессов накапливания грузов и пассажиров в транспортных системах. / А. И. Воркут. – Киев : Знание, 1977. – 24 с.
15. Лопатин, А. П. Определение необходимого ресурса автомобилей-такси для удовлетворения заданной потребности в передвижении / А. П. Лопатин, Л. А. Мальгинов // Вопросы проектирования автоматизированных систем управления транспортом. – Омск, 1976. – С. 11–21.
16. Макаров, И. П. Автоматизация управления городским транспортом / И. П. Макаров, В. З. Ямпольский. – М. : Транспорт, 1981. – 152 с.
17. Половников, В. С. Вопросы проектирования автоматизированных систем управления транспортом / В. С. Половников, С. Ю. Ольховский // Вопросы проектирования автоматизированных систем управления транспортом. – Омск, 1976. – Вып. 2. – С. 82–89.
18. Раскин, Е. М. Аналитическая модель времени ожидания на маршрутизированном пассажирском транспорте / Е. М. Раскин // Вопросы проектирования автоматизированных систем управления транспортом. – Омск, 1976. – Вып. 2. – С. 90–96.
19. Ярошевич, А. В. Алгоритм распределения ресурсов в автоматизированной системе управления транспортом / А. В. Ярошевич. – Брест, 1985. – 8 с.
20. Ярошевич, А. В. Анализ системы и синтез информационной модели АСУ на этапе макропроектирования / А. В. Ярошевич // Проблемы разработки и эксплуатации автоматизированных систем управления на предприятиях радиотехнической, электронной, приборостроительной и машиностроительной продукции. – Могилев, 1981. – Ч. 2. – С. 144–145.
21. Глик, Ф. К. Обследование передвижений населения Минска / Ф. К. Глик // Городской транспорт. – Киев : Будівельник, 1976. – Вып. 3. – С. 39–54.
22. Саати, Т. Элементы теории массового обслуживания и ее применения / Т. Саати. – М. : Сов. Радио, 1971. – 520 с.
23. Дегтярев, Ю. М. Методы оптимизации / Ю. М. Дегтярев. – М. : Сов. Радио, 1980. – 270 с.

References

1. Gvardejcev, M. I. Special'noe matematicheskoe obespechenie upravleniya / M. I. Gvardejcev, V. P. Morozov, V. A. Rozenberg. – M. : Sov. radio, 1980. – 536 s.
2. Buslenko, N. P. Modelirovanie slozhnyh sistem / N. P. Buslenko. – M. : Nauka, 1978. – 400 s.
3. Sovetov, B. YA. Modelirovanie sistem : uchebnik dlya vuzov / B. YA. Sovetov, S. A. YAkovlev. – 7-e izd. – M. : YUrajt, 2025. – 343 s.
4. Mel'nikov, V. P. Logistika : uchebnik dlya vuzov / V. P. Mel'nikov, A. G. Skhirtladze, A. K. Antonyuk ; pod obshch. red. V. P. Mel'nikova. – M. : YUrajt, 2022. – 288 s.
5. Ol'hovskij, S. YU. Issledovanie i razrabotka metodov sovershenstvovaniya passazhirskoj transportnoj sistemy goroda : avtoref. diss. … kand. tekhn. nauk : 05.22.02 / Ol'hovskij Sergej YUr'evich. – M. : IKTP, 1983. – 22 s.
6. Kobzev, P. P. Modelirovanie ob"yomnyh pokazatelej raboty gorodskogo passazhirskogo transporta / P. P. Kobzev // Modelirovanie processov upravleniya transportnymi sistemami. – Vladivostok, 1977. – S. 64–67.
7. YAroshevich, A. V. Sostoyanie i perspektivy avtomatizacii upravleniya gorodskim passazhirskim transportom / A. V. YAroshevich. – Brest, 1983. – 48 s.
8. Kravchenko, E. A. Issledovanie skorostej dvizheniya avtobusov na gorodskih i prigorodnyh marshrutah : avtoref. diss. … kand. tekhn. nauk : 05.02.11 / Kravchenko Evgenij Alekseevich ; MADI. – M., 1974. – 32 s.
9. YAroshevich, A. V. Programmnoe obespechenie avtomatizirovannoj informacionnoj sistemy special'nogo naznacheniya / A. V. YAroshevich // Problemy sozdaniya i sovershenstvovaniya tekhnicheskih i programmnyh sredstv EVM shirokogo primeneniya. – Minsk, 1982. – S. 126.
10. CHernyshevskij, P. V. K voprosu o normirovanii skorostej dvizheniya gorodskih avtobusov / P. V. CHernyshevskij // Rezervy povysheniya ekonomicheskoj effektivnosti raboty avtotransportnyh predpriyatij. – Saratov, 1979. – S. 48–52.
11. Darmoyan, P. A. Metody prognozirovaniya passazhirskih perevozok / P. A. Darmoyan, N. G. Kuchevskij. – Minsk : Nauka i tekhnika, 1975. – 88 s.
12. Viner, N. Kibernetika / N. Viner. – 2-e izd.– M. : Sov. Radio, 1983. – 216 s.
13. Baskin, E. M. O vremeni ozhidaniya passazhira na avtobusnoj ostanovke / E. M. Baskin // Teoriya i sredstva avtomatiki. – M. : Nauka, 1968.
14. Vorkut, A. I. Modelirovanie processov nakaplivaniya gruzov i passazhirov v transportnyh sistemah. / A. I. Vorkut. – Kiev : Znanie, 1977. – 24 s.
15. Lopatin, A. P. Opredelenie neobhodimogo resursa avtomobilej-taksi dlya udovletvoreniya zadannoj potrebnosti v peredvizhenii / A. P. Lopatin, L. A. Mal'ginov // Voprosy proektirovaniya avtomatizirovannyh sistem upravleniya transportom. – Omsk, 1976. – S. 11–21.
16. Makarov, I. P. Avtomatizaciya upravleniya gorodskim transportom / I. P. Makarov, V. Z. YAmpol'skij. – M. : Transport, 1981. – 152 s.
17. Polovnikov, V. S. Voprosy proektirovaniya avtomatizirovannyh sistem upravleniya transportom / V. S. Polovnikov, S. YU. Ol'hovskij // Voprosy proektirovaniya avtomatizirovannyh sistem upravleniya transportom. – Omsk, 1976. – Vyp. 2. – S. 82–89.
18. Raskin, E. M. Analiticheskaya model' vremeni ozhidaniya na marshrutizirovannom passazhirskom transporte / E. M. Raskin // Voprosy proektirovaniya avtomatizirovannyh sistem upravleniya transportom. – Omsk, 1976. – Vyp. 2. – S. 90–96.
19. YAroshevich, A. V. Algoritm raspredeleniya resursov v avtomatizirovannoj sisteme upravleniya transportom / A. V. YAroshevich. – Brest, 1985. – 8 s.
20. YAroshevich, A. V. Analiz sistemy i sintez informacionnoj modeli ASU na etape makroproektirovaniya / A. V. YAroshevich // Problemy razrabotki i ekspluatacii avtomatizirovannyh sistem upravleniya na predpriyatiyah radiotekhnicheskoj, elektronnoj, priborostroitel'noj i mashinostroitel'noj produkcii. – Mogilev, 1981. – CH. 2. – S. 144–145.
21. Glik, F. K. Obsledovanie peredvizhenij naseleniya Minska / F. K. Glik // Gorodskoj transport. – Kiev : Budivel'nik, 1976. – Vyp. 3. – S. 39–54.
22. Saati, T. Elementy teorii massovogo obsluzhivaniya i ee primeneniya / T. Saati. – M. : Sov. Radio, 1971. – 520 s.
23. Degtyarev, YU. M. Metody optimizacii / YU. M. Degtyarev. – M. : Sov. Radio, 1980. – 270 s.

Материал поступил 09.12.2025, одобрен 30.12.2025, принят к публикации 06.01.2026

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 628.2+556.5

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРОДСКИХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ СТОЧНЫХ ВОД НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Ю. И. Ахмадиева[1], Е. Н. Басалай[2]

[1] Начальник отдела нормирования воздействия на окружающую среду, РУП «ЦНИИКИВР», Минск, Беларусь, e-mail: 7069760@gmail.com
[2] К. г. н., докторант, Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: basalaiekaterina@yandex.ru

Реферат

В соответствии с действующим в Беларуси законодательством, очистные сооружения сточных вод населенных пунктов представляют собой комплекс водохозяйственных сооружений и устройств, предназначенный для очистки сточных вод и обработки осадка [1]. Согласно СТБ 17.06.02-03-2015, к группе очистных сооружений городских сточных вод относят сооружения, предназначенные для очистки хозяйственно-бытовых сточных вод либо их смеси с производственными и поверхностными [2]. В условиях совместного отведения и очистки производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод населенных пунктов Беларуси городские очистные сооружения являются основными «поставщиками» загрязняющих веществ в окружающую среду [3, 4].

В статье приведен анализ городских очистных сооружений сточных вод населенных пунктов Беларуси как наиболее значимых с точки зрения воздействия на окружающую среду объектов по очистке сточных вод. Рассмотрены городские очистные сооружения 115 городов Беларуси, выполнена их дифференциация по приуроченности к типам городов согласно СН 3.01.03.2020 [5], типизация по протяженности (согласно Водному кодексу [6]) и приуроченности к бассейнам рек (по рекам-приемникам очищенных сточных вод).

Представлены результаты ранжирования городских очистных сооружений сточных вод населенных пунктов Беларуси по периодам их ввода в эксплуатацию и последней реконструкции в разрезе 7 периодов с шагом в 10 лет. Охарактеризованы основные наиболее распространенные технические решения, реализуемые в рамках реконструкции городских очистных сооружений сточных вод населенных пунктов. Представлены результаты анализа особенностей эксплуатации городских очистных сооружений сточных вод населенных пунктов в условиях Беларуси.

Ключевые слова: очистные сооружения сточных вод населенных пунктов, сточные воды, бассейны рек, численность населения.

GEOECOLOGICAL AND TECHNICAL FEATURES OF OPERATION OF URBAN WASTEWATER TREATMENT PLANTS OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Y. I. Akhmadziyeva, K. M. Basalai

Abstract

According to the legislation in force in Belarus, wastewater treatment plants of populated areas represent a complex of water management facilities and equipment designed for wastewater treatment and sludge processing [1]. According to STB 17.06.02-03-2015, the group of urban wastewater treatment plants includes facilities intended for the treatment of domestic wastewater or its mixture with industrial and surface wastewater [2]. Under conditions of combined discharge and treatment of industrial and domestic wastewater from settlements in Belarus, urban wastewater treatment plants are the main sources of pollutants entering the environment [3, 4].

The article provides an overview of urban wastewater treatment plants in Belarus as the most environmentally significant wastewater treatment facilities. Wastewater treatment plants in 115 cities of Belarus were analyzed and classified according to city types in accordance with SN 3.01.03.2020 [5]. They were also categorized by river length (in accordance with the Water Code [6]) and by river basin (based on the receiving rivers of treated wastewater).

The results of ranking urban wastewater treatment plants in settlements of Belarus by the period of their commissioning and the period of their most recent reconstruction are presented for seven time intervals with a 10-year step. The most common technical solutions implemented during the reconstruction of urban wastewater treatment plants in settlements are described. The results of the analysis of features of the operation of urban wastewater treatment plants in Belarus are also presented.

Keywords: urban wastewater treatment plants, wastewater, river basins, population size.

Введение

Городские очистные сооружения являются неотъемлемой часть инфраструктуры современного города, функционирование позволяет снизить техногенные химические нагрузки городов на поверхностные воды и окружающую среду в целом [7]. Вместе с тем, в силу несовершенства применяемых технологий очистки, очищенные сточные воды городов являются источниками загрязнения природной среды и ее компонентов [8, 9]. Недостаточная очистка городских сточных вод – одна из экологических проблем современности, актуальная как для Республики Беларусь, так и для зарубежных стран [7, 10]. Учитывая актуальность и важность проблем, обусловленных сбросом недостаточно очищенных сточных вод в окружающую среду, в том числе в поверхностные водные объекты, вопросам эффективной работы очистных сооружений и очистки сточных вод в Республике Беларусь на национальном и международном уровнях уделяется особое внимание.

Беларусь является участником международных конвенций, в том числе Конвенции Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер 1992 г. [11]. В рамках указанной Конвенции действует Протокол по проблемам воды и здоровья, направленный на содействие на всех соответствующих уровнях, т. е. в общегосударственном масштабе, а также в трансграничном и международном контексте, охране здоровья и благополучия человека как на индивидуальной, так и на коллективной основе, в рамках устойчивого развития путем совершенствования управления водохозяйственной деятельностью, включая охрану водных экосистем, и предотвращения, ограничения и сокращения степени распространения заболеваний, связанных с водой [12].

На национальном уровне вопросы эффективной очистки сточных вод и рационального (устойчивого) использования водных ресурсов

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-157-165

нашли отражение в нормативных и технических нормативных правовых актах, таких как Указы Президента Республики Беларусь, Законы Республики Беларусь, постановления Совета Министров Республики Беларусь, постановления и приказы уполномоченных государственных органов в пределах их компетенции.

В настоящее время взамен действующего Закона Республики Беларусь от 24 июня 1999 г. № 271-З «О питьевом водоснабжении» подготовлен проект Закона Республики Беларусь «О питьевом водоснабжении и водоотведении (канализации)», который принят депутатами Палаты представителей во втором чтении и одобрен на заседании четвертой сессии Совета Республики. Таким образом, действующий Закон, устанавливающий правовые основы питьевого водоснабжения, дополнен новой сферой регулирования, посвященной вопросам водоотведения (канализации), в том числе очистки сточных вод.

Цель работы – проанализировать геоэкологические и технические особенности эксплуатации городских очистных сооружений сточных вод населенных пунктов Беларуси.

Задачи:

1) распределить городские очистные сооружения сточных вод по группам (типам) городов с различной численностью населения;

2) распределить городские очистные сооружения сточных вод населенных пунктов со сбросом сточных вод в поверхностные водные объекты (далее – городские ОССВНП) по бассейнам рек с учетом типов (групп) городов;

3) установить приуроченность городских ОССВНП к рекам-приемникам различной величины в разрезе Республики Беларусь в целом и в разрезе административно-территориальных единиц (областей);

4) ранжировать городские ОССВНП Беларуси по периодам их ввода в эксплуатацию и по срокам их последней реконструкции;

5) обозначить основные технические решения, реализуемые в рамках реконструкции городских ОССВНП.

Материалами для выполнения работы послужили данные государственного водного кадастра Республики Беларусь, картографические, энциклопедические и литературные источники [13–16].

Результаты исследования и их обсуждение

По данным государственного водного кадастра Республики Беларусь [13] за период с 2020 по 2024 гг. в поверхностные водные объекты сброшено 5,56 млн м^3 сточных вод, из них 12,5 тыс. м^3 или 0,22 % представлено недостаточно очищенными сточными водами. Данные о ежегодном объеме сброса сточных вод в поверхностные водные объекты Беларуси, в том числе количестве недостаточно очищенных сточных вод за период 2020–2024 гг., представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Объемы сброса сточных вод в 2020–2024 гг.

Показатель	Период				
	2020	2021	2022	2023	2024
Сброшено сточных вод в поверхностные водные объекты, тыс. м^3	1037,83	1133,949	1119,438	1130,476	1136,372
из них с превышением нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ*	2,67 0,26	2,342 0,21	2,811 0,25	1,515 0,13	3,118 0,27

*В числителе указаны значения в тыс. м^3, в знаменателе – в %.

Из таблицы 1 следует, что за период 2020–2024 гг. доля недостаточно очищенных сточных вод в общем объеме сточных вод, сброшенных в поверхностные водные объекты Беларуси, изменялась от минимального значения – 0,13 % в 2023 г. до максимального – 0,27 % в 2024 г. и в среднем составила 0,22 %.

Следует отметить, что в структуре сброса сточных вод в разрезе видов экономической деятельности основная доля сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водные объекты, традиционно приходится на секцию Е «Водоснабжение; сбор, обработка и удаление отходов, деятельность по ликвидации загрязнений» – организации водопроводно-канализационного хозяйства (далее – ВКХ) и жилищно-коммунального хозяйства (далее – ЖКХ), в эксплуатационном ведении которых находятся очистные сооружения сточных вод населенных пунктов [17–20]. Например, за 2024 г. организациями ВКХ и ЖКХ в поверхностные водные объекты сброшено 553,6 млн м^3 сточных вод или 48,72 % от общего объема сброшенных в поверхностные водные объекты Беларуси сточных вод (таблица 2).

Таблица 2 – Объемы сброса сточных вод в поверхностные водные объекты на территории Беларуси за 2024 год в разрезе видов экономической деятельности в соответствии с ОКРБ 005-2011 [21]

Название вида экономической деятельности	Сброшено сточных вод в поверхностные водные объекты, тыс. м^3	Доля от общего объема сброса сточных вод в поверхностные водные объекты, %
A – Сельское, лесное и рыбное хозяйство	188557,975	16,59
B – Горнодобывающая промышленность	3945,049	0,35
C – Обрабатывающая промышленность	105977,859	9,33
D – Снабжение электроэнергией, газом, паром, горячей водой и кондиционированным воздухом	145214,889	12,78
E – Водоснабжение; сбор, обработка и удаление отходов, деятельность по ликвидации загрязнений	553609,158	48,72
F – Строительство	56315,117	4,96
G – Оптовая и розничная торговля; ремонт автомобилей и мотоциклов	445,405	0,04
H – Транспортная деятельность, складирование, почтовая и курьерская деятельность	12779,004	1,12
I – Услуги по временному проживанию и питанию	152,975	0,01
J – Информация и связь	157,7	0,01
K – Финансовая и страховая деятельность	1	0,00
L – Операции с недвижимым имуществом	189,777	0,02
M – Профессиональная, научная и техническая деятельность	1332,689	0,12
N – Деятельность в сфере административных и вспомогательных услуг	65141,294	5,73
O – Государственное управление	44,694	0,00
P – Образование	60,816	0,01
Q – Здравоохранение и социальные услуги	251,881	0,02
R – Творчество, спорт, развлечения и отдых	2192,75	0,19
S – Предоставление прочих видов услуг	0	0,00

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-157-165

Из представленных в таблице 2 данных следует, что наибольший объем сточных вод, сброшенных в поверхностные водные объекты за 2024 г., приходится на секцию E «Водоснабжение; сбор, обработка и удаление отходов, деятельность по ликвидации загрязнений» – 48,72 %, за ней следует секция A «Сельское, лесное и рыбное хозяйство», доля сброса которой составляет 16,59 %, что в 2,9 раз меньше, чем доля секции E. Далее следуют секция D «Снабжение электроэнергией, газом, паром, горячей водой и кондиционированным воздухом» – 12,78 % и секция C «Обрабатывающая промышленность», доля которой составляет 9,33 %.

Сброс сточных вод в поверхностные водные объекты от организаций, относящихся к остальным видам деятельности значительно ниже и в общем объеме составляет от 0 % (секции K «Финансовая и страховая деятельность», O «Государственное управление», S «Предоставление прочих видов услуг») до 5,73 % (секция N «Деятельность в сфере административных и вспомогательных услуг»).

Таким образом, учитывая значительные объемы сточных вод, ежегодно сбрасываемых организациями ВКХ и ЖКХ, относящимися в соответствии с Общегосударственным классификатором ОКРБ 005-2011 «Виды экономической деятельности» [21] к секции E «Водоснабжение; сбор, обработка и удаление отходов, деятельность по ликвидации загрязнений», в качестве объекта исследования приняты городские ОССВНП биологической очистки в искусственных условиях со сбросом сточных вод в поверхностные водные объекты.

Согласно статистическому бюллетеню «Численность населения на 1 января 2025 г. и среднегодовая численность населения за 2024 г. по Республике Беларусь в разрезе областей, районов, городов, поселков городского типа», на 1 января 2025 г. в Беларуси насчитывается 115 городов [22]. Результаты ранжирования городов по численности населения в соответствии со строительными нормами Республики Беларусь СН 3.01.03-2020 «Планировка и застройка населенных пунктов» (далее – СН 3.01.03-2020) [5] и соответствующее им количество городских очистных сооружений сточных вод в городах разного типа представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Распределение городских очистных сооружений сточных вод по группам (типам) городов с различной численностью населения

Тип города в зависимости от численности населения	Численность населения в соответствии с СН 3.01.03-2020 [5]	Количество городских очистных сооружений сточных вод в городах разного типа
Крупнейший	более 700 000	1
Крупный	250 000–700 000	5
Большой	75 000–250 000	12
Средний	20 000–75 000	20
Малый	менее 20 000	77

Анализ таблицы 3 свидетельствует о том, что наибольшее количество городских очистных сооружений сточных вод эксплуатируется в малых (66,9 %) и средних (17,4 %) городах республики.

Следует отметить, что не во всех городах Беларуси очистка сточных вод централизованных систем водоотведения (канализации) осуществляется на городских ОССВНП. Например, городские сточные воды трех из двенадцати больших городов (гг. Новополоцк, Полоцк, Мозырь), двух из двадцати средних городов (гг. Светлогорск, Калинковичи), и двух из семидесяти семи малых городов (гг. Туров, Березовка), проходят очистку на очистных сооружениях сточных вод промышленных (как правило, градообразующих), предприятий. Городские сточные воды одного из семидесяти семи малых городов (Барань) направляются на городские ОССВНП г. Орши.

Помимо вышеизложенного, широкое распространение в Беларуси получили очистные сооружения сточных вод населенных пунктов биологической очистки в естественных условиях, подавляющее большинство которых представлено полями фильтрации [23]. Сброс очищенных сточных вод с таких городских очистных сооружений осуществляется в окружающую среду.

На рисунке 1 представлена дифференциация 115-ти городов Беларуси в зависимости от устройства централизованной системы водоотведения (канализации) в отношении очистки сточных вод и типа очистных сооружений.



Рисунок 1 – Распределение городов Беларуси в зависимости от способа очистки сточных вод и типа очистных сооружений

Из представленных на рисунке 1 данных следует, что в большинстве (75,7 %) городов очистные сооружения представлены городскими ОССВНП (биологической очистки в искусственных условиях со сбросом сточных вод в поверхностные водные объекты); в 17,4 % – полями фильтрации (городскими очистными сооружениями биологической очистки в естественных условиях со сбросом сточных вод в окружающую среду); в 6,1 % городов городские сточные воды проходят очистку на очистных сооружениях промышленных предприятий и в 0,9 % городов – на городских ОССВНП другого населенного пункта.

Сброс очищенных сточных вод с городских ОССВНП с биологической очисткой в искусственных условиях, как было сказано выше, осуществляется в поверхностные водные объекты. Поверхностные водные объекты – приемники сточных вод (далее – реки-приемники сточных вод) на территории Беларуси относятся к бассейнам пяти рек: Западной Двины, Западного Буга, Днепра, Немана и Припяти. В свою очередь рр. Неман, Западная Двина и Западный Буг относятся к бассейну Балтийского моря, а реки Днепр и Припять – к бассейну Черного моря.

В таблице 4 представлена дифференциация всех городских ОССВНП (88 шт.) по их принадлежности к бассейнам крупнейших рек Беларуси (по реке-приемнику очищенных сточных вод) с учетом типа города (по численности населения). Дифференциация выполнена с учетом данных реестра ОССВНП [14], Национального атласа Республики Беларусь [15] и гидрологической карты Республики Беларусь (1 : 500 000) [16].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-157-165

Таблица 4 – Приуроченность городских ОССВНП (без учета городских очистных сооружений с биологической очисткой на полях фильтрации) к бассейнам рек с учетом типа города

№ п/п	Бассейн реки	Тип города	Название города, очистка сточных вод централизованных систем водоотведения (канализации) в котором осуществляется на городских ОССВНП
1	Западная Двина	крупный	Витебск
		малый	Браслав, Верхнедвинск, Городок, Дисна, Лепель, Новолукомль, Поставы, Сенно, Чашники
2	Западный Буг	крупный	Брест
		средний	Кобрин
		малый	Высокое, Жабинка, Каменец, Малорита, Пружаны
3	Днепр	крупнейший	Минск
		крупный	Гомель, Могилев
		большой	Бобруйск, Борисов, Жлобин, Орша
		средний	Горки, Жодино, Кричев, Осиповичи, Речица, Рогачев, Смолевичи
		малый	Березино, Быхов, Буда-Кошелево, Докшицы, Дубровно, Кировск, Костюковичи, Крупки, Логойск, Мстиславль, Толочин, Чаусы, Червень, Чериков, Чечерск, Шклов
4	Неман	крупный	Гродно
		большой	Лида, Барановичи, Молодечно
		средний	Вилейка, Волковыск, Дзержинск, Ивацевичи, Новогрудок, Слоним, Сморгонь
		малый	Воложин, Дятлово, Ивье, Ляховичи, Мосты, Мядель, Несвиж, Островец, Ошмяны, Свислочь, Скидель, Столбцы, Фаниполь, Щучин
5	Припять	большой	Пинск, Солигорск
		средний	Береза, Лунинец, Слуцк
		малый	Белоозерск, Ганцевичи, Дрогичин, Житковичи, Иваново, Копыль, Любань, Микашевичи, Петриков, Старые Дороги, Хойники



Рисунок 2 – Распределение городских ОССВНП Беларуси по бассейнам рек

Анализ таблицы 4 и рисунка 2 свидетельствуют о том, что распределение городских ОССВНП Беларуси по принадлежности к бассейнам рек неравномерно.

Из представленных на рисунке 2 данных следует, что основная доля рек-приемников сточных вод городских ОССВНП (34,1 %) относится к бассейну р. Днепр; 28,4 % – к бассейну реки р. Неман; 18,2 % – к бассейну р. Припять, 11,4 % – к бассейну р. Западная Двина и наименьшая доля, 8,0 % – к бассейну р. Западный Буг.

Реки-приемники сточных вод в соответствии с Водным кодексом Республики Беларусь [6] подразделяются на малые (протяженность от 5 до 200 км), средние (200–500 км) и большие (более 500 км). Так, к малым рекам-приемникам сточных вод городских ОССВНП относятся рр. Бася, Бобр, Ведьма, Верхняя Брагинка, Вихра, Воложинка, Вязынка, Гайна, Голбица, Гривда, Дитва, Дисна, Добысна, Довжица, Дорогобуж, Друйка, Дятловка, Жадунька, Ивенка, Лань, Лесная, Липа, Лоша, Мажа, Млынка, Мухавец, Мышанка, Мяделка, Науть, Негримовка, Оресса, Ошмянка, Проня, Пульва, Рдица, Рита, Россь, Рудавка, Случь, Спушанка, Струга, Удога, Уза, Улла, Уса, Уша, Цна, Черница и Югна; к средним – рр. Беседь, Вилия, Друть, Западная Березина, Ипуть, Остер, Птичь, Свислочь, Уборть, Щара, Ясельда; к большим – рр. Березина, Горынь, Днепр, Западная Двина, Западный Буг, Неман, Припять, Сож [6].

Распределение рек-приемников очищенных сточных вод с 88-ю городскими ОССВНП в соответствии с их протяженностью показано в разрезе областей и в целом по Беларуси на рисунке 3.



Рисунок 3 – Приуроченность городских ОССВНП к рекам-приемникам различной величины в разрезе Республики Беларусь в целом и административно-территориальных единиц (областей)

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-157-165

Анализ рисунка 3 свидетельствует о том, что для большинства городских ОССВНП Беларуси (69 %) приемниками очищенных сточных вод являются малые реки, что не характерно только для Гомельской области, где для 56 % городских ОССВНП реками-приемниками очищенных сточных вод являются большие реки (Березина, Днепр, Припять, Сож). Среди областей сброс сточных вод с городских ОССВНП в малые реки чаще всего осуществляется на территории Минской (81 %) и Брестской (78 %); наименьшая доля городских ОССВНП, расположенных на малых реках-приемниках сточных вод, характерна для Гомельской области (44 %). Необходимо отметить при этом, что малые реки характеризуются низкими значениями расходов вод и значительной протяженностью зоны достаточного (80 %) перемешивания речных и сточных вод, что затрудняет обеспечение необходимого уровня разбавления поступающих в них сточных вод и может способствовать ухудшению экологического состояния участков поверхностных водных объектов в зонах влияния очистных сооружений. В этой связи сброс недостаточно очищенных сточных вод, сточных вод без очистки либо аварийный сброс могут повлечь за собой негативные экологические последствия.

Объемы сточных вод, сброшенных в поверхностные водные объекты Беларуси с городских ОССВНП, по данным государственного водного кадастра [13] в разрезе речных бассейнов за 2024 г. представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Объемы сброса сточных вод с городских ОССВНП в поверхностные водные объекты Беларуси в разрезе речных бассейнов в 2024 году

Сброшено сточных вод	Бассейны рек				
	Днепр	Западная Двина	Западный Буг	Неман	Припять
Всего	528,174* / 46,5	145,842 / 12,8	63,497 / 5,6	204,392 / 18,0	194,465 / 17,1
из них:					
без превышения нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ	526,004 / 99,6	145,756 / 99,9	63,443 / 99,9	204,142 / 99,9	193,906 / 99,7
с превышением нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ	2,17 / 0,4	0,086 / 0,1	0,054 / 0,1	0,25 / 0,1	0,559 / 0,3

*В числителе указаны значения в тыс. м^3, в знаменателе – в %.

Анализ таблицы 5 свидетельствует о том, что наибольший объем сброса сточных вод (46,5 %) приходится на бассейн р. Днепр, далее сопоставимые доли объемов сброса приходятся на бассейны рр. Неман (18,0 %) и Припять (17,1 %), еще 12,8 % сброса сточных вод приходится на бассейн р. Западная Двина и наименьшая доля (5,6 %) – на бассейн р. Западный Буг.

Следует отметить, что процентное распределение объемов сброса сточных вод в разрезе речных бассейнов, рассчитанное по данным государственного водного кадастра [13] коррелирует с данными, полученными в ходе дифференциации городских ОССВНП по их принадлежности к бассейнам крупнейших рек Беларуси (таблица 4, рисунок 2).

Из представленных в таблице 5 данных также следует, что для трех из пяти речных бассейнов (бассейны рр. Западная Двина, Западный Буг и Неман) доля недостаточно очищенных сточных вод в общем объеме сброса по бассейну составляет 0,1 %, а для бассейнов рр. Припять и Днепр доля таких вод несколько выше и составляет 0,3 % и 0,4 %, соответственно.

Причины сброса недостаточно очищенных сточных вод с городских ОССВНП в поверхностные водные объекты зачастую обусловлены техническими особенностями их эксплуатации, основными из которых являются применение устаревших технологий, а также высокий физический износ сооружений и оборудования.

Большинство действующих городских ОССВНП были построены в соответствии со строительными нормами и правилами, введенными в действие несколько десятилетий назад, когда при проектировании учитывались только два показателя: биохимическое потребление кислорода (БПК) и взвешенные вещества. При этом не предусматривалась очистка от биогенных элементов. Согласно современным требованиям, необходима очистка от этих и других соединений [18].

Результаты ранжирования городских ОССВНП Беларуси по периоду их ввода в эксплуатацию с шагом в 10 лет представлены в виде картосхемы (рисунок 5) и круговой диаграммы (рисунок 4).

Анализ рисунков 4 и 5 свидетельствует о том, что большинство городских ОССВНП (62 %) введены в эксплуатацию за 20-летний период, с 1970 по 1989 гг.

В целях недопущения сброса недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты и обеспечения эффективного функционирования городских ОССВНП, организации ВКХ и ЖКХ, эксплуатирующие такие объекты, на постоянной основе проводят технические осмотры и обслуживание сооружений и оборудования, замену отдельных деталей и узлов. Однако при применении устаревших технологий очистки сточных вод выполнения планово-предупредительных мероприятий недостаточно: в таких случаях требуется проведение реконструкций (модернизаций), а иногда и строительства полного комплекса новых очистных сооружений взамен устаревших. Реализация вышеназванных мероприятий осуществляется за счет собственных средств организаций ВКХ и ЖКХ, средств местных и республиканского бюджетов.

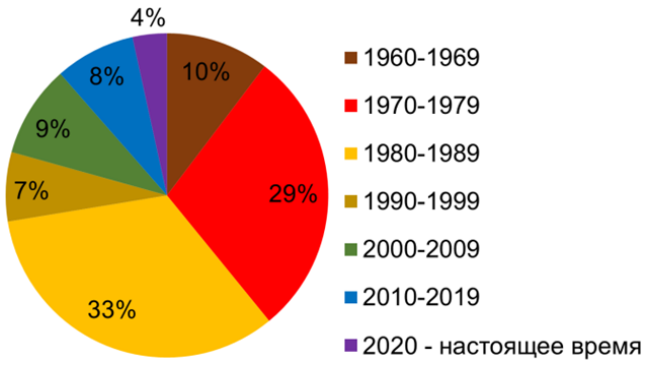


Рисунок 4 – Распределение городских ОССВНП Беларуси по периодам их ввода в эксплуатацию

Интенсификацией работ по строительству, реконструкции ОССВНП послужило внесение в государственную программу «Комфортное жилье и благоприятная среда» (далее – госпрограмма) на период 2021–2025 гг. целевого показателя «строительство, реконструкция 70 очистных сооружений сточных вод» [24]. В настоящее время в Беларуси реализуется госпрограмма на период 2026–2030 гг., которой предусмотрено возведение, реконструкция 39 очистных сооружений сточных вод до 2030 г. [25]. Таким образом, масштабные работы по реконструкции очистных сооружений сточных вод, в том числе городских ОССВНП, продолжатся и в текущей пятилетке.

Следующим этапом работы стало проведение ранжирования городских ОССВНП по периоду их реконструкции с шагом 10 лет, результаты которой представлены на рисунках 6 и 7. Если на городских ОССВНП не проводилась реконструкция, на картосхеме и диаграмме показан год их ввода в эксплуатацию.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-157-165

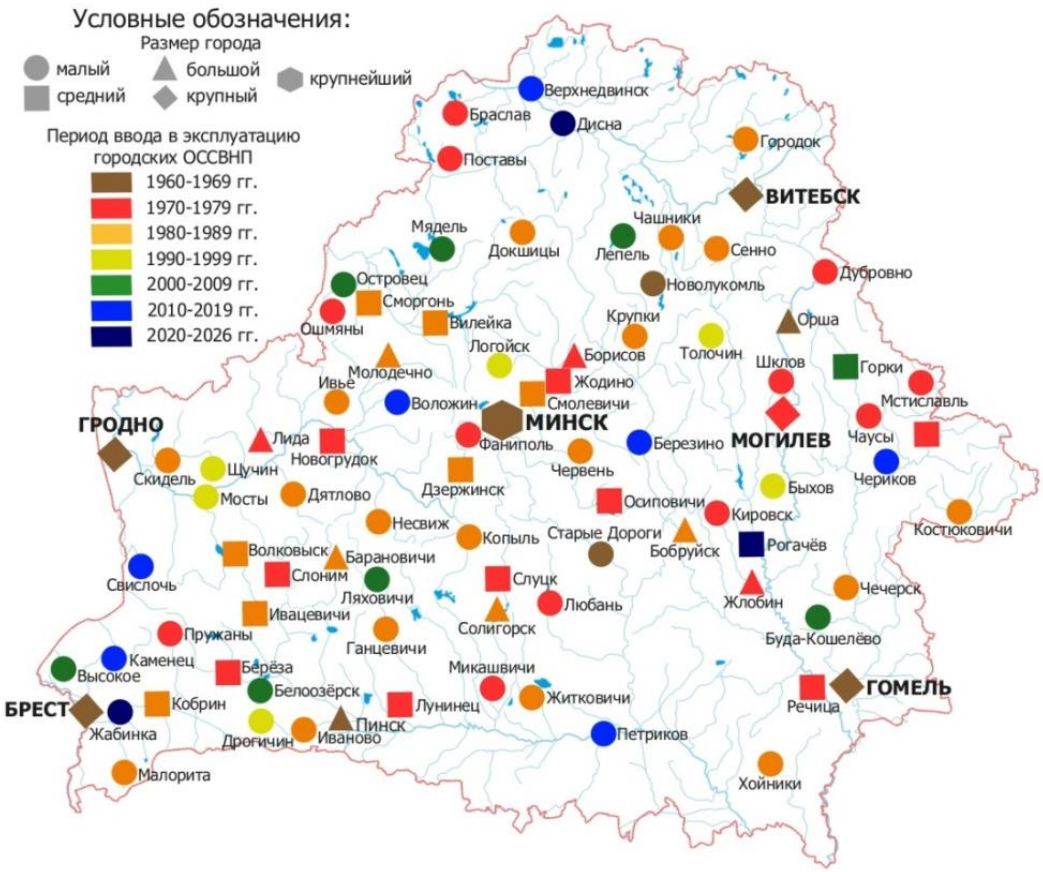


Рисунок 5 – Ранжирование городских ОССВНП Беларуси в зависимости от периода их ввода в эксплуатацию

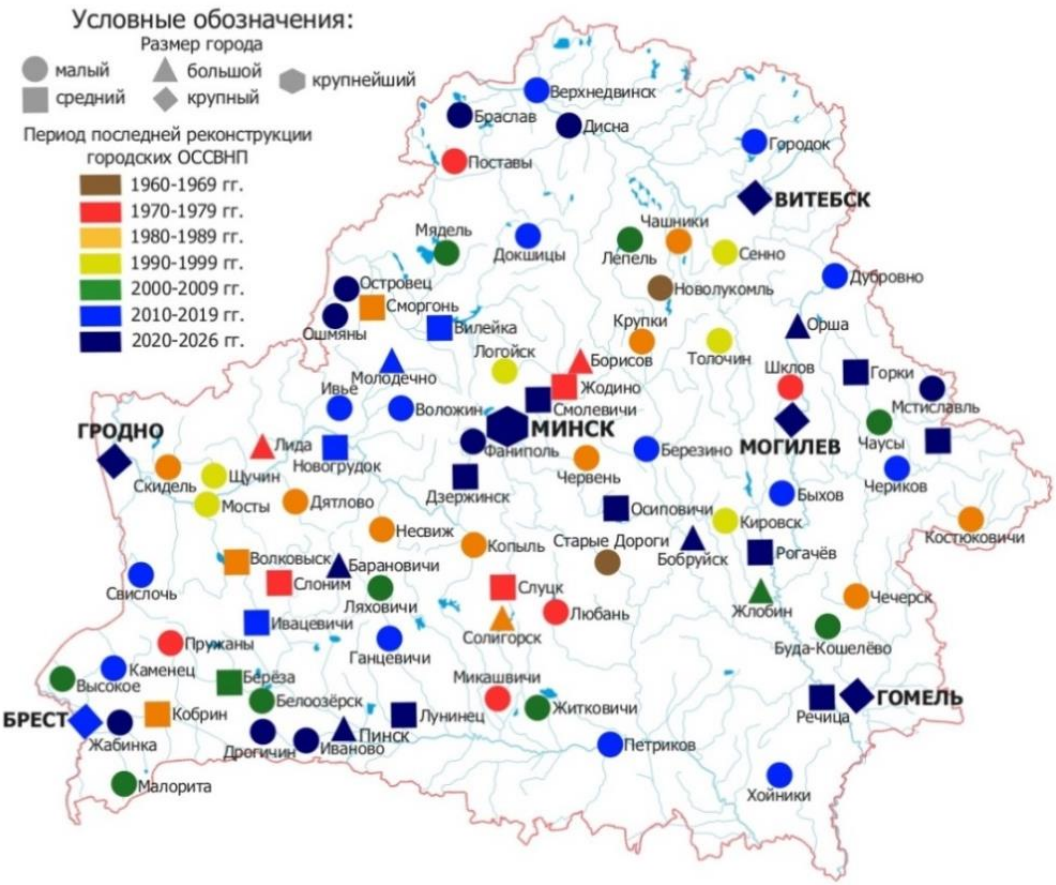


Рисунок 6 – Ранжирование городских ОССВНП Беларуси в зависимости от периода проведения последней реконструкции

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-157-165

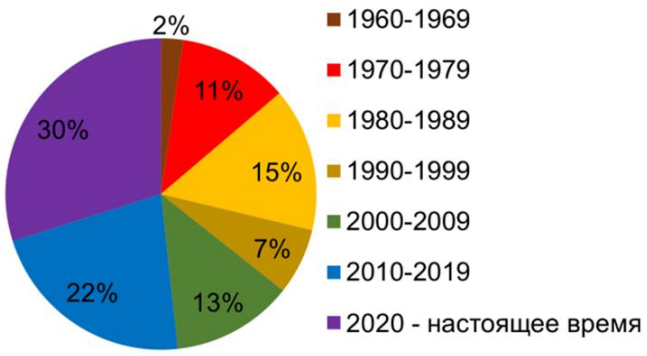


Рисунок 7 – Распределение городских ОССВНП Беларуси по срокам их последней реконструкции

Анализ рисунков 6 и 7 свидетельствует о том, что большинство (52 %) городских ОССВНП реконструированы в течение последних 15 лет.

Среди 10 % городских ОССВНП, построенных и введенных в эксплуатацию в 1960–1969 гг. (рисунок 6–7), реконструкция не проводилась на 2 % объектов; из 29 %, построенных и введенных в эксплуатацию в 1970–1979 гг. – на 11 %; из 33 %, построенных и введенных в эксплуатацию в 1980–1989 гг. – на 15 %. Основными техническими решениями, реализуемыми в рамках реконструкции городских ОССВНП, являются:

– переоборудование аэротенков в биологические реакторы с организацией анаэробной, аноксидной и аэробной зон для глубокого удаления азота и фосфора;

– модернизация систем аэрации, замена компрессорного и насосного оборудования, установка погружных мешалок в зонах дефосфотации и денитрификации;

– внедрение современных технологий обработки и утилизации осадков сточных вод;

– внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Развитие и разнообразие технологий очистки сточных вод на современном этапе позволяет учитывать особенности эксплуатации и находить решения для любых ОССВНП независимо от территориального расположения, климатических условий, специфики формирования качественного и количественного состава поступающих сточных вод [20]. При этом главной задачей для всех ОССВНП является снижение содержания загрязняющих веществ и показателей в процессе их очистки до нормативов сбросов сточных вод в поверхностные водные объекты [20].

Заключение

В Беларуси в 88 городах (из 115 имеющихся в настоящее время [22]) очистка сточных вод централизованных систем водоотведения (канализации) осуществляется на городских ОССВНП биологической очистки в искусственных условиях со сбросом сточных вод в поверхностные водные объекты.

Установлено, что распределение городских ОССВНП Беларуси по принадлежности к бассейнам рек неравномерно: основная доля рек-приемников сточных вод городских ОССВНП (34,1 %) относится к бассейну р. Днепр, 28,4 % – к бассейну реки р. Неман; 18,2 % – к бассейну р. Припять, 11,4 % – к бассейну р. Западная Двина и наименьшая доля, 8,0 %, к бассейну р. Западный Буг. Следует отметить, что процентное распределение объемов сброса сточных вод в разрезе речных бассейнов, рассчитанное по данным государственного водного кадастра [13] коррелирует с данными, полученными в ходе дифференциации городских ОССВНП по их принадлежности к бассейнам крупнейших рек Беларуси.

Анализ распределения рек-приемников очищенных сточных вод с 88-ми городскими ОССВНП в соответствии с их протяженностью в разрезе областей и в целом по Беларуси свидетельствует о том, что для большинства городских ОССВНП Беларуси (69 %) приемниками очищенных сточных вод являются малые реки, что не характерно только для Гомельской области, где для 56 % городских ОССВНП реками-приемниками очищенных сточных вод являются большие реки (Березина, Днепр, Припять, Сож). Среди областей сброс сточных вод с городских ОССВНП в малые реки чаще всего осуществляется на территории Минской (81 %) и Брестской (78 %); наименьшая доля городских ОССВНП, расположенных на малых реках-приемниках сточных вод, характерна для Гомельской области (44 %). В связи с особенностями малых рек (низкие расходы вод, большая по протяженности зона достаточного перемешивания речных и сточных вод, недостаточный уровень разбавления поступающих сточных вод и т. п.) сброс в них недостаточно очищенных сточных вод (либо аварийные сбросы) может привести к ухудшению экологического состояния участков поверхностных водных объектов в зонах влияния очистных сооружений.

Ранжирование городских ОССВНП Беларуси по периодам их ввода в эксплуатацию и последней реконструкции с шагом в 10 лет позволяет сделать следующие выводы:

– большинство городских ОССВНП (62 %) введены в эксплуатацию за 20-летний период, с 1970 по 1989 г.;

– большинство (52 %) городских ОССВНП реконструированы в течение последних 15 лет.

Внедрение в процессе реконструкций/модернизаций новых технологий очистки сточных вод с учетом особенностей эксплуатации ОССВНП позволит снизить содержание загрязняющих веществ до нормативов допустимых сбросов сточных вод в поверхностные водные объекты, и, соответственно, уменьшить негативное воздействие на компоненты природной среды.

Список цитированных источников

1. Об утверждении Правил пользования централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации) в населенных пунктах : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 30 сент. 2016 г. № 788 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600788 (дата обращения: 27.02.2026).
2. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Классификация очистных сооружений сточных вод : СТБ 17.06.02-03-2015. – Введ. 01.12.2015. – Минск : Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь. – 32 с.
3. Ахмадиева, Ю. И. Сравнительный анализ подходов к классификации очистных сооружений сточных вод населенных пунктов в Республике Беларусь и Российской Федерации / Ю. И. Ахмадиева, С. А. Дубенок // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 17–18 окт. 2024 г. / БНТУ ; редкол. : С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2024. – С. 139–146.
4. Басалай, Е. Н. Оценка вклада городских очистных сооружений в загрязнение поверхностных вод (на примере Брестской области) / Е. Н. Басалай // Природопользование. – 2019. – № 2. – С. 86–95.
5. Планировка и застройка населенных пунктов. Строительные нормы Республики Беларусь : СН 3.01.03.2020. – Введ. 27.11.20. – Минск. : Минстройархитектуры, 2023. – 63 с.
6. Водный кодекс Республики Беларусь : 30 апр. 2014 г. № 149-З : принят Палатой представителей 2 апреля 2014 г. : одобр. Советом Респ. 11 апр. 2014 г. : в ред. Закона Респ. Беларусь от 17 июля 2023 г. № 296-З // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=hk1400149 (дата обращения: 10.02.2026).
7. Басалай, Е. Н. Влияние городских очистных сооружений на природные воды и почвы / Е. Н. Басалай, В. С. Хомич ; Национальная академия наук Беларуси, Институт природопользования. – Минск : Беларуская навука, 2025. – 201 с.
8. Ясельда / И. В. Абрамова, Е. А. Антипова, М. А. Асадчая [и др.] ; под общ. ред. А. А. Волчека [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2017. – 416 с.
9. Ландшафтные воды в условиях техногенеза / О. В. Кадацкая, В. С. Хомич, Е. В. Санец [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2005. – 346 с.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-157-165

10. Ахмадиева, Ю. И. Возможность применения наилучших доступных технологий для повышения эффективности очистки сточных вод населённого пункта Республики Беларусь / Ю. И. Ахмадиева, С. А. Дубенок // Актуальные проблемы экологии : сб. науч. ст. / М-во образования Респ. Беларусь, ГрГУ им. Янки Купалы, Гродн. обл. ком. природ. ресурсов и охраны окр. среды ; редкол.: Н. З. Башун (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2023. – С. 20–22.
11. О присоединении Республики Беларусь к Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер : Указ Президента Респ. Беларусь от 21 апр. 2003 г. № 161 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/pdf/2003-49/2003-49(007-021).pdf (дата обращения: 23.01.2026)
12. О присоединении Республики Беларусь к Протоколу по проблемам воды и здоровья к Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и между народных озер 1992 года : Указ Президента Респ. Беларусь от 31 марта 2009 г. № 159 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/pdf/2009-136/2009-136(050-062).pdf (дата обращения: 20.01.2026)
13. Государственный водный кадастр Республики Беларусь : [сайт]. – URL: http://195.50.7.216:8081/watstat/data (дата обращения: 14.01.2025).
14. Ахмадиева, Ю. И. Реестр коммунальных очистных сооружений сточных вод, как основа для формирования наилучших доступных технических методов очистки сточных вод населенных пунктов / Ю. И. Ахмадиева, С. А. Дубенок // Актуальные вопросы эффективного и комплексного использования водных ресурсов : сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф., приуроч. к Всемирному дню водных ресурсов, Минск, 22–24 марта 2023 г. / Мин-во прир. рес. и охраны окр. среды, РУП «ЦНИИКИВР» ; отв. ред. О. В. Ковзунова. – Минск, 2023. – С. 127–130.
15. Национальный атлас Республики Беларусь. – Минск : Белкартография, 2024. – 317 с.
16. Республика Беларусь : [гидрологическая карта] / Респ. унитар. предприятие «Белкартография» ; разраб.: А. А. Волчек, Б. П. Власов, О. И. Грядунова; ред.: А. С. Малышева. – 1 : 500 000, 5 км в 1 см. – Минск : Белкартография, 2014. – 1 к.
17. Ахмадиева, Ю. И. Концепция наилучших доступных технологий и технологическое нормирование сбросов сточных вод на примере Российской Федерации / Ю. И. Ахмадиева, С. А. Дубенок // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве: сб. тр. / НАН Беларуси, Ин-т жилищ.-коммун. хоз-ва ; под общ. ред. В. О. Китикова. – Минск, 2024. – С. 9–16.
18. Ахмадиева, Ю. И. Перспективы разработки наилучших доступных технических методов очистки сточных вод населенных пунктов / Ю. И. Ахмадиева // Актуальные вопросы эффективного и комплексного использования водных ресурсов : сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф., приуроч. к Всемирному дню водных ресурсов, Минск, 20–21 марта 2025 г. / Мин-во прир. рес. и охраны окр. среды, РУП «ЦНИИКИВР» ; отв. ред. О. В. Ковзунова. – Минск, 2025. – С. 4–7.
19. Ахмадиева, Ю. И. Выбор технологических решений при строительстве и реконструкции очистных сооружений сточных вод населенных пунктов / Ю. И. Ахмадиева, С. А. Дубенок // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2022. – № 4. – С. 97–107.
20. Ахмадиева, Ю. И. Оценка применимости технологических показателей наилучших доступных технологий на очистных сооружениях смешанных (городских) сточных вод в условиях Беларуси / Ю. И. Ахмадиева, С. А. Дубенок // Природные ресурсы. – 2025. – № 1. – С. 69–78.
21. Об утверждении, введении в действие общегосударственного классификатора Республики Беларусь ОКРБ 005-2011 «Виды экономической деятельности» : Постановление Госуд. комитета по стандартиз. респ. Беларусь от 5 дек. 2011 г. № 85 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://schuchin.gov.by/uploads/files/ 000474_27020_.pdf (дата обращения: 26.01.2026).
22. Численность населения на 1 января 2025 г. и среднегодовая численность населения за 2024 год по Республике Беларусь в разрезе областей, районов, городов, поселков городского типа : статистический бюллетень – 2025 // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2025. – URL: https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/1fd/m8rjdl8603e7eza52sufglw21em8gdks.pdf (дата обращения: 15.02.2026).
23. Ахмадиева, Ю. И. Формирование национальных подходов к оценке технологий очистки сточных вод населенных пунктов на соответствие их наилучшим доступным техническим методам / Ю. И. Ахмадиева, С. А. Дубенок // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2025. – № 2 (137). – С. 86–93. – DOI: 10.36773 /1818-1112-2025-137-2-86-93.
24. О Государственной программе «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2021–2025 гг. : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 28 янв. 2021 г. № 50 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100050 (дата обращения: 28.02.2026).
25. О Государственной программе «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2026–2030 гг. : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 31 дек. 2025 г. № 818 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22500818 (дата обращения: 28.02.2026).

References

1. Ob utverzhdenii Pravil pol'zovaniya centralizovannymi sistemami vodosnabzheniya, vodootvedeniya (kanalizacii) v naselennyh punktah : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus' ot 30 sent. 2016 g. № 788 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600788 (data obrashcheniya: 27.02.2026).
2. Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Gidrosfera. Klassifikaciya ochistnyh sooruzhenij stochnyh vod : STB 17.06.02-03-2015. – Vved. 01.12.2015. – Minsk : Gosudarstvennyj komitet po standartizacii Respubliki Belarus'. – 32 s.
3. Ahmadieva, YU. I. Sravnitel'nyj analiz podhodov k klassifikacii ochistnyh sooruzhenij stochnyh vod naselennyh punktov v Respublike Belarus' i Rossijskoj Federacii / YU. I. Ahmadieva, S. A. Dubenok // Innovacionnye tekhnologii v vodnom, kommunal'nom hozyajstve i vodnom transporte : materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf., Minsk, 17–18 okt. 2024 g. / BNTU ; redkol. : S. V. Haritonchik [i dr.]. – Minsk, 2024. – S. 139–146.
4. Basalaj, E. N. Ocenka vklada gorodskih ochistnyh sooruzhenij v zagryaznenie poverhnostnyh vod (na primere Brestskoj oblasti) / E. N. Basalaj // Prirodopol'zovanie. – 2019. – № 2. – S. 86–95.
5. Planirovka i zastrojka naselennyh punktov. Stroitel'nye normy Respubliki Belarus' : SN 3.01.03.2020. – Vved. 27.11.20. – Minsk. : Minstrojarhitektury, 2023. – 63 s.
6. Vodnyj kodeks Respubliki Belarus' : 30 apr. 2014 g. № 149-Z : prinyat Palatoj predstavitelej 2 aprelya 2014 g. : odobr. Sovetom Resp. 11 apr. 2014 g. : v red. Zakona Resp. Belarus' ot 17 iyulya 2023 g. № 296-Z // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=hk1400149 (data obrashcheniya: 10.02.2026).
7. Basalaj, E. N. Vliyanie gorodskih ochistnyh sooruzhenij na prirodnye vody i pochvy / E. N. Basalaj, V. S. Homich ; Nacional'naya akademiya nauk Belarusi, Institut prirodopol'zovaniya. – Minsk : Belaruskaya navuka, 2025. – 201 s.
8. YAsel'da / I. V. Abramova, E. A. Antipova, M. A. Asadchaya [i dr.] ; pod obshch. red. A. A. Volcheka [i dr.]. – Minsk : Belarus. navuka, 2017. – 416 s.
9. Landshaftnye vody v usloviyah tekhnogeneza / O. V. Kadackaya, V. S. Homich, E. V. Sanec [i dr.]. – Minsk : Belarus. navuka, 2005. – 346 s.
10. Ahmadieva, YU. I. Vozmozhnost' primeneniya nailuchshih dostupnyh tekhnologij dlya povysheniya effektivnosti ochistki stochnyh vod naselyonnogo punkta Respubliki Belarus' / YU. I. Ahmadieva, S. A. Dubenok // Aktual'nye problemy ekologii : sb. nauch. st. / M-vo obrazovaniya Resp. Belarus', GrGU im. YAnki Kupaly, Grodn. obl. kom. prirod. resursov i ohrany okr. sredy ; redkol.: N. Z. Bashun (gl. red.) [i dr.]. – Grodno, 2023. – S. 20–22.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-157-165

11. O prisoedinenii Respubliki Belarus' k Konvencii po ohrane i ispol'zovaniyu transgranichnyh vodotokov i mezhdunarodnyh ozer : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 21 apr. 2003 g. № 161 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: https://pravo.by/pdf/2003-49/2003-49(007-021).pdf (data obrashcheniya: 23.01.2026)
12. O prisoedinenii Respubliki Belarus' k Protokolu po problemam vody i zdorov'ya k Konvencii po ohrane i ispol'zovaniyu transgranichnyh vodotokov i mezhdu narodnyh ozer 1992 goda : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 31 marta 2009 g. № 159 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: https://pravo.by/pdf/2009-136/2009-136(050-062).pdf (data obrashcheniya: 20.01.2026)
13. Gosudarstvennyj vodnyj kadastr Respubliki Belarus' : [sajt]. – URL: http://195.50.7.216:8081/watstat/data (data obrashcheniya: 14.01.2025).
14. Ahmadieva, YU. I. Reestr kommunal'nyh ochistnyh sooruzhenij stochnyh vod, kak osnova dlya formirovaniya nailuchshih dostupnyh tekhnicheskih metodov ochistki stochnyh vod naselennyh punktov / YU. I. Ahmadieva, S. A. Dubenok // Aktual'nye voprosy effektivnogo i kompleksnogo ispol'zovaniya vodnyh resursov : sb. materialov III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., priuroch. k Vsemirnomu dnyu vodnyh resursov, Minsk, 22–24 marta 2023 g. / Min-vo prir. res. i ohrany okr. sredy, RUP «CNIIKIVR» ; otv. red. O. V. Kovzunova. – Minsk, 2023. – S. 127–130.
15. Nacional'nyj atlas Respubliki Belarus'. – Minsk : Belkartografiya, 2024. – 317 s.
16. Respublika Belarus' : [gidrologicheskaya karta] / Resp. unitar. predpriyatie «Belkartografiya» ; razrab.: A. A. Volchek, B. P. Vlasov, O. I. Gryadunova; red.: A. S. Malysheva. – 1 : 500 000, 5 km v 1 sm. – Minsk : Belkartografiya, 2014. – 1 k.
17. Ahmadieva, YU. I. Koncepciya nailuchshih dostupnyh tekhnologij i tekhnologicheskoe normirovanie sbrosov stochnyh vod na primere Rossijskoj Federacii / YU. I. Ahmadieva, S. A. Dubenok // Nauchno-tekhnicheskij progress v zhilishchno-kommunal'nom hozyajstve: sb. tr. / NAN Belarusi, In-t zhilishch.-kommun. hoz-va ; pod obshch. red. V. O. Kitikova. – Minsk, 2024. – S. 9–16.
18. Ahmadieva, YU. I. Perspektivy razrabotki nailuchshih dostupnyh tekhnicheskih metodov ochistki stochnyh vod naselennyh punktov / YU. I. Ahmadieva // Aktual'nye voprosy effektivnogo i kompleksnogo ispol'zovaniya vodnyh resursov : sb. materialov III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., priuroch. k Vsemirnomu dnyu vodnyh resursov, Minsk, 20–21 marta 2025 g. / Min-vo prir. res. i ohrany okr. sredy, RUP «CNIIKIVR» ; otv. red. O. V. Kovzunova. – Minsk, 2025. – S. 4–7.
19. Ahmadieva, YU. I. Vybor tekhnologicheskih reshenij pri stroitel'stve i rekonstrukcii ochistnyh sooruzhenij stochnyh vod naselennyh punktov / YU. I. Ahmadieva, S. A. Dubenok // ZHurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya. – 2022. – № 4. – S. 97–107.
20. Ahmadieva, YU. I. Ocenka primenimosti tekhnologicheskih pokazatelej nailuchshih dostupnyh tekhnologij na ochistnyh sooruzheniyah smeshannyh (gorodskih) stochnyh vod v usloviyah Belarusi / YU. I. Ahmadieva, S. A. Dubenok // Prirodnye resursy. – 2025. – № 1. – S. 69–78.
21. Ob utverzhdenii, vvedenii v dejstvie obshchegosudarstvennogo klassifikatora Respubliki Belarus' OKRB 005-2011 «Vidy ekonomicheskoj deyatel'nosti» : Postanovlenie Gosud. komiteta po standartiz. resp. Belarus' ot 5 dek. 2011 g. № 85 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: https://schuchin.gov.by/uploads/files/000474_27020_.pdf (data obrashcheniya: 26.01.2026).
22. CHislennost' naseleniya na 1 yanvarya 2025 g. i srednegodovaya chislennost' naseleniya za 2024 god po Respublike Belarus' v razreze oblastej, rajonov, gorodov, poselkov gorodskogo tipa : statisticheskij byulleten' – 2025 // Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – Minsk, 2025. – URL: https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/1fd/m8rjdl8603e7eza52sufglw21em8gdks.pdf (data obrashcheniya: 15.02.2026).
23. Ahmadieva, YU. I. Formirovanie nacional'nyh podhodov k ocenke tekhnologij ochistki stochnyh vod naselennyh punktov na sootvetstvie ih nailuchshim dostupnym tekhnicheskim metodam / YU. I. Ahmadieva, S. A. Dubenok // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2025. – № 2 (137). – S. 86–93. – DOI: 10.36773 /1818-1112-2025-137-2-86-93
24. O Gosudarstvennoj programme «Komfortnoe zhil'e i blagopriyatnaya sreda» na 2021–2025 gg. : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus' ot 28 yanv. 2021 g. № 50 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100050 (data obrashcheniya: 28.02.2026).
25. O Gosudarstvennoj programme «Komfortnoe zhil'e i blagopriyatnaya sreda» na 2026–2030 gg. : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus' ot 31 dek. 2025 g. № 818 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22500818 (data obrashcheniya: 28.02.2026).

Материал поступил 11.03.2026, одобрен 18.03.2026, принят к публикации 18.03.2026

УДК 504.062.2(476)

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОГНОЗ

А. А. Волчек[1], В. В. Борушко[2]

[1] Д. г. н. РФ и РБ, профессор, профессор кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

[2] Магистр физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры физики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vadim79@tut.by

Реферат

В представленной статье изложены результаты комплексного моделирования распределения тепловых ресурсов для двух основных типов почвенного покрова Белорусского Полесья – торфяно-болотных и дерново-подзолистых почв. Работа выполнена в рамках проблематики адаптации землепользования к климатическим изменениям и направлена на количественную оценку термодинамических процессов в почвенной толще при варьируемых условиях осушения и прогнозируемом глобальном потеплении до 2035 года.

При этом в качестве регулирующих факторов учитывались:

- варьируемые уровни осушения (с дифференциацией заложения дренажа);
- прогнозируемые климатические изменения, обусловленные глобальным потеплением, на период до 2035 года.

Методологическая основа работы включает построение математических моделей, позволяющих рассчитать температурный профиль почвенных разрезов с учётом комплекса физико-химических и структурно-функциональных характеристик грунта, в том числе:

- теплофизических свойств грунтов (теплоемкость, теплопроводность);
- динамики теплопереноса в многослойных системах;
- внешних климатических воздействий (поток солнечной радиации, температура и влажность воздуха).

Результаты моделирования дали возможность:

- оценить изменения теплового режима почв при различных способах осушения;
- прогнозировать аккумуляцию тепловой энергии в почвенном профиле к 2035 году с учётом климатических изменений;
- оценить влияние на комбинированное воздействие мелиоративных мероприятий и климатических факторов на торфяно болотные и дерново подзолистые почвы.

Полученные данные расширяют научные представления о термодинамике почвенного покрова в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений, что позволяет оптимизировать управления водным режимом мелиорированных земель и планировать агротехнические мероприятия в условиях изменяющегося климата.

Ключевые слова: Белорусское Полесье, торфяно-болотная почва, дерново-подзолистая почва, мелиорация, температура, теплоёмкость, количество теплоты.

TEMPERATURE REGIME OF SOILS IN THE BELARUSIAN POLESIE: CURRENT STATE AND FORECAST

A. A. Volchak, V. V. Barushka

Abstract

This article presents the results of a comprehensive modeling of heat resource distribution for two main soil cover types in the Belarusian Polesie region: peat bog and soddy-podzolic soils. This work is part of the ongoing effort to adapt land use to climate change and aims to quantify thermodynamic processes in the soil under variable drainage conditions and projected global warming to 2035.

The following regulatory factors were considered:

- variable drainage levels (with differentiated drainage);
- projected climate changes due to global warming to 2035.

The methodological basis of the work includes the construction of mathematical models that allow for the calculation of the temperature profile of soil profiles, taking into account a range of physicochemical and structural-functional soil characteristics, including:

- soil thermophysical properties (heat capacity, thermal conductivity);
- heat transfer dynamics in multilayer systems;
- external climatic influences (solar radiation flux, air temperature, and humidity).

The modeling results made it possible to:

- assess changes in the thermal regime of soils under various drainage methods;
- predict thermal energy accumulation in the soil profile by 2035, taking into account climate change;
- assess the combined impact of reclamation measures and climatic factors on peat bog and soddy-podzolic soils.

The obtained data expand scientific understanding of soil thermodynamics under anthropogenic impact and climate change, allowing for the optimization of water management on reclaimed lands and the planning of agricultural practices in a changing climate.

Keywords: Belarusian Woodland, peat-bog soil, sod-podzolic soil, land reclamation, temperature, heat capacity, amount of heat.

Введение

Полесье является уникальным природным комплексом и требует к себе бережного отношения. Белорусское Полесье располагается в пределах Брестской и Гомельской областей, с площадью осушенных земель 7315,9 и 1415,5 тыс. га соответственно. Это составляет примерно 19 % всех земель этих областей [1], основная часть которых находится на территории Белорусского Полесья.

Массовое освоение Белорусского Полесья началось после принятия в 1966 году государственной программы «О широком развитии мелиорации для получения высоких устойчивых урожаев зерновых и других культур» в связи с тем, что идея решения проблемы продовольственной безопасности целинных земель не оправдала себя. Реализовать эту идею было решено за счёт мелиорации центральной части нечернозёмной зоны Полесья и в 1970 году мелиорация земель Белорусского Полесья была объявлена Всесоюзной ударной комсомольской стройкой. В Полесье были направлены большие деньги и квалифицированные специалисты, что позволило улучшить инфраструктуру края, освоить новые земли и сохранить этот уникальный край.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-166-173

Постепенно проявились слабые стороны проекта, обусловленные отставанием научной составляющей от практических действий, что привело к нежелательным последствиям. Своевременная разработка стратегического плана помогла бы снизить риски негативных последствий. В частности, спрямление рек, использование мелкозалежных торфяников под пропашные культуры, сброс вековых запасов грунтовых вод, укрупнение полей без учёта конкретных локальных свойств.

В результате сброса древних водных запасов природного происхождения, произошло нарушение теплового баланса верхнего горизонта почвы. Эта проблема усилилась и современным потеплением климата, поэтому для получения высоких устойчивых урожаев, необходима реконструкция существующих мелиоративных систем на осушительно-увлажнительные, оросительные, системы капельного орошения.

Тепловой и водно-воздушный режимы почв являются факторами, которые в значительной степени определяют зачастую сельскохозяйственную продуктивность земель. Продуктивность земель в первую очередь связывают с внесением необходимых удобрений, использовании новых сортов, борьбой с сорной растительностью и т. д. [2, 3, 4]. В процессе осушения территорий вопросам регулирования микроклимата уделяется недостаточно внимания. Согласно концепции В. Р. Вильямса, целью осушения является снижение избыточной влажности почвы до уровня, который обеспечивает оптимальные водный, воздушный, тепловой, микробиологический и пищевой режимы почвы.

Одним из основополагающих факторов обеспечения продовольственной безопасности выступает увеличение общего объёма производства сельскохозяйственной продукции. Для реализации этой задачи требуется расширить площадь обрабатываемых земель и повысить продуктивность сельскохозяйственных культур. Однако решение первого вопроса может быть проблематичным, так как требует значительных инвестиций и усилий со стороны государства и частного сектора. В связи с этим основное внимание следует уделить повышению урожайности уже используемых сельскохозяйственных земель.

Одним из главных факторов, способствующих повышению урожайности, наряду с качеством семян и применением удобрений, является обеспечение оптимального водно-воздушного и теплового режима в почвах сельскохозяйственных угодий. Эти факторы играют важную роль в определении продуктивности земель и, следовательно, в обеспечении продовольственной безопасности.

Микроклимат осушенных территорий характеризуется особыми условиями температуры, влажности и освещённости, которые могут влиять на рост и развитие сельскохозяйственных культур. Поэтому при разработке стратегий повышения урожайности необходимо учитывать не только традиционные методы, но и особенности микроклимата осушенных земель.

Таким образом, поддержание оптимального теплового и водно-воздушного режимов почв является необходимым условием для повышения урожайности и обеспечения продовольственной безопасности страны.

В последние десятилетия на территории Европы, включая Беларусь, наблюдается изменение климатических условий. Одним из наиболее заметных проявлений этого процесса является увеличение температуры воздуха во все месяцы года. Эти изменения оказывают значительное влияние на эффективность сельскохозяйственного производства, особенно в период вегетации растений. Агроклиматические характеристики, включая температуру воздуха, уровень осадков, влажность почвы и прочие параметры, обуславливают условия для роста и развития сельскохозяйственных растений.

Данные изменения наиболее выражены на территории Белорусского Полесья, отличающейся максимальным уровнем теплообеспеченности и продолжительностью вегетационного периода среди всех регионов Беларуси. Это связано с географическим положением региона, который находится в зоне с более тёплым климатом.

Таким образом, изменение климата оказывает существенное влияние на сельское хозяйство Беларуси, требуя адаптации к новым условиям и разработки новых подходов к управлению сельскохозяйственными ресурсами. Важно учитывать агроклиматические изменения при планировании и реализации сельскохозяйственных мероприятий, чтобы обеспечить высокую продуктивность и устойчивость аграрного сектора.

В обозримом будущем расширение сельскохозяйственных угодий не представляется вероятным, поэтому одним из приоритетных направлений видится интенсификация урожайности. Ключевым фактором её повышения, наряду с качеством семян и применением удобрений, является количество тепловой энергии, поступающей к поверхности почвы, а также уровень влагообеспеченности корнеобитаемого слоя.

Характер изменения теплового режима осушенных и неосушенных территорий имеет различную структуру и определяется как климатическими факторами, так и степенью мелиорированности [5, 6]. Прежде всего, происходит изменение коэффициента теплопроводности, диапазон значений которого составляет от 0,1 Вт/(м·К) для сухого торфа до 0,5 Вт/(м·К) для [7]. Благодаря более высокой теплопроводности нижние слои влажной почвы прогреваются интенсивнее и дольше сохраняют тепло при понижении температуры атмосферного воздуха.

В связи с наличием воды влажная почва имеет более высокую теплоёмкость по сравнению с осушенной. Это означает, что для нагрева влажной почвы требуется большее количество теплоты, а при остывании она медленнее отдаёт тепло.

Основным источником тепла является лучистая энергия солнца. Поглощаемая почвой, она превращается в тепловую, которая передаётся в нижние горизонты либо возвращается в атмосферу соответственно посредством явления теплопроводности или теплового излучения и отражения [8]. Разность поглощаемой и излучаемой энергий представляет собой энергию, которая идёт на нагревание земной поверхности. При возрастании градиента температур между верхними и нижними слоями почвы, большее количество тепла уходит вниз [9].

Поглощение почвой тепловой энергии имеет предел, определяемый её теплоёмкостью. В силу того, что процесс теплопередачи от верхних слоёв к нижним идёт довольно медленно, избыточная энергия будет дополнительно отражаться в окружающую среду. Вследствие нагрева приземный воздух становится более тёплым и перемещается в зоны с более низким давлением. В результате этого процесса воздушные массы переносят тепловую энергию с осушенных участков [10].

Установление закономерностей изменения микроклимата при мелиорации земель, и прогноз его изменений является одной из важных задач земледелия.

Цель данного исследования заключается в анализе закономерностей, определяющих тепловой режим мелиорированных дерново-подзолистых и торфяно-болотных почв Белорусского Полесья в современных условиях, а также в оценке возможных изменений этого режима до 2035 года в контексте глобального потепления. Это представляет собой одну из ключевых задач в области земледелия.

Материалы и методы исследования

Методологической основой исследования является решение уравнения радиационного баланса, определяющего тепловой режим почв. В свою очередь, радиационный баланс основывается на законе сохранения энергии, который учитывает изменения и превращения энергии на конкретном участке почвы. На рисунке 1 приведена схема теплообмена между земной поверхностью и окружающей средой [11].

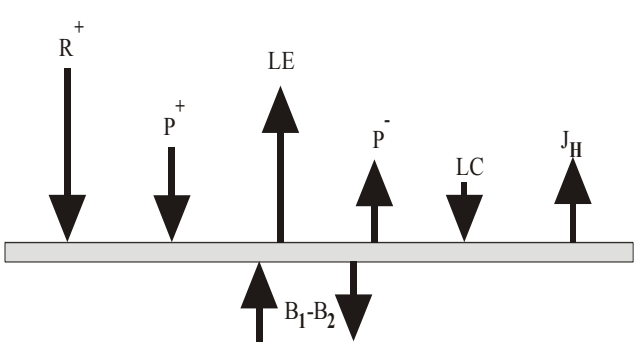


Рисунок 1 – Схема теплообмена

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-166-173

Закон сохранения энергии в процессе теплообмена происходит в соответствии с вышеприведённой схемой и записывается в [11, 12]:

$$R^+ + P^+ + B_1 - B_2 = L \cdot E + P^- + J_H - L \cdot C, \quad (1)$$

где R^+ – радиационный баланс – разность между поглощенной коротковолновой (прямой и рассеянной) радиацией Солнца и балансом длинноволнового излучения (излучения земной поверхности за минусом противоизлучения атмосферы) в дневные и частично в сумеречные часы суток; P^+ – положительная составляющая турбулентного теплообмена – тепло, которое поступает на участок суши в связи с движением воздуха – адвентивное тепло; B_1–B_2 – изменение запасов тепла в деятельном слое почвогрунта – теплообмен в почве; LE – расход тепла на суммарное испарение; P – расход тепла на нагревание воздуха – турбулентный теплообмен; J_H – длинноволновое (эффективное) излучение земной поверхности в ночные часы суток; LC – тепло конденсации; L – скрытая теплота испарения воды.

Уравнение (1) значительно упрощается, если принять следующие обозначения:

– теплоэнергетические ресурсы

$$L \cdot E_0 = R^+ + P^+ + B_1 - B_2, \quad (2)$$

– суммарный теплообмен

$$T = P^- + J_H - L \cdot C. \quad (3)$$

Тогда оно примет вид

$$L \cdot E_0 = L \cdot E + T. \quad (4)$$

Величина E_0 является эквивалентом теплоэнергетических ресурсов процесса теплообмена (испаряемость) и выражается в виде толщины водяного слоя, который мог бы испариться под воздействием всех тепловых ресурсов, участвующих в данном процессе. Величина T представляет собой суммарный теплообмен на нагревание приземного воздуха и на ночное эффективное излучение земной поверхности, частично компенсируемое противоизлучением атмосферы и теплом конденсации водяных паров воздуха на охлажденных элементах земной поверхности [11, 12].

Процесс сброса воды в ходе осушения оказывает как прямое, так и косвенное воздействие на все компоненты радиационного баланса. Исключение составляет величина среднегодового радиационного баланса R^+, которая является устойчивой для данной местности.

Для характеристики механизмов формирования температурного профиля почв было применено уравнение теплопроводности [13, 14, 15, 16]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right), \quad (5)$$

где ρ − плотность, кг/м^3; C_p − теплоемкость, Дж/(моль^{0}К); k − теплопроводность, Вт/м^{0}К; T – температура, ^{0}К; ∇ − гамильтониан.

Численное моделирование теплового режима почв [17] сводятся к вычислениям профиля их температур [18].

Для получения температурного профиля был использован метод математического моделирования. Он даёт возможность на основе начальных климатических условий рассчитывать динамику температурного профиля почвы и определять количество аккумулированной теплоты [19].

С целью количественной оценки динамики теплоёмкости почв был реализован численный эксперимент, схема которого выглядит следующим образом: в качестве условного объема принята почва в 5 м^3 с размерами 1 м – ширина, 1 м – длина и 5 м – глубина; выбранное значение глубины с запасом соответствует уровню, на котором прекращаются колебания температуры, связанные со степенью прогревания воздуха солнечными лучами [20].

В исследовании рассматривались модели двух наиболее распространённых почв: торфяно-болотной, состоящей из верхнего слоя торфа, глубиной 2 м, и нижнего слоя песка, глубиной 3 м; дерново-подзолистой, в состав которой входят верхний слой песка, глубиной 1 м, и нижний слой крупнозернистого песка, глубиной 4 м. Так как наибольшую площадь Белорусского Полесья занимают дерново-подзолистые почвы (более 35 %), далее идут дерново-подзолистые заболоченные (около 27,5 %) и торфяно-болотные (около 20 %) [21].

Для дерново-подзолистых почв расчёты производились для различных уровней грунтовых вод (УГВ): 0 м, 0,4 м, 0,8 м и 1 м. Для торфяно-болотных почв расчёты производились для различных уровней грунтовых вод (УГВ): 0 м, 0,4 м и 0,8 м.

Численное решение математической модели получено методом конечных элементов [22].

С использованием специализированного программного обеспечения была разработана модель теплопереноса в почве и проведено исследование динамики её прогрева в естественных условиях [23].

В качестве исходных данных использовалась метеорологическая информация с метеостанции Полесская, расположенной на территории Лунинецкого болотного массива. Эти данные являются репрезентативными для данного региона [19]. Значение температуры воздуха принималось равным среднему многолетнему показателю для конкретного дня в 19:00, что соответствует среднему значению температуры в рассматриваемый день.

Для исследования был выбран сценарий развития климата для Белорусского Полесья до 2035 года, предложенный профессором А. А. Волчеком и его коллегами в 2017 году [24]. Прогнозные значения увеличения средней температуры воздуха для тёплых месяцев представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Прогнозный рост среднемесячной температуры воздуха, ^{0}С

Месяц	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Разница температур	1,71	1,49	1,7	2,08	1,97	1,77	1,61

С использованием приведённой выше методики выполнен численный эксперимент по моделированию температурного профиля почв для следующих граничных условий:

– на поверхности модельной почвы задавался поток теплоты, равный среднемесячному потоку солнечного излучения, падающего на единицу площади горизонтальной поверхности;

– на нижней границе модульной почвы задавались условия термостабилизации при температуре 9,1^{0}С [25], равной среднегодовой температуре воздуха над поверхностью [26];

– на поверхности почвы задавалось условие конвективного теплообмена –∇(–k∇T) = 0 [12];

– на боковых границах выделенного объёма применялись условия теплоизоляции;

– испарение с поверхности почвы определялось как изменение внутренней энергии воды при испарении по формуле [27]:

$$Q = Lm – vRT, \quad (6)$$

где L – удельная теплота парообразования, Дж/кг; m – масса испарившейся воды, кг; v – количество вещества испарившейся воды, моль; T – температура воздуха, ^{0}К; R – молярная газовая постоянная, Дж/моль^{0}К.

Полученные результаты и их обсуждение

В ходе численного эксперимента было получено распределение температуры почвы по всей толщине моделируемого профиля. Интервал осреднения – сутки, период – с мая по октябрь включительно. Расчёты проводились на основе среднего многолетнего значения температуры воздуха и её прогностической оценки до 2035 [28, 29]. В качестве примера на рисунке 2 приведены графики зависимостей температуры от глубины дерново-подзолистой почвы без осушения для даты 03.06 при норме осушения – 1 м для современных климатических условий [30], а также прогнозного изменения температуры до 2035 года [31].

На рисунке 3 приведены графики зависимостей температуры от глубины для даты 01.05 для торфяно-болотной почвы без осушения и при норме осушения – 0,4 м для современных климатических условий и с учётом прогнозного изменения температуры до 2035 года.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-166-173

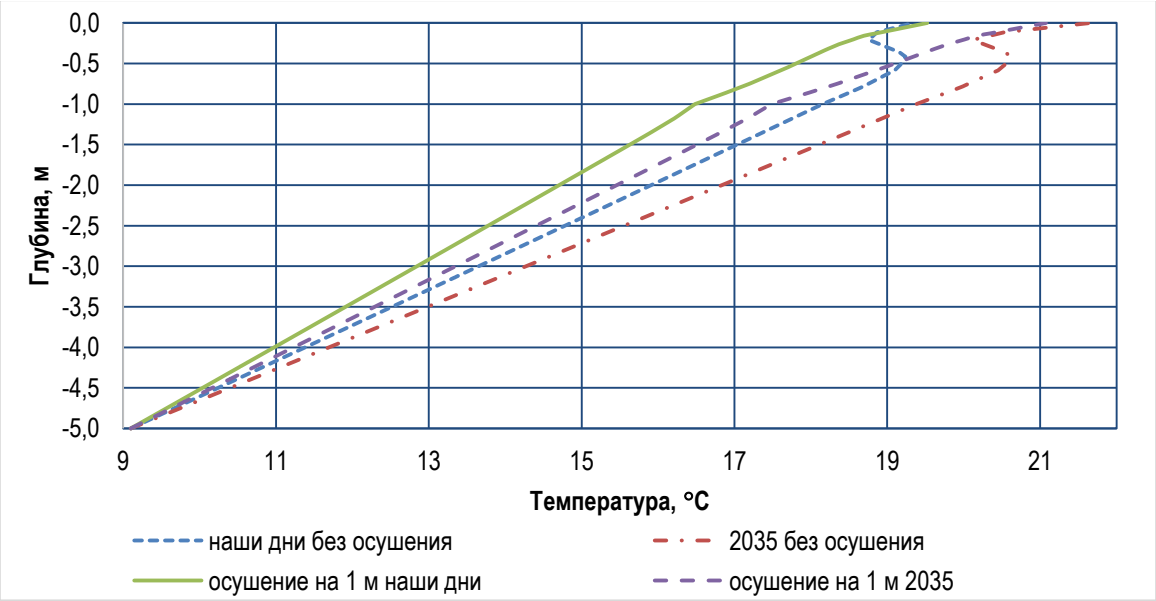


Рисунок 2 – Распределение температуры дерново-подзолистой почвы по глубине для 03.06 без осушения и при норме осушения 1 м

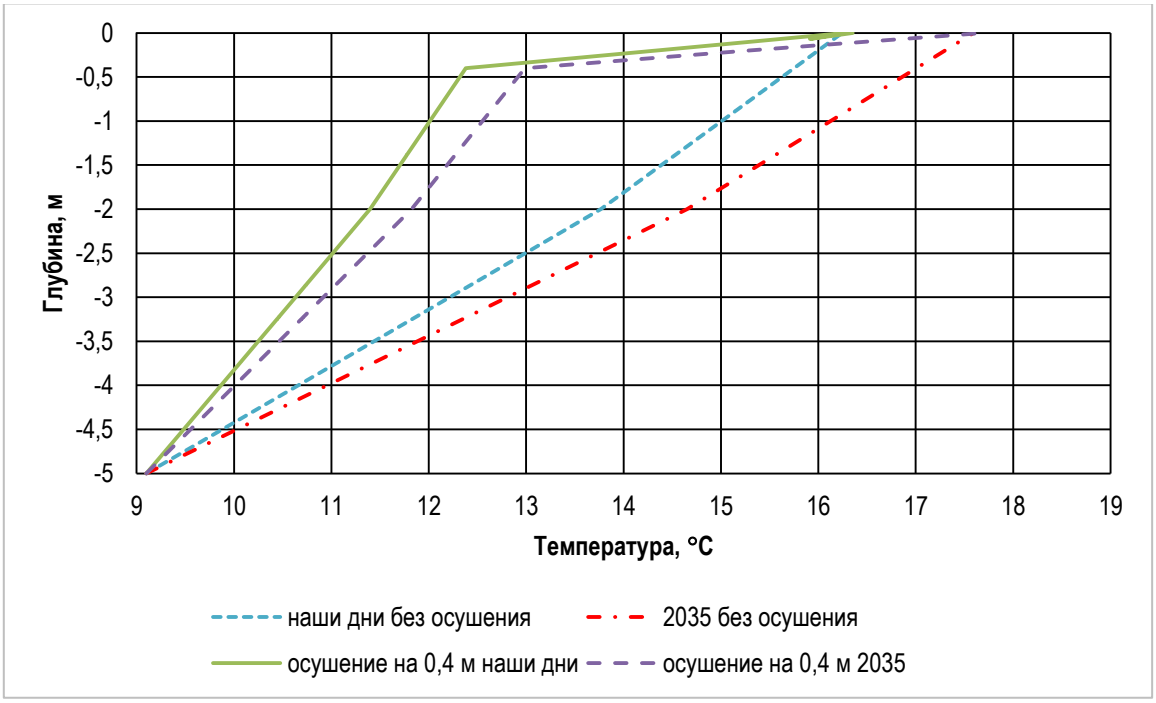


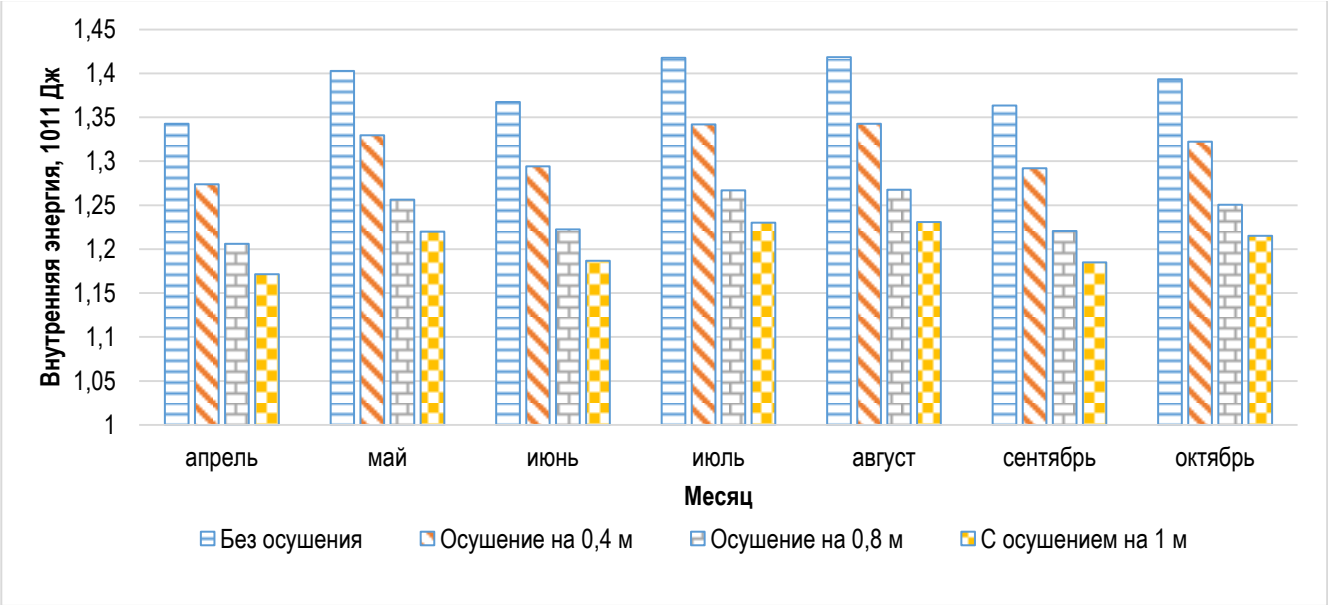
Рисунок 3 – Распределение температуры торфяно-болотной почвы по глубине для 01.05 без осушения и при норме осушения – 0,4 м

На основании проведённого численного эксперимента можно сделать вывод, что динамика температуры почв синхронна с температурой воздуха в условиях глобального потепления. Однако изменения теплового режима осушенных и неосушенных территорий имеют различную структуру, которая определяется как климатическими факторами, так и степенью мелиорированности [5, 6]. Теплоёмкость почвы зависит от содержания в ней влаги. Теплоёмкости воды и воздуха, которые заполняют поры почвы, различаются в четыре раза ($c_{возд}$ = 1020 Дж/(кг^{0}К), $c_{воды}$ = 4200 Дж/(кг^{0}К)), и наличие воды в почве повышает её теплоёмкость примерно во столько же раз. Аналогичная зависимость наблюдается и в случае теплопроводности влажной почвы. Благодаря теплопроводности лучистая энергия солнца, поглощаемая поверхностью почвы, проникает к нижним горизонтам и обеспечивает прогревание корнеобитаемого слоя. Различия в теплоёмкости и теплопроводности обусловливают то, что влажная почва требует больше энергии для нагрева и медленнее отдаёт тепло при остывании.

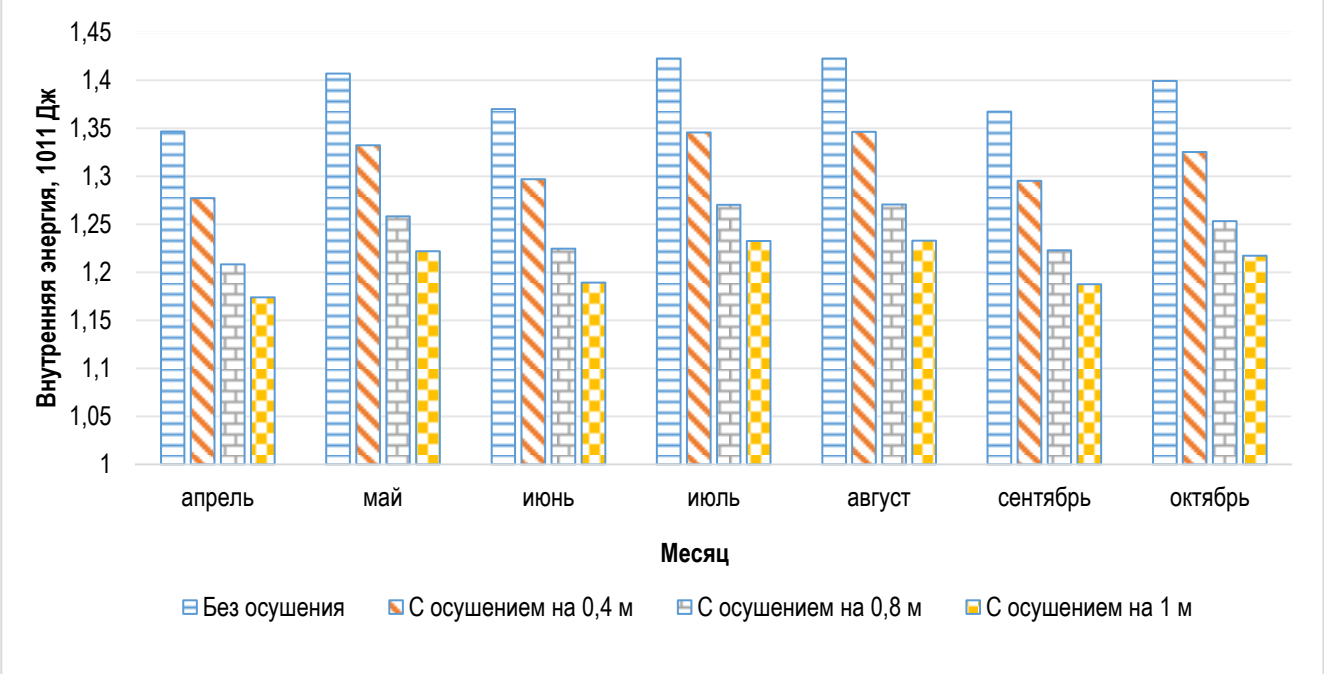
Анализ графиков, представленных на рисунках 2 и 3, позволяет сделать вывод, что характер изменения температуры остаётся относительно стабильным с приближением к поверхности почвы. Повышение температуры воздуха коррелирует с увеличением температуры почвы. Наиболее заметные изменения наблюдаются на неосушенных почвах начиная с глубины двух метров. В процессе осушения при сбросе воды скорость изменения температуры резко меняется на глубине расположения верхнего уровня грунтовых вод. В поверхностном слое торфяно-болотных почв, лишённом воды, скорость изменения температуры значительно выше.

Из диаграмм, приведенных на рисунках 4 и 5, видно, что количество аккумулируемой энергии по месяцам возрастает с повышением температуры воздуха.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-166-173



а)



б)

а) современное состояние, б) прогноз до 2035 г.

Рисунок 4 – Аккумулируемая энергия дерново-подзолистыми почвами

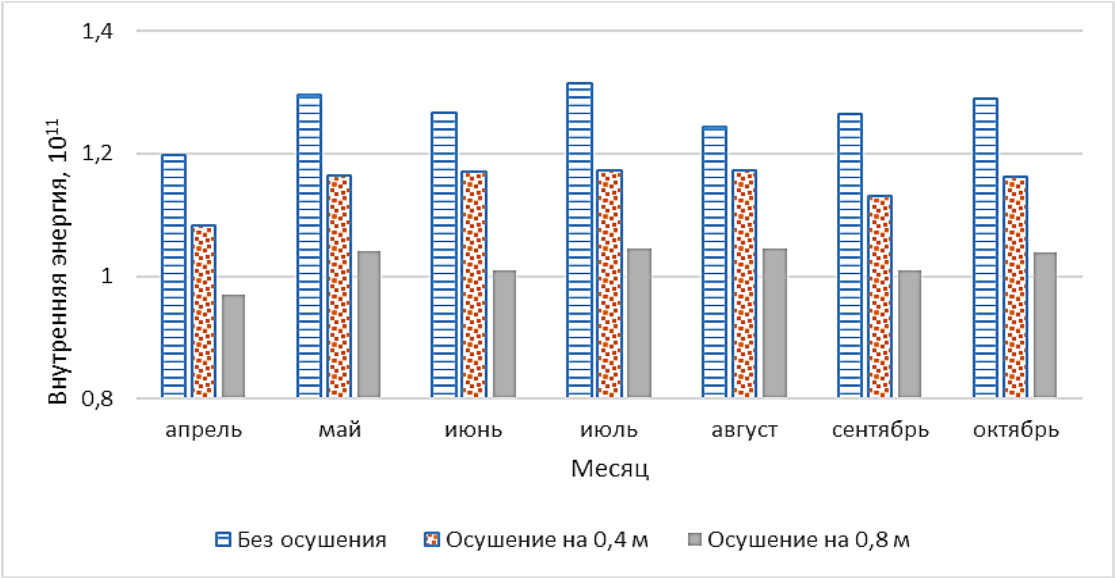
Таблица 2 – Изменение аккумулируемой энергии дерново-подзолистыми почвами, 10^8 Дж

Норма осушения	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Без осушения	3,90	3,96	2,64	4,56	4,20	3,67	5,99
Осушение на 0,4 м	3,14	2,60	2,51	3,74	3,52	3,37	2,91
Осушение на 0,8 м	2,10	1,99	2,09	3,11	2,90	2,28	2,45
С осушением на 1 м	2,40	1,83	2,23	2,43	2,24	2,49	1,94

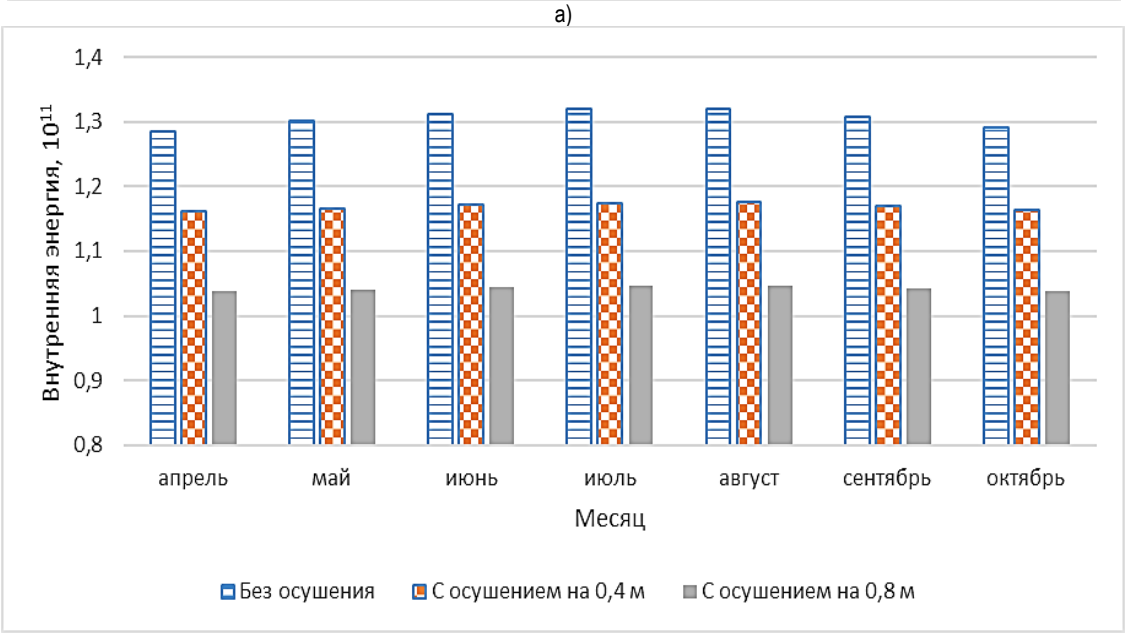
Таблица 3 – Изменение аккумулируемой энергии торфяно-болотными почвами, 10^8 Дж

Норма осушения	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Без осушения	86,14102	43,30979	45,65301	50,58068	77,5095	44,15644	41,07363
Осушение на 0,4 м	78,55584	34,72287	37,40279	42,1441	59,45436	38,92185	34,40348
Осушение на 0,8 м	67,81922	27,35634	24,6425	31,25751	41,19871	24,35844	22,79973

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-166-173



а)



б)

а) современное состояние, б) прогноз до 2035 г.

Рисунок 5 – Аккумулируемая энергия торфяно-болотными почвами

Анализ данных, представленных в таблицах 2 и 3, позволяет сделать вывод о наличии обратной зависимости между нормой осушения почв и изменениями в аккумулируемой почвой энергии. А именно: с увеличением нормы осушения воздействие климатических изменений на почву уменьшается, поскольку вода, содержащаяся в почве, имеет более высокую теплоёмкость по сравнению с воздухом, заполняющим почвенные поры. На осушенных почвах подобные изменения менее выражены. Почвы в естественном состоянии способны аккумулировать большее количество тепловой энергии и более равномерно распределять её по своему профилю.

Торфяно-болотная почва теряет с изменением климата существенно большую энергию по сравнению с дерново-подзолистыми почвами в связи большей средней теплоёмкостью.

В процессе продолжительного воздействия на почву отрицательных температур в течении зимы, на глубине 150 см, даже к концу холодного периода, температура почвы была положительна и составила 2…2,1 °С. Это явление получило название «температурной инерции» [32, 33]. Благодаря своей термической инертности, вода в верхнем слое почвы обеспечивает защиту растений от резких температурных перепадов, характерных для поздних весенних заморозков. Это приводит к повышению температуры в корнеобитаемом слое и создаёт благоприятные условия для культивирования сельскохозяйственных растений, адаптированных к более теплому климату.

Вследствие ограниченной теплоёмкости почва способна поглотить только определённое количество тепловой энергии. Так как передача тепла от верхних слоёв к нижним происходит сравнительно медленно, избыточная тепловая энергия дополнительно выделяется в окружающую среду. В результате этого приземный воздух нагревается сильнее и перемещается в области с более низким давлением, транспортируя тепловую энергию от осушенных территорий [10].

Воздух, обладающий меньшей теплоёмкостью, аккумулирует меньшую энергию, следовательно, при повышении температуры, накапливаемая почвой энергия будет изменяться на меньшую величину. Как следствие, в таблицах 2 и 3 не для всех месяцев прослеживается зависимость увеличения изменения энергии при различных нормах осушения.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-166-173

Заключение

В ходе моделирования теплового режима почв была вычислена энергия, которую аккумулируют дерново-подзолистые и торфяно-болотные почвы при изменении температуры до 2035 года. Результаты показали, что наиболее значительное увеличение энергии характерно для заболоченной почвы.

В результате анализа аккумулируемой энергии дерново-подзолистых почв было установлено, что максимальное изменение произошло в октябре для неосушенной почвы и составило приблизительно 5,99 10^8 Дж, что отражает увеличение на 0,43 % по сравнению с начальными данными. Минимальное увеличение энергии наблюдалось в мае для почвы с уровнем осушения один метр и составило 1,83 10^8 Дж, что соответствует приросту на 0,15 %.

При исследовании аккумулируемой энергии торфяно-болотных почв было выявлено, что наибольшее изменение произошло в апреле и достигло порядка 86 10^8 Дж, что свидетельствует о росте на 7 % относительно исходных значений. Наименьший прирост энергии зафиксирован в октябре и составил 41 10^8 Дж, что отражает увеличение на 3 %.

В процессе осушения болот происходит потеря значительного объёма энергии, который составляет примерно 10^{10} Дж с 1 м² или 10^6 Дж с 1 га.

Осуществление мелиоративных мероприятий на заболоченных землях приводит к ускорению трансформации подстилающей поверхности и изменению теплофизических характеристик почв. Это, в свою очередь, влияет на тепловой режим почв в регионе Белорусского Полесья.

Климатическое потепление и обусловленный этим процесс повышения температуры почвы могут создать благоприятные условия для роста сельскохозяйственных культур, типичных для более тёплых климатических зон. Однако на мелиорированных торфяно-болотных и дерново-подзолистых почвах сохраняются экстремальные условия для агрокультуры, что проявляется в значительном нагреве почвы днём и её охлаждении в ночное время. Это приводит к увеличению количества заморозков и замедлению прогрева пахотного слоя весной, что может стать причиной частичной потери урожая.

При разработке стратегий управления мелиоративными системами, планировании севооборотов и выборе агротехнических методов возделывания сельскохозяйственных культур необходимо принимать во внимание процессы перераспределения тепла в почве.

Список цитированных источников

1. Государственный земельный кадастр Республики Беларусь (по состоянию на 1 января 2021 г.) / Комитет по земельным ресурсам, геодезия и картография. – Минск, 2021.
2. Журавлёв, М. З. Плодородие низинных болот подтаёжной зоны Иртыш-Ишимского междуречья и некоторые вопросы их сельскохозяйственного использования / М. З. Журавлёв // Науч. тр. ОмСХИ. – Омск, 1963. – Т. 1. – С. 61–70.
3. Моторин, А. С. Плодородие торфяных почв Западной Сибири / А. С. Моторин // Мелиорация и водное хозяйство. – 2020. – № 1. – С. 16–22.
4. Курчевский, С. М. Сравнительная оценка пескования и глинования для повышения продуктивности торфяных почв / С. М. Курчевский, Э. И. Поднебесная // Агрохимический вестник. – 2013. – № 2. – С. 27–28.
5. Мажайский, Ю. А. Повышение продуктивности мелкозалежных торфяных почв при внесении минеральных добавок / Ю. А. Мажайский, С. М. Курчевский // Агрохимический вестник. – 2015. – № 1. – С. 15–17.
6. Игловиков, А. В. Физико-химические свойства и питательный режим нарушенных грунтов Крайнего Севера при биологической рекультивации / А. В. Игловиков, А. С. Моторин // Аграрный вестник Урала. – 2012. – № 7 (99). – С. 66–72.
7. Добрынин, В. М. Петрофизика (Физика горных пород): учеб. для вузов / В. М. Добрынин, Б. Ю. Вендельштейн, Д. А. Кожевников ; 2-ое изд. перераб. и доп. ; под ред. Д. А. Кожевникова. – М. : Нефть и газ, 2004. – 368 с.
8. Почвоведение / О. В. Кормилицина, О. В. Мартыненко, В. Н. Карминов [и др.] ; под общ. ред. В. А. Рожкова. – М. : Лесная промышленность, 2006. – 272 с.
9. Природообустройство Полесья : монография : в 4 кн. / под общ. науч. ред. Ю. А. Мажайского [и др.]. – Брест ; Ровно ; Варшава ; Рязань : Мещерский филиал ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова, 2019. – Кн. 1 : Белорусское Полесье. Т. 2 : Преобразование и использование природных ресурсов. – 503 с.
10. Хабутдинов, Ю. Г. Учение об атмосфере: учебное пособие / Ю. Г. Хабутдинов, К. М. Шанталинский, А. А. Николаев. – Казань : гос. ун-т, 2010. – 257 с.
11. Волчек, А. А. Гидравлика, гидрология, гидрометрия: учебное пособие / А. А. Волчек, П. В. Шведовский, Н. Н. Шешко ; под общ. ред. А. А. Волчека. – М. : Кнорус, 2021. – 520 с.
12. Гидрологические расчёты в мелиоративных целях: учебное пособие / В. С. Мезенцев, Г. В. Белоненко, И. В. Карнацевич, В. В. Лоскутов. – Омск : Омский СХИ, 1980. – Ч. 1. – 81 с.
13. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : МГУ. – 1999. – 799 с.
14. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р. А. Полуэктов, Э. И. Смоляр, В. В. Терлеев, А. Г. Топаж. – СПб. : С-Петерб. ун-т, 2006. – 799 с.
15. Хворова, Л. А. Динамическое моделирование и прогнозирование в агрометеорологии / Л. А. Хворова, А. Г. Топаж. – Барнаул : Алтайский гос. ун-т, 2010. – 262 с.
16. Шеин, Е. В. Курс физики почв / Е. В. Шеин. – М. : МГУ, 2005. – 432 с.
17. Хворова, Л. А. Численное моделирование составляющих теплового режима почв Алтайского Приобья / Л. А. Хворова, А. В. Жариков // Журнал Известия АГУ. – 2013. – № 1, Т. 1. – С. 126–130.
18. Волчек, А. А. Оценка влияния крупномасштабной мелиорации Белорусского Полесья на тепловой режим почв / А. А. Волчек, В. В. Борушко // Мелиорация и водное хозяйство. – 2022. – № 3. – С. 25–30. – DOI: 10.32962/0235-2524-2022-3-25-30.
19. Волчек, А. А. Оценка влияния осушения на тепловой режим почв Полесья / А. А. Волчек, В. В. Борушко // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Научный и практический подходы к развитию и реализации технологий безопасности : сб. тезисов по материалам XVII Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 26 марта 2021 г. – Воронеж, 2021. – С. 57–58.
20. Борушко, В. В. Оценка влияния осушения на тепловой режим почв Полесья / В. В. Борушко, А. А. Волчек // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Научный и практический подходы к развитию и реализации технологий безопасности : сборник статей по материалам XVII Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 26 марта 2021 г. – Воронеж, 2021. – С. 368–374.
21. Природообустройство Полесья : монография : в 4 кн. / под общ. науч. ред. Ю. А. Мажайского [и др.]. – Рязань : Мещер. ф-л ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова, 2018. – Кн. 1 : Белорусское Полесье, Т. 1 : Природно-ресурсный потенциал. – 408 с.
22. Дульнев, Г. Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов. – М. : Высшая школа, 1990. – 208 с.
23. Борушко, В. В. К вопросу о влиянии осушения на тепловой режим мелиорированных земель Белорусского Полесья / В. В. Борушко, А. А. Волчек, В. И. Гладковский // Актуальные проблемы наук о земле: использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., посвящённой Году науки в Респ. Беларусь, Брест, 25–27 сентября 2017 г. : в 2 ч. / БрГУ им. А. С. Пушкина. – Брест, 2017. – Ч. 2. – С. 6–9.
24. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учётом изменения климата / А. А. Волчек, В. Н. Корнеев, С. И. Парфомук, И. А. Булак ; под ред. А. А. Волчека, В. Н. Корнеева. – Брест : Альтернатива, 2017. – 228 с.
25. WeatherOnline Ltd. – Meteorological Services. – URL: https://weatheronline.co.uk (date of access: 15.10.2025).
26. Региональная физическая география. Климаты Земли : учеб.-метод. Пособие : в 2 ч. / Е. М. Зубащенко, В. И. Шмыков, А. Я. Немыкин, Н. В. Полякова. – Воронеж : ВГПУ, 2007. – Ч. 1. – 183 с.
27. Михайлюк, Ю. И. Ориентировочная основа действий при изучении химии элементов в курсе общей химии: учебное пособие / Ю. И Михайлюк, А. К. Мазитова, Р. Р. Кудоярова. – Уфа : УГНТУ, 2004. – 197 с.
28. Volchak, A. A. Evaluation of the influence of large-scale melioration of the Belarusian Polesie on the thermal regime of soils / A. A. Volchak, V. V. Borushko // Vestnik of Brest State Technical University. Civil Engineering and Architecture. – 2023. – P. 103–109. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-131-2-103-109.

29. Волчек, А. А. Моделирование теплового режима осушенных торфяно-болотных почв белорусского Полесья / А. А. Волчек, В. В. Борушко // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2022. – № 2 (128). – С. 123–126. – DOI: 10.36773/1818-1112-2022-128-2-123-126.
30. Волчек, А. А. Тепловой режим дерново-подзолистых почв осушенных территорий / А. А. Волчек, В. В. Борушко // Вопросы степеведения. – 2022. – № 2. – С. 60–71. – DOI: 10.24412/2712-8628-2022-2-60-71.
31. Volchak, A. A. The simulation of the thermal regime of soddy-podzolic soils of Belarusian Polesie / A. A. Volchak, V. V. Borushko // Vestnik of Brest State Technical University. – 2025. – No. 3 (138). – P. 135–140. – DOI: 10.36773/1818-1112-2025-138-3-135-140.
32. Чекотилло, А. М. Температурная инерция почвы в зимнее время / А. М. Чекотилло // Вопросы изучения снега и использования его в народном хозяйстве. – М. : АН СССР, 1955. – С. 73–97.
33. Копанев, И. Д. О температурном режиме почвы в холодный период / И. Д. Копанев // Почвоведение. – 1965. – № 6. – С. 97–103.

References

1. Gosudarstvennyj zemel'nyj kadastr Respubliki Belarus' (po sostoyaniyu na 1 yanvarya 2021 g.) / Komitet po zemel'nym resursam, geodeziya i kartografiya. – Minsk, 2021.
2. ZHuravlyov, M. Z. Plodorodie nizinnyh bolot podtayozhnoj zony Irtysh-Ishimskogo mezhdurech'ya i nekotorye voprosy ih sel'skohozyajstvennogo ispol'zovaniya / M. Z. ZHuravlyov // Nauch. tr. OmSKHI. – Omsk, 1963. – T. 1. – S. 61–70.
3. Motorin, A. S. Plodorodie torfyanyh pochv Zapadnoj Sibiri / A. S. Motorin // Melioraciya i vodnoe hozyajstvo. – 2020. – № 1. – S. 16–22.
4. Kurchevskij, S. M. Sravnitel'naya ocenka peskovaniya i glinovaniya dlya povysheniya produktivnosti torfyanyh pochv / S. M. Kurchevskij, E. I. Podnebesnaya // Agrohimicheskij vestnik. – 2013. – № 2. – S. 27–28.
5. Mazhajskij, YU. A. Povyshenie produktivnosti melkozalezhnyh torfyanyh pochv pri vnesenii mineral'nyh dobavok / YU. A. Mazhajskij, S. M. Kurchevskij // Agrohimicheskij vestnik. – 2015. – № 1. – S. 15–17.
6. Iglovikov, A. V. Fiziko-himicheskie svojstva i pitatel'nyj rezhim narushennyh gruntov Krajnego Severa pri biologicheskoj rekul'tivacii / A. V. Iglovikov, A. S. Motorin // Agrarnyj vestnik Urala. – 2012. – № 7 (99). – S. 66–72.
7. Dobrynin, V. M. Petrofizika (Fizika gornyh porod): ucheb. dlya vuzov / V. M. Dobrynin, B. YU. Vendel'shtejn, D. A. Kozhevnikov ; 2-oe izd. pererab. i dop. ; pod red. D. A. Kozhevnikova. – M. : Neft' i gaz, 2004. – 368 s.
8. Pochvovedenie / O. V. Kormilicina, O. V. Martynenko, V. N. Karminov [i dr.] ; pod obshch. red. V. A. Rozhkova. – M. : Lesnaya promyshlennost', 2006. – 272 s.
9. Prirodoobustrojstvo Poles'ya : monografiya : v 4 kn. / pod obshch. nauch. red. YU. A. Mazhajskogo [i dr.]. – Brest ; Rovno ; Varshava ; Ryazan' : Meshcherskij filial VNIIGiM im. A. N. Kostyakova, 2019. – Kn. 1 : Belorusskoe Poles'e. T. 2 : Preobrazovanie i ispol'zovanie prirodnyh resursov. – 503 s.
10. Habutdinov, YU. G. Uchenie ob atmosfere: uchebnoe posobie / YU. G. Habutdinov, K. M. SHantalinskij, A. A. Nikolaev. – Kazan' : gos. un-t, 2010. – 257 s.
11. Volchek, A. A. Gidravlika, gidrologiya, gidrometriya: uchebnoe posobie / A. A. Volchek, P. V. SHvedovskij, N. N. SHeshko ; pod obshch. red. A. A. Volcheka. – M. : Knorus, 2021. – 520 s.
12. Gidrologicheskie raschyoty v meliorativnyh celyah: uchebnoe posobie / V. S. Mezencev, G. V. Belonenko, I. V. Karnacevich, V. V. Loskutov. – Omsk : Omskij SKHI, 1980. – CH. 1. – 81 s.
13. Tihonov, A. N. Uravneniya matematicheskoj fiziki / A. N. Tihonov, A. A. Samarskij. – M. : MGU. – 1999. – 799 s.
14. Modeli produkcionnogo processa sel'skohozyajstvennyh kul'tur / R. A. Poluektov, E. I. Smolyar, V. V. Terleev, A. G. Topazh. – SPb. : S-Peterb. un-t, 2006. – 799 s.
15. Hvorova, L. A. Dinamicheskoe modelirovanie i prognozirovanie v agrometeorologii / L. A. Hvorova, A. G. Topazh. – Barnaul : Altajskij gos. un-t, 2010. – 262 s.
16. SHein, E. V. Kurs fiziki pochv / E. V. SHein. – M. : MGU, 2005. – 432 s.
17. Hvorova, L. A. CHislennoe modelirovanie sostavlyayushchih teplovogo rezhima pochv Altajskogo Priob'ya / L. A. Hvorova, A. V. ZHarikov // ZHurnal Izvestiya AGU. – 2013. – № 1, T. 1. – S. 126–130.
18. Volchek, A. A. Ocenka vliyaniya krupnomasshtabnoj melioracii Belorusskogo Poles'ya na teplovoj rezhim pochv / A. A. Volchek, V. V. Borushko // Melioraciya i vodnoe hozyajstvo. – 2022. – № 3. – S. 25–30. – DOI: 10.32962/0235-2524-2022-3-25-30.
19. Volchek, A. A. Ocenka vliyaniya osusheniya na teplovoj rezhim pochv Poles'ya / A. A. Volchek, V. V. Borushko // Kompleksnye problemy tekhnosfernoj bezopasnosti. Nauchnyj i prakticheskij podhody k razvitiyu i realizacii tekhnologij bezopasnosti : sb. tezisov po materialam XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Voronezh, 26 marta 2021 g. – Voronezh, 2021. – S. 57–58.
20. Borushko, V. V. Ocenka vliyaniya osusheniya na teplovoj rezhim pochv Poles'ya / V. V. Borushko, A. A. Volchek // Kompleksnye problemy tekhnosfernoj bezopasnosti. Nauchnyj i prakticheskij podhody k razvitiyu i realizacii tekhnologij bezopasnosti : sbornik statej po materialam XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Voronezh, 26 marta 2021 g. – Voronezh, 2021. – S. 368–374.
21. Prirodoobustrojstvo Poles'ya : monografiya : v 4 kn. / pod obshch. nauch. red. YU. A. Mazhajskogo [i dr.]. – Ryazan' : Meshcher. f-l VNIIGiM im. A. N. Kostyakova, 2018. – Kn. 1 : Belorusskoe Poles'e, T. 1 : Prirodno-resursnyj potencial. – 408 s.
22. Dul'nev, G. N. Primenenie EVM dlya resheniya zadach teploobmena / G. N. Dul'nev, V. G. Parfenov, A. V. Sigalov. – M. : Vysshaya shkola, 1990. – 208 s.
23. Borushko, V. V. K voprosu o vliyanii osusheniya na teplovoj rezhim meliorirovannyh zemel' Belorusskogo Poles'ya / V. V. Borushko, A. A. Volchek, V. I. Gladkovskij // Aktual'nye problemy nauk o zemle: ispol'zovanie prirodnyh resursov i sohranenie okruzhayushchej sredy : sb. materialov mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchyonnoj Godu nauki v Resp. Belarus', Brest, 25–27 sentyabrya 2017 g. : v 2 ch. / BrGU im. A. S. Pushkina. – Brest, 2017. – CH. 2. – S. 6–9.
24. Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchyotom izmeneniya klimata / A. A. Volchek, V. N. Korneev, S. I. Parfomuk, I. A. Bulak ; pod red. A. A. Volcheka, V. N. Korneeva. – Brest : Al'ternativa, 2017. – 228 s.
25. WeatherOnline Ltd. – Meteorological Services. – URL: https://weatheronline.co.uk (date of access: 15.10.2025).
26. Regional'naya fizicheskaya geografiya. Klimaty Zemli : ucheb.-metod. Posobie : v 2 ch. / E. M. Zubashchenko, V. I. SHmykov, A. YA. Nemykin, N. V. Polyakova. – Voronezh : VGPU, 2007. – CH. 1. – 183 s.
27. Mihajlyuk, YU. I. Orientirovochnaya osnova dejstvij pri izuchenii himii elementov v kurse obshchej himii: uchebnoe posobie / YU. I. Mihajlyuk, A. K. Mazitova, R. R. Kudoyarova. – Ufa : UGNTU, 2004. – 197 s.
28. Volchak, A. A. Evaluation of the influence of large-scale melioration of the Belarusian Polesie on the thermal regime of soils / A. A. Volchak, V. V. Borushko // Vestnik of Brest State Technical University. Civil Engineering and Architecture. – 2023. – P. 103–109. DOI: 10.36773/1818-1112-2023-131-2-103-109.
29. Volchek, A. A. Modelirovanie teplovogo rezhima osushennyh torfyano-bolotnyh pochv belorusskogo Poles'ya / A. A. Volchek, V. V. Borushko // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – № 2 (128). – S. 123–126. – DOI: 10.36773/1818-1112-2022-128-2-123-126.
30. Volchek, A. A. Teplovoj rezhim dernovo-podzolistyh pochv osushennyh territorij / A. A. Volchek, V. V. Borushko // Voprosy stepevedeniya. – 2022. – № 2. – S. 60–71. – DOI: 10.24412/2712-8628-2022-2-60-71.
31. Volchak, A. A. The simulation of the thermal regime of soddy-podzolic soils of Belarusian Polesie / A. A. Volchak, V. V. Borushko // Vestnik of Brest State Technical University. – 2025. – No. 3 (138). – P. 135–140. – DOI: 10.36773/1818-1112-2025-138-3-135-140.
32. CHekotillo, A. M. Temperaturnaya inerciya pochvy v zimnee vremya / A. M. CHekotillo // Voprosy izucheniya snega i ispol'zovaniya ego v narodnom hozyajstve. – M. : AN SSSR, 1955. – S. 73–97.
33. Kopanev, I. D. O temperaturnom rezhime pochvy v holodnyj period / I. D. Kopanev // Pochvovedenie. – 1965. – № 6. – S. 97–103.

Материал поступил 22.01.2026, одобрен 22.02.2026, принят к публикации 23.02.2026

УДК 556:628.193

ИЗУЧЕННОСТЬ ВОПРОСА НИТРАТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

А. М. Кухарик

Младший научный сотрудник, лаборатория биогеохимии и агроэкологии, Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: anyahomich@mail.ru

Реферат

В статье проанализированы опубликованные научные результаты по проблеме загрязнения нитратами подземных вод в различных регионах мира. Первые исследования по изучению процессов поступления и накопления нитратов в подземных водах начали проводиться на рубеже 60-х – 70-х гг. XX в. Установлено, что для многих стран и регионов (Западная Европа, Прибалтика, Юго-Восточная Азия, США, Россия, Беларусь, Украина и др.) характерны повышенные концентрации нитратов в подземных водах (более 45 мг/дм3, что превышает допустимый уровень, установленный для питьевых вод), а для большинства водозаборов не разработаны проекты по организации зон санитарной защиты, которые исключали бы возможность ухудшения качества подземных вод. Дана оценка уровней нитратного загрязнения вод источников централизованного и нецентрализованного водоснабжения (скважины, колодцы, родники) в Беларуси, а также рассмотрены существующие приемы улучшения их качества. Показано, что основными факторами формирования антропогенного загрязнения подземных вод нитрат-ионами являются увеличение селитебной освоенности территории, эксплуатация коммунально-бытовой инфраструктуры, развитие промышленного производства, интенсивное использование минеральных и органических удобрений на сельскохозяйственных землях. По полученным материалам предложены рекомендации по минимизации негативного воздействия нитрат-ионов на окружающую среду и человека, включающие использование ионообменных фильтров для очистки загрязненных вод и перевод водоснабжения на использование артезианских скважин, эксплуатирующих более глубокозалегающие водоносные горизонты.

Нитратное загрязнение подземной гидросферы является актуальной геоэкологической проблемой XXI в., для решения которой необходима постановка комплексных исследований по изучению закономерностей его формирования.

Ключевые слова: нитраты, подземные воды, мониторинг, геоэкологическая оценка, предельно допустимая концентрация (ПДК), источники централизованного и нецентрализованного водоснабжения, грунтовые воды.

INVESTIGATION OF THE ISSUE OF GROUNDWATER NITRATE POLLUTION

A. M. Kukharik

Abstract

The article analyzes published scientific results on the problem of groundwater nitrate pollution in different regions of the world. The first studies on the processes of uptake and accumulation of nitrates in groundwater began to be carried out around

60-th – 70-th years of the XX century. Found that for many countries and regions (Western Europe, Baltic States, Southeast Asia, USA, Russia, Belarus, Ukraine etc.) elevated concentrations of nitrates in groundwater (more than 45 mg/dm3, which exceeds the acceptable level established for drinking water), and there are no plans for the establishment of sanitary protection zones that would prevent the deterioration of groundwater quality in most reservoirs. An assessment of the levels of nitrate pollution of water sources of centralized and decentralized water supply (wells, springs) in Belarus has been made, as well as existing ways to improve their quality. It was shown that the main factors of anthropogenic groundwater pollution by nitrate-ions are the increase in the population density, the use of public infrastructure, the development of industrial production, intensive use of mineral and organic fertilizers on agricultural land. Based on the results, recommendations are proposed to minimize the negative impact of nitrate-ions on the environment and humans, including the use of ion-exchange filters for cleaning contaminated water and the conversion of water supply to the use of artesian wells, exploiting deeper aquifers.

Nitrate pollution of underground hydrosphere is a current geo-ecological problem of the XXI century, for the solution of which it is necessary to conduct comprehensive studies on the study of its formation patterns.

Keywords: nitrates, groundwater, monitoring, geo-ecological assessment, maximum permissible concentration (MPC), sources of centralized and decentralized water supply, groundwater.

Введение

Хозяйственная деятельность человека, оказывающая существенное влияние на все компоненты геологической среды, включая подземную гидросферу, является одним из главных факторов загрязнения подземных вод. Во многих странах они используются в качестве основного источника питьевого водоснабжения, вследствие чего проблеме их качества уделяется особое внимание. В настоящее время одной из актуальных и широко обсуждаемых в научной литературе геоэкологических проблем, связанных с подземными водами, является их нитратное загрязнение. Оно формируется под влиянием антропогенных факторов, наносит ущерб природным экосистемам и создает риски для здоровья человека.

Грунтовые воды, т. е. воды первого от поверхности безнапорного водоносного горизонта, чаще всего подвергаются загрязнению нитрат-ионами вследствие их слабой естественной защищенности от поступления контаминантов. В городах высокая степень загрязнения подземных вод характерна для агроселитебных ландшафтов, которые представляют собой территории, занятые приусадебными участками. Сельские населенные пункты испытывают сложности с обеспечением качественными водами из источников нецентрализованного водоснабжения (колодцы, неглубокие скважины, родники). Формирование загрязнения подземных вод нитрат-ионами обусловлено поступлением коммунально-бытовых стоков, использованием минеральных и органических удобрений на сельскохозяйственных землях, развитием промышленного производства, эксплуатацией очистных сооружений.

Все вышесказанное подтверждает актуальность проведения специальных гидрогеологических и гидрогеохимических исследований на территории Беларуси, направленных на определение особенностей формирования и динамики нитратного загрязнения подземных вод, однако их осуществление невозможно без обобщения отечественного и мирового научного опыта, начиная с середины XX в., чему и посвящена настоящая статья.

Результаты и их обсуждение

Первые результаты исследований, фиксирующие быстрое возрастание содержания азота в подземных водах, стали появляться на рубеже 60-х – 70-х гг. XX в., и к сегодняшнему дню

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-174-183

по рассматриваемой проблеме опубликована обширная литература, и накоплен большой объем фактических данных по различным регионам мира и отдельным странам. Изучением нитратного загрязнения подземных вод занимались специалисты из России, Украины, Польши, Литвы, Латвии, Беларуси, Германии, Австрии, Турции, Италии, США, Индии, Туниса, Китая и других стран. Это позволило разработать подходы к количественной оценке концентрации нитрат-иона в водах, которые имеют некоторые различия. Так, для большинства стран Европейского Союза предельно допустимая концентрация нитратов в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования составляет 50 мг/дм^3 (рекомендована Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ)), в России и Беларуси этот показатель равен 45 мг/дм^3.

Значительный вклад в изучение особенностей формирования нитратного загрязнения подземных вод в период 1960–2000 гг. внесли Н. И. Петухов, В. М. Гольдберг, Ж. Фрид, С. Р. Крайнов, В. П. Закутин, М. А. Хвесик, П. Д. Клоченко, А. И. Сакевич, Ф. М. Бочевер, И. А. Брилинг, Ф. И. Тютюнова, O. Strebel, G. R. Hallberg, J. F. Power, V. Benes, A E. Williams, A. Klimas, А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич, М. П. Оношко, Г. Н. Новиков, В. Н. Яромский, Н. С. Житенева, С. Л. Шварцев, Е. В. Пиннекер, В. Г. Жогло и др.

В 1969 г. Н. И. Петуховым [1] опубликованы результаты изучения миграции нитратов в почве и грунтовых водах Республики Татарстан. Показано, что из 509 проб воды в 265 колодцах содержание нитратов составило более 41 мг/дм^3. Также присутствие нитрат-иона зафиксировано в водах родников. Из 31 исследованного объекта 30 загрязнены нитратами, при этом в шести из них содержание нитрат-иона превышало значение ПДК.

Первые признаки нитратного загрязнения в напорных подземных водах на территории Беларуси установлены в 1970-е гг. на групповом водозаборе «Новинки» (г. Минск). Концентрация нитрат-иона здесь составила 20–27 мг/дм^3, а в начале 1990-х гг. зафиксировано первое превышение уровня ПДК (45 мг/дм^3) в одной из скважин данного водозабора. В начале 2000-х гг. содержание нитратов достигло 50–67 мг/дм^3 уже в 6–7 скважинах [2].

O. Strebel с соавторами [3] проанализированы основные аспекты загрязнения нитратами подземных вод в результате сельскохозяйственной деятельности в Западной Европе. Сделан вывод, что сток нитратов с сельскохозяйственных земель следует рассматривать как важный неточечный источник загрязнения. Отмечено, что в Дании, Западной Германии, Нидерландах и Великобритании использование подземных вод составляет 99 %, 73 %, 70 % и 30 %, соответственно, от общего объема потребляемой воды, поэтому очень важно защищать подземные воды от поступления загрязняющих веществ, которые ухудшают их качество.

В этот же период G. R. Hallberg [4], J. F. Power, J. S. Schepers [5] изучали проблему загрязнения нитратами подземных вод в Северной Америке. Загрязнение грунтовых вод нитратами обнаружено в каждом штате США. В основном это районы широко распространенного производства зерна, которые характеризуются интенсивным пропашным земледелием и обильным внесением минеральных и органических удобрений. Кроме этого, нитратное загрязнение подземных вод характерно для районов оросительного земледелия, выращивания овощных и специализированных культур на песчаных почвах. В ходе выполненных исследований предложены возможные пути решения проблем качества грунтовых вод, возникающих в результате сельскохозяйственной деятельности.

V. Benes с соавторами [6] проанализировано влияние диффузных источников загрязнения нитратами на качество грунтовых вод на территории Чехословакии. Показано, что долгосрочные изменения и тенденция к увеличению концентрации нитратов в грунтовых водах отражают антропогенное, особенно сельскохозяйственное, влияние. В нескольких районах страны с интенсивным аграрным производством была установлена корреляция между количеством внесенных азотных удобрений и содержанием нитратов в грунтовых водах. Был проведен мониторинг качества подземных вод и выявлены распространенные источники загрязнения, а также рассмотрены вопросы о возможном влиянии загрязнения нитратами грунтовых вод на здоровье человека.

В 1990–1993 гг. исследователями из Украины (М. А. Хвесик, П. Д. Клоченко, А. И. Сакевич) и Литвы (A. Klimas, B. Paukstys) публикуются результаты изучения особенностей накопления нитратов в источниках питьевого водоснабжения. В публикациях рассматривались вопросы загрязнения нитратами подземных вод в связи с поступлением промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод. В питьевых водах Киевской области содержание нитратов составило 10,8–168,0 мг/дм^3, а в Черкасской – 0,78–113,3 мг/дм^3. Было установлено, что увеличение нагрузки нитратов на человека прямо пропорционально величине нитратного загрязнения источников водоснабжения [7, 8]. На территории Литвы загрязнение подземных вод нитрат-ионами наблюдалось вблизи заводов по производству удобрений и в границах интенсивно удобряемых сельскохозяйственных земель. Безнапорные грунтовые воды оказались наиболее загрязнены нитратами в центральной части Литвы [9].

В 1992 г. в Беларуси была создана Национальная система мониторинга окружающей среды (НСМОС) с целью обеспечения взаимодействия систем наблюдения за состоянием окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов. На начало 1993 г. в составе данной системы велись лишь несколько видов мониторинга: мониторинг окружающей среды, медицинский мониторинг и др., а к 2023 г. общее количество видов мониторинга достигло 13. На момент создания НСМОС в части мониторинга подземных вод наблюдательная сеть включала 487 скважин, а в 2022 г. – 355 скважин [10]. Следует, однако, отметить, что наблюдения по этим скважинам осуществляются в основном за уровенным и температурным режимами подземных вод, а гидрогеохимические наблюдения с частотой один раз в год – лишь в небольшой части этих скважин (10–15 %). Это не позволяет объективно оценивать современное геоэкологическое состояние подземных вод, включая уровни их нитратного загрязнения.

В период с 1993 по 2000 гг. продолжились исследования по изучению гидрогеохимического состояния и качества пресных подземных вод источников централизованного и нецентрализованного водоснабжения на территории Беларуси. Весомый вклад в рассмотрение данных вопросов внесли А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич, М. П. Оношко, Г. Н. Новиков, В. Н. Яромский, Н. С. Житенева, В. Г. Жогло и др.

А. В. Кудельским и В. И. Пашкевичем [11] отмечено нитратное загрязнение подземных вод на водозаборах «Водопой» и «Островы» (г. Минск), одиночных скважин (г. Речица) и водозабора «Лядище» (г. Борисов). Концентрация нитратов в водах достигала 59,2–87,0 мг/дм^3. Установлено, что загрязнению подвержены напорные воды межморенных водоносных комплексов. Источниками поступления нитрат-ионов в грунтовые воды, эксплуатируемые колодцами, являются приусадебные участки, животноводческие комплексы и птицефермы, склады минеральных удобрений. Было отмечено, что для большинства водозаборов не разработаны проекты по организации зон санитарной защиты, которые исключали бы возможность ухудшения качества подземных вод. В 1998 г. М. П. Оношко [12] и Г. Н. Новиков с соавторами [13] в своих работах показали особенности накопления азота в подземных водах Западного Поозерья. Была отмечена закономерность аккумуляции азота в подземных водах в связи с сельскохозяйственным использованием территории, а также определена взаимосвязь содержания нитратов с ее распаханностью. Показано, что интенсивная антропогенная нагрузка привела к изменению зонального состава подземных вод, сформировался новый их тип – нитратно-гидрокарбонатный кальциевый. Содержание нитратов в питьевой воде колодцев изученного региона превышало значение ПДК в 5,2–9,8 раза.

В этот же период A. E. Williams с соавторами [14] проводили исследования по выявлению естественных и антропогенных источников загрязнения нитратами грунтовых вод в сельской местности штата Калифорния и установили, что в 20–40 % скважин в районе Сьерра-Пелона превышен уровень ПДК по нитрат-ионам.

В период с 2000 по 2015 гг. важным направлением в изучении проблемы нитратного загрязнения подземных вод являлся мониторинг и гидроэкологическая оценка их качества. Исследования в это время были проведены для отдельных регионов и городов России (Белгородская область, г. Челябинск, г. Владивосток, Липецкая

область, Ленинградская область, г. Тула, Ростовская область), Украины (Житомирская область, г. Харьков), Беларуси (Брестская, Могилевская, Гомельская, Гродненская области, г. Минск), Германии, Казахстана, Южной Кореи, Индии, Туниса, Австрии, Турции, Азии, Китая и др.

В 2004 г. R. Wolter [15] публикует результаты изучения загрязнения нитратами поверхностных и грунтовых вод в Германии. Было отмечено, что в Германии и во многих других европейских странах поступление азота в поверхностные и грунтовые воды привело к заметному ухудшению их качества. С целью отразить существующие особенности загрязнения подземных вод нитратами и оценить эффективность принятых мер по минимизации его негативных последствий в Германии была создана мониторинговая сеть: мониторинг проводился в 1995–2002 гг. Установлено, что снижение концентрации нитратов наблюдалось только в сильно загрязненных грунтовых водах, однако в целом концентрации нитратов в грунтовых водах Германии не удалось значительно снизить за последние семь лет. K. Osenbrück с соавторами [16] изучали проблему загрязнения нитратами подземных вод в восточной части Германии (Саксония). Во взаимосвязи с развитием сельскохозяйственного производства были рассмотрены особенности развития загрязнения грунтовых вод нитратами в скважинах питьевого водоснабжения.

В это же время выполнялись исследования подземных вод на территории Украины. Т. П. Качановской [17] проведено изучение качества подземных вод г. Харькова. Установлено, что грунтовые воды в большинстве случаев загрязнены нитратами, а их максимальные концентрации достигают 250 мг/дм^3.

Изучение проблемы нитратного загрязнения подземных вод осуществляется также с использованием геоинформационных систем (ГИС). Так в работе B. Nas и A. Berktay [18] оценено пространственное распределение концентраций нитратов в грунтовых водах в г. Конья (Турция) с использованием ГИС. Установлено увеличение концентрации нитратов в подземных водах в период с 1998 по 2001 гг. Отмечено, что причинами нитратного загрязнения вод питьевого водоснабжения являются расположение скважин в центре города, интенсивная сельскохозяйственная деятельность на юге, а также растущая промышленная активность на северо-востоке.

Проблемой площадного нитратного загрязнения подземных вод Липецкой области занимались Э. Л. Прудовский, С. М. Бойко [19]. Результаты их исследований, проведенных в период 2000–2006 гг. (было проанализировано 4600 проб воды), позволили выявить характер распределения нитратов в подземных водах верхнедевонской и неоген-четвертичной водоносных систем. Для неоген-четвертичной водоносной системы характерны наиболее низкие фоновые концентрации нитрат-иона (от 0–10 мг/дм^3 до 30 мг/дм^3), а для верхнедевонской – 30–40 мг/дм^3 с аномальными значениями от 40,0 до 259,7 мг/дм^3. В ходе проведенной работы выделены источники загрязнения подземных вод региона. Среди них – городские территории с высоким промышленным потенциалом (полигоны твердых отходов, сточные воды) и районы с развитым сельским хозяйством (интенсивное применение минеральных и органических удобрений).

Значительный вклад в изучение проблемы нитратного загрязнения подземных вод на территории Беларуси в период 2000–2015 гг. внесли М. Г. Ясовеев, Д. Д. Таликадзе, А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич, Е. В. Дроздова, О. В. Васнева, К. В. Кудрявцева, Т. Г. Флерко, О. В. Шершнев, С. Н. Баитова, М. О. Хартон, С. А. Хорева, Т. А. Неверова, М. Ю. Калинин, М. А. Писарик, В. М. Феденя, С. И. Кузьмин, В. Г. Жогло, А. Н. Галкин, В. В. Коцур, О. В. Кадацкая, В. С. Хомич и др.

С 2000 по 2007 гг. исследователями была выполнена геоэкологическая оценка подземных вод различных регионов Беларуси. В юго-западной части страны, а именно, на территории Барановичского района, было установлено превышение содержания нитратов в грунтовых водах (от 49 до 309 мг/дм^3) [20]. В ходе проведенных исследований зафиксировано аномально высокое содержание нитрат-ионов в подземных водах г. Барановичи – до 852 мг/дм^3, а также М. Ю. Калининым и М. А. Писарик [20] составлена карта-схема степени химического загрязнения подземных вод административного района. В этот же период опубликована работа М. О. Хартон и С. А. Хоревой [21], в которой дана оценка нитратного загрязнения вод колодцев Барановичского района, выявлены источники его формирования и рассмотрено влияние на здоровье человека.

В. И. Пашкевичем охарактеризованы особенности формирования нитратного загрязнения грунтовых вод Беларуси. Установлено, что существует прямая связь между уровнями антропогенных нагрузок на почву по азоту на землях разного хозяйственного использования и уровнем нитратного загрязнения грунтовых вод в их пределах. Выявлено, что на участках с незначительными антропогенными нагрузками (заповедники, лесные массивы и др.) значения концентрации нитрат-иона в грунтовых водах колеблются от «не обнаружено» до 9,0 мг/дм^3 (среднее – 1,2 мг/дм^3). На площадях, где осуществляется активная хозяйственная деятельность, естественный гидрогеохимический фон грунтовых вод значительно трансформируется. Показано, что концентрации нитратов в водах колодцев достигают 400–600 мг/дм^3 в границах сельских населенных пунктов [22].

Более детально проблема нитратного загрязнения подземных вод в Беларуси рассмотрена в публикации В. И. Пашкевича с соавторами [23]. В ней дана оценка уровня нитратного загрязнения подземных вод, используемых для централизованного и нецентрализованного водоснабжения. Установлено, что концентрация нитрат-иона в грунтовых водах, эксплуатируемых колодцами, определенная на основании изучения 1029 проб, составляет в среднем 150 мг/дм^3 на участках, подверженных сельскохозяйственному и коммунально-бытовому загрязнению в пределах сельских населенных пунктов. Выявлено, что содержание нитратов в водах колодцев достигает 300–600 мг/дм^3, а в отдельных случаях возрастает до 1400–2500 мг/дм^3. Это наиболее высокие концентрации нитратов, фиксировавшиеся когда-либо в подземных водах на территории Беларуси. Показано, что наиболее подвержены нитратному загрязнению скважины, не имеющие зон санитарной защиты и расположенные вблизи источников загрязнения (животноводческие фермы, селитебные территории и др.).

А. В. Кудельский в своей работе [24] рассмотрел вопросы качества подземных вод в сельской местности и отметил, что многие развитые государства (Франция, Германия и др.) отказываются от колодезного водоснабжения и переходят на скважинное путем эксплуатации более глубокозалегающих и менее загрязненных горизонтов подземных вод. М. Г. Ясовеев с соавторами [25] в своем исследовании отметили неудовлетворительное качество подземных вод на территории Солигорского, Гомельского и Светлогорского промышленных районов. В связи с этим уделено внимание проблеме заболеваемости населения в результате загрязнения питьевой воды и предложены рекомендации по защите и улучшению качества подземных вод.

Повышенные концентрации нитратов в подземных водах зафиксированы не только в европейских странах, но и в азиатском регионе. Y. Umezawa и T. Hosono с соавторами [26] дали оценку состояния загрязнения грунтовых вод, а также описали механизмы, контролирующие источники и пути распределения контаминантов в городах Юго-Восточной Азии. Загрязнение нитратами вод первого безнапорного водоносного горизонта (грунтовые воды) характерно для г. Джакарта, максимальные значения содержания нитрат-ионов составили здесь 763 мг/дм^3. Показано, что загрязнение водоносных горизонтов в Манильской агломерации и г. Бангкок не превышает уровень ПДК. Результаты выполненных исследований показали, что необходимо проводить постоянный мониторинг и управление качеством подземных вод в изученных районах.

Е. В. Колесникова и А. Ф. Симакин [27] проанализировали проявление нитратного загрязнения в грунтовых и подземных водах Тульской области и пришли к выводу, что за последние годы содержание нитратов в питьевой воде в большинстве скважин региона превысило гигиенические нормы от 2 до 5 раз. В результате проведенных работ выявлены источники загрязнения и предложены мероприятия по улучшению качества питьевого водоснабжения.

В 2008 г. проведены специальные гидрогеохимические исследования на территории Брестской, Могилевской, Гомельской, Гродненской областей Беларуси, а также в Минской городской агломерации. Они были направлены на изучение геоэкологических проблем питьевого водоснабжения сельских и городских поселений. В статье А. В. Кудельского, В. И. Пашкевича, М. К. Коваленко [28] приводится

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-174-183

краткая характеристика источников централизованного водоснабжения территории Беларуси. Отмечен высокий уровень нитратного загрязнения подземных вод, вскрываемых скважинами в местах расположения животноводческих комплексов. Установлена максимальная концентрация нитратов в одном из колодцев в д. Краснодворцы Солигорского района – 2492 мг/дм^3.

Для территории г. Бреста и Брестского района В. М. Феденей, С. И. Кузьминым и М. А. Писарик [29] разработано районирование по степени нитратного загрязнения подземных вод. Выделены участки с низкой, средней, периодически высокой и высокой степенью загрязнения. Значительный вклад в изучение проблемы нитратного загрязнения подземных вод был внесен Е. В. Дроздовой и др. [30]. Авторами приведены данные анализа нитратного загрязнения воды из источников и систем хозяйственно-питьевого водоснабжения Республики Беларусь, выполненного в рамках задания 01.02 ОНТП «Здоровье и окружающая среда» (2010–2012 гг.). Установлено, что наиболее неблагоприятная ситуация по загрязнению подземных вод нитрат-ионами источников нецентрализованного водоснабжения характерна для южных областей Беларуси, а также некоторых районов Гродненской (Слонимский, Берестовицкий) и Минской областей (Солигорский, Стародорожский, Слуцкий, Пуховичский). Показано, что в ряде мест уровни содержания нитратов в водах первого от поверхности безнапорного водоносного горизонта (грунтовые воды) превышают значение ПДК, а в шахтных колодцах варьируют от 300–600 мг/дм^3 до 1000–3000 мг/дм^3.

В. Г. Жогло и А. Н. Галкин [31] изучали закономерности формирования и рационального использования ресурсов пресных подземных вод в условиях высокой техногенной нагрузки на водозаборах и экологически опасных объектах юго-востока Беларуси. Было установлено, что значительное влияние на загрязнение подземных вод нитратами оказывают объекты коммунальных служб – свалки твердых бытовых отходов (ТБО), очистные сооружения и т. д. Концентрация нитратов в подземных водах в зонах влияния этих объектов достигала 300–600 мг/дм^3 и более (до 1000–1400 мг/дм^3). Показано, что интенсивное загрязнение подземных вод формируется в пределах животноводческих ферм и полей орошения животноводческими стоками; загрязнению подвержены не только грунтовые, но и более глубоко залегающие напорные подземные воды. Обнаружены повышенные содержания нитратов в эксплуатируемых напорных водоносных горизонтах (от 40 до 128 мг/дм^3) в границах полей орошения животноводческими стоками совхоза-комбината «Сож» Гомельского района.

Л. Л. Новых, Ю. В. Юдиной и Г. А. Ореховой [32] дана оценка загрязнения нитратами вод родников, которые являются памятниками природы регионального значения Белгородской области (Россия). Выявлено, что в большинстве случаев в водах родников фиксировались низкие концентрации нитрат-ионов, не превышающие значения ПДК. Авторы отметили, что основным фактором формирования нитратного загрязнения родниковых вод в изученном регионе является расположение их вблизи животноводческих комплексов, мест складирования коммунально-бытовых отходов.

J. Y. Cheong с соавторами проведены специальные исследования на территории Южной Кореи. Они были направлены на определение источников нитратного загрязнения и оценку факторов, контролирующих концентрацию нитрат-ионов в грунтовых водах. В публикации [33] рассмотрена проблема загрязнения грунтовых вод нитратами в сельскохозяйственном районе г. Кимпхо. Средняя концентрация нитратов в водах составила здесь 79,4 мг/дм^3, что превышает уровень ПДК. Высокие концентрации нитратов в грунтовых водах отмечены на рисовых полях (8–174 мг/дм^3), что связано с загрязнением подземных вод в результате сельскохозяйственной деятельности.

K. Wick, C. Heumesser и E. Schmid [34] также обратили внимание на тот факт, что в Австрии интенсивная сельскохозяйственная деятельность приводит к формированию устойчивого загрязнения нитрат-ионами подземных вод. Установлено, что процент пахотных земель в стране положительно коррелирует с концентрацией нитратов в грунтовых водах. При проведении исследования в качестве индикатора был использован показатель валового баланса азота. Показано, что использование этого показателя помогает более обоснованно прогнозировать загрязнение нитратами подземных вод в регионах с большим количеством атмосферных осадков.

В 2010 г. I. A. Dar, A. D. Mithas и K. Sankar [35] изучили особенности нитратного загрязнения грунтовых вод вследствие чрезмерного использования удобрений на пахотных землях в окрестностях г. Сопор (Индия). Было установлено, что около 85 % проб воды, отобранных в летний период, и 67 % проб, взятых в зимнее время, характеризуются высокой концентрацией нитратов, которая превысила допустимый предел ВОЗ (50 мг/дм^3).

М. Г. Ясовеевым с соавторами [36] были подробно рассмотрены особенности нитратного загрязнения подземных вод Беларуси, и в частности, г. Минска. В 1874 г. в г. Минске был введен в эксплуатацию первый водопровод, который снабжал центральную часть города водой из скважин, расположенных в пойме р. Свислочь, а в 1932 г. был построен первый групповой водозабор «Новинки». В настоящее время здесь наблюдается неблагоприятная экологическая ситуация по отношению к содержанию нитратов в воде. В 2009 г. максимальные значения концентрации нитратов в подземных водах на этом водозаборе достигали 62,3–81,8 мг/дм^3. Авторами разработаны рекомендации по улучшению качества подземных вод и предложены пути их решения, заключающиеся в коммунальном благоустройстве участков расположения локальных источников загрязнения групповых водозаборов.

Т. Г. Флерко и О. В. Шершневым [37] выявлена зависимость химического загрязнения вод колодцев от ландшафтных условий местности. Установлен рост удельного веса нестандартных проб на нитраты в зависимости от процентного соотношения пахотных земель на водосборной площади.

H. W. Khandare [38] проанализированы основные источники загрязнения нитратами подземных вод в промышленных и сельскохозяйственных районах Индии. Показано, что отсутствие канализационных систем способствует загрязнению грунтовых вод нитратами в результате просачивания сточных вод из выгребных ям и прудов-отстойников. Также было отмечено, что колодцы, которые расположены в зоне, где собираются два урожая в год, имеют сравнительно более высокие концентрации нитратов, чем те, которые находятся рядом с полями, где собирается только один урожай. Установлена прямая зависимость уровней нитратного загрязнения грунтовых вод от интенсивности сельскохозяйственной деятельности.

Y. Hamed, S. Awad и A. B. Saad [39] изучили загрязнение нитратами подземных вод в районе оазисов Сиди-Айч–Гафса (Южный Тунис). Установлено, что в орошаемой грунтовыми водами области в бассейне оазисов Гафса, где забор воды из подземного водоносного горизонта увеличился в три раза за последние 25 лет, концентрация нитрат-иона колеблется от 16 до 320 мг/дм^3. Были предложены меры по защите грунтовых вод от загрязнения, включающие обслуживание и модернизацию септических систем, сокращение общей нормы внесения азотных удобрений и т. д. Рекомендовано акцентировать внимание на том факте, что для отдельных областей Северной Африки характерна чрезмерная эксплуатация ресурсов подземных вод, вследствие чего происходит ухудшение их качества и истощение.

Изучение проблемы нитратного загрязнения подземных вод в различных регионах России занимались О. В. Клецкина, И. И. Минькевич, Е. А. Аверина, В. А. Шкаликов, И. В. Анкинович и др. О. В. Клецкиной и И. И. Минькевич установлено, что наиболее интенсивное загрязнение подземных вод происходит на участках размещения жидких и пастообразных отходов химического производства, в местах складирования бытовых отходов, промышленных площадок [40]. Е. А. Аверина с соавторами [41] представили результаты санитарно-гигиенической оценки содержания нитратов в источниках нецентрализованного водоснабжения г. Владивостока. Было выявлено, что в водах пяти из тринадцати исследованных колодцев содержание нитратов превышало норму (50–100 мг/дм^3). В. А. Шкаликов и И. В. Анкинович [42] проанализировали химический состав вод родниковых источников на территории г. Смоленска и пришли к выводу, что их нитратное загрязнение происходит вследствие существования большого числа свалок мусора на водосборной территории. Вероятность поступления нитратов в воды повышается в периоды выпадения значительного количества атмосферных осадков.

В это же время А. В. Каримовой [43] изучено содержание нитрат-ионов в питьевых водах Восточно-Казахстанской области. Дана экологическая оценка питьевых вод исследуемого региона, а также

показано, что в сельскохозяйственных районах наблюдается превышение содержания нитратов в подземных водах в результате интенсивного применения азотных удобрений. В 2014 г. А. А. Светличным и С. В. Плотницким [44] представлено обоснование структуры, методики и результатов создания геоинформационной базы для обеспечения оценки потенциала нитратного загрязнения поверхностных и подземных вод на территории Одесской области.

В 2015 г. исследователями из разных стран были опубликованы результаты исследований геоэкологического состояния родников и их загрязнения нитратами. Г. А. Ореховой и Л. Л. Новых [45] проанализирована динамика содержания нитратов в водах родников урочища «Маршалково» Белгородской области (Россия). Мониторинговые работы, проведенные в течение двух лет позволили выявить, что концентрация азота в грунтовых водах характеризуется четко выраженной цикличностью и имеет два максимума – весенний и осенний. В этом же году Р. В. Галиулиным и др. публикуются результаты исследований по содержанию нитратов в подземных водах г. Челябинска и его окрестностей. Установлено превышение уровня ПДК по нитратам в подземных водах в 1,7–4,0 раза. В родниковых водах содержание нитратов было ниже значения ПДК, однако вниз по течению р. Миасс наблюдалось увеличение их концентрации. Сделан вывод, что важным водоохранным мероприятием является осуществление системного контроля за содержанием нитрат-иона в питьевой воде в условиях использования источников нецентрализованного водоснабжения (колодцев, неглубоких скважин, родников) [46].

Е. М. Нестеров и С. Д. Магомета [47] изучали проблему загрязнения вод питьевого назначения Брянского Полесья (Россия). Из 1199 исследованных колодцев и родников в 544 обнаружено нитратное загрязнение вод с концентрацией более 45 мг/дм^3 (от 50 до 500 мг/дм^3 и выше). Межпластовые артезианские воды исследованного региона по сравнению с грунтовыми водами загрязнены нитратами в единичных случаях. Выявлены основные причины формирования нитратного загрязнения, среди которых названы низкое качество санитарно-технического состояния источников нецентрализованного водоснабжения, а также отсутствие биологической очистки сточных вод.

В публикациях Г. Ю. Воронюка, И. В. Шумигай, О. Ю. Тарасова, Q. Zhang, V. Yakovlev и др. дана геоэкологическая оценка подземных вод источников питьевого водоснабжения России (Ленинградская область), восточных регионов Украины, Республики Татарстан и Южного Китая, а также рассмотрены аспекты негативного влияния повышенного содержания нитратов в грунтовых водах на здоровье человека [48–52].

В последние годы в Беларуси постоянно уделяется пристальное внимание контролю качества подземных вод как централизованного, так и нецентрализованного водоснабжения, снижению массовой концентрации нитратов в воде шахтных колодцев, проведению гидрогеохимического мониторинга подземных вод. Предложены и разработаны рекомендации по предотвращению загрязнения источников питьевого водоснабжения. Результаты исследований опубликованы А. В. Кудельским, В. И. Пашкевичем, О. В. Васневой, Б. Н. Житеневым, С. В. Андреюк, А. А. Острейко, С. Н. Баитовой, Л. А. Наумовичем, Е. А. Ревтович, Т. Г. Флерко, В. Д. Гайдук, Н. В. Буневичем, Т. Н. Агеевой и др.

И. В. Галицкой, В. И. Пашкевичем и Г. И. Батрак в работе [53] рассмотрены факторы формирования качества подземных вод в Минской и Московской городских агломерациях. Отмечен закономерный рост антропогенного загрязнения подземных вод основного эксплуатационного горизонта – днепровско-сожского. Установлено, что наиболее интенсивное нитратное загрязнение подземных вод характерно для группового водозабора «Новинки». В 2009 г. максимальное содержание нитратов в подземных водах этого водозабора составило 62,3–81,8 мг/дм^3, а превышение уровня ПДК зафиксировано в девяти скважинах.

Результаты комплексных наблюдений за геоэкологическим состоянием подземных вод на водозаборе «Новинки» обобщены и опубликованы О. В. Васневой с соавторами [54]. С применением метода математического моделирования процессов геофильтрации и геомиграции подземных вод выделены участки расположения потенциальных источников загрязнения подземных вод и дана их характеристика.

Определен перечень мероприятий по улучшению качества вод на данном водозаборе. В диссертационной работе О. В. Васневой изложены результаты оценки влияния источников загрязнения на химический состав и качество подземных вод Минской городской агломерации. Для решения проблем обеспечения качества и охраны подземных вод от загрязнения предложен методологический подход, основанный на рекомендациях по созданию геофильтрационных и геомиграционных математических моделей [55].

Отдельными исследователями были рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с методами очистки подземных вод от нитратов. В публикациях Б. Н. Житенева и С. В. Андреюк представлены результаты экспериментальных исследований по определению емкости ионитов, использующихся в процессе очистки воды от нитратов методом ионного обмена с целью улучшения качества вод источников питьевого водоснабжения. Особое внимание уделено изучению нитратного загрязнения подземных вод в Брестском регионе и Беларуси в целом. Разработаны технологические схемы очистки подземных вод от нитратов и железа для систем индивидуального водоснабжения [56, 57].

С. Н. Баитовой и Н. Е. Журавской на территории Могилевской области зафиксировано повышенное содержание нитрат-ионов в некоторых родниках, связанное с антропогенным воздействием (интенсивная сельскохозяйственная деятельность). Концентрация нитратов в водах родников составила от 13,1 до 107,0 мг/дм^3 [58].

В зарубежной научной периодике в период с 2016 по 2018 гг. опубликованы статьи по результатам мониторинга загрязнения нитратами подземных вод в различных регионах мира, а также оценке суммарного риска для здоровья человека (A. Mencio и др. [59], В. В. Дребот, Е. А. Солдатова [60], Д. О. Иванов [61]). Продолжены исследования по изучению нитратного загрязнения вод источников нецентрализованного водоснабжения (колодцы, родники, неглубокие скважины). В статье И. И. Косиновой с соавторами [62] отражены результаты мониторинга качества подземных вод гг. Севастополе и Бахчисарае. Выявлено около 700 очагов загрязнения водоносных горизонтов в районах водозаборов централизованного питьевого водоснабжения, где содержание нитратов достигло 360 мг/дм^3.

В статье Г. А. Сигора и др. [63] отражено изменение степени загрязненности нитрат-ионами родников г. Севастополя. Проанализирована динамика изменения концентраций нитратов в водах родников города за пять лет (2013–2018 гг.), выявлена тенденция к увеличению уровня их загрязнения нитратами. Показано, что в мае 2015 г. значение ПДК по нитрат-иону в водах одного из исследованных родников был превышен в девять раз.

В это же время A. E. Lawniczak с соавторами [64] изучено влияние сельского хозяйства и землепользования в целом на загрязнение нитратами грунтовых вод в центральных и западных районах Польши. Были проведены комплексные мониторинговые исследования с целью оценки воздействия сельского хозяйства на качество подземных вод на охраняемой территории (Великопольский национальный парк и прилегающая к нему территория). Показано, что на водоразделах, где преобладают пахотные земли, отмечаются высокие концентрации азота в грунтовых водах. В одной из исследованных скважин было обнаружено аномально высокое значение концентрации нитрат-ионов в подземных водах, подверженных загрязнению из сельскохозяйственных источников, превышающее уровень ПДК почти в девять раз.

За последние пять лет (2020–2025 гг.) появилось много оригинальных работ, посвященных различным аспектам нитратного загрязнения подземных вод. Среди них следует отметить публикации И. И. Косиновой, Э. Н. Тирского, Н. Н. Ткаченко, А. С. Боевой, О. В. Клецкиной, П. А. Красильникова, О. А. Соболевой, В. Н. Башкина, S. Ramalingam, N. O. Kitterød, А. А. Шварца, Л. В. Кирейчевой, Т. Н. Ткачевой, И. И. Шигапова, Ж. С. Баимовой и др.

В работе [65] рассмотрены состояние ресурсов и качество подземных вод в странах Северной Европы и Балтии. В результате проведенных исследований было выявлено, что в центральной и восточной части Эстонии среднее значение концентрации нитратов выше уровня ПДК (норма 50 мг/дм^3) зафиксировано в более чем 15 % точек мониторинга подземных вод. Самые высокие концентрации нитрат-ионов в подземных водах Латвии зафиксированы в неглубоких

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-174-183

скважинах (до 5 м) и родниках; полученные значения не превысили ПДК, но были выше естественного фона, особенно в родниках. В Литве превышение уровня ПДК по нитратам в подземных водах наблюдалось на 10 % всех станций мониторинга. Наиболее подвержена нитратному загрязнению подземная гидросфера крупных литовских городов – Вильнюса, Каунаса, Клайпеды. Ухудшение качества воды в них объясняется инфильтрацией недостаточно очищенных сточных вод в более глубокие водоносные горизонты. В Дании применение азота в сельском хозяйстве регулируется с 1980-х гг. В 2016 г. на водосборах, сложенных преимущественно песчаными отложениями, концентрации нитратов в грунтовых водах превысили уровень ПДК примерно в 70 % точек мониторинга. Тенденция к снижению содержания нитратов в подземных водах была обнаружена в точках мониторинга в периоды 1985–1998 и 1999–2014 гг.

Гидрогеохимическая оценка подземных вод г. Липецка и Липецкой области дана в публикации И. И. Косиновой и Р. А. Ляпина [66]. Впервые увеличение концентрации нитратов в подземных водах г. Липецка зафиксировано в 1977 г. на одном из водозаборов. По результатам работ установлены повышенные содержания нитратов в водоносных комплексах области – от 45 до 135 мг/дм^3. Авторами проанализировано геоэкологическое состояние водоносных комплексов Липецкой области, выделены точечные источники загрязнения подземных вод, а также даны рекомендации о необходимости внедрения системы экологического менеджмента, которая позволит повысить эффективность управленческих решений для обеспечения экологической безопасности.

S. Ramalingam, B. Panneerselvam и S. P. Kaliappan [67] рассмотрен вопрос о влиянии высокого уровня содержания нитратов в грунтовых водах на здоровье человека среди различных возрастных групп в полузасушливом регионе Южной Индии. На изученной территории значения концентрации нитратов в грунтовых водах варьировали от 24 до 78 мг/дм^3. В 50 % проанализированных проб превышен предельно допустимый уровень содержания нитратов (45 мг/дм^3). Выявлены основные источники загрязнения нитратами грунтовых вод, среди которых названы неправильная утилизация бытовых отходов из жилых зон, а также интенсивное использование минеральных удобрений на пахотных землях.

Анализ современного состояния подземной гидросферы Беларуси и характеристика связанных с ней геоэкологических проблем выполнены В. И. Пашкевичем и О. В. Васневой в работе [68]. Авторами ресурсы подземных вод рассматриваются как один из видов ценных полезных ископаемых страны. Показано, что содержание нитратов в водах колодцев может достигать 300–500 мг/дм^3 (7–11 ПДК); неблагополучными по этому показателю были признаны 40–80 % колодцев, обследованных в период 1990–2010 гг.

Анализ отечественного и международного опыта изучения проблемы нитратного загрязнения подземных вод показал, что она является актуальной для многих регионов и стран мира. Специальные работы, касающиеся установления источников поступления соединений азота в грунтовые воды и более глубокозалегающие напорные воды, определения значений концентрации в них нитрат-иона, пространственного распространения загрязнения проводились на протяжении последних 60–70 лет и выполняются в настоящее время. Прогресс в научных исследованиях по рассматриваемому в настоящей статье вопросу, позволил не только определить общие особенности формирования и охарактеризовать динамику нитратного загрязнения подземных вод, но и разработать практические предложения и технологические решения по предотвращению и/или минимизации поступления контаминантов в подземную гидросферу, управлению геоэкологическим риском для здоровья человека. Однако, несмотря на большое число публикаций по проблеме нитратного загрязнения подземных вод и пристальное внимание к ней со стороны научного сообщества, природоохранных организаций и ведомств, в Беларуси исследования по большей части выполнены по отдельным водозаборам или объектам в пределах отдельных административных единиц. Это обусловливает необходимость проведения комплексного и детального изучения закономерностей формирования нитратного загрязнения подземных вод, что позволит более обоснованно подходить к разработке путей решения этой важной геоэкологической проблемы.

Заключение

За более чем шестидесятилетний период исследований накоплен обширный материал по загрязнению нитрат-ионами подземных вод источников централизованного и нецентрализованного водоснабжения (колодцы, родники, скважины) в различных регионах и странах мира. На основании полученных результатов специалистами разработаны мероприятия по улучшению качества подземных вод, реализуются мониторинговые гидрогеохимические исследования вод источников питьевого водоснабжения, разработаны и применяются геоинформационные системы для оценки пространственного распределения нитратов в подземных водах, оценено негативное влияние повышенного содержания нитратов в подземных водах на здоровье человека.

Из числа зарубежных авторов весомый вклад в изучение рассматриваемой проблемы внесли И. И. Косинова, Р. В. Галиулин, Н. Н. Ткаченко, Н. И. Петухов, О. Ю. Тарасов, Г. А. Сигора, Е. М. Нестеров и С. Д. Магомета, Е. В. Пиннекер, С. Л. Шварцев, А. А. Светличный, С. В. Плотницкий, Т. П. Качановская, П. Д. Клоченко, A. E. Lawniczak, K. Osenbrück, R. Wolter, S. Ramalingam, I. A. Dar, Q. Zhang, A. Klimas, N. O. Kitterød, A. E. Williams, G. R. Hallberg, J. F. Power и др. В Беларуси значимые результаты, посвященные вопросу нитратного загрязнения подземных вод получены А. В. Кудельским, М. П. Оношко, В. И. Пашкевичем, Г. Н. Новиковым, В. Н. Яромским, Б. Н. Житеневым, В. Г. Жогло, Е. В. Дроздовой, О. В. Васневой, О. В. Шершневым, А. Н. Галкиным, Т. Г. Флерко и др.

В настоящее время загрязнение подземных вод нитратами остается одной из актуальных геоэкологических проблем, как в мире, так и в Беларуси. Однако нужно констатировать, что результаты проведенных в нашей стране исследований по большей части посвящены отдельным водозаборам или объектам в пределах определенных административных единиц.

Анализ проблемы нитратного загрязнения подземных вод позволил выделить мероприятия по минимизации вредного воздействия нитрат-ионов на окружающую среду и человека. Среди них, проведение коммунального благоустройства населенных пунктов, рациональное применение на сельскохозяйственных угодиях минеральных и органических удобрений. Необходимо также улучшение контроля за состоянием качества подземных вод и процессами распространения загрязнения, совершенствование существующей системы мониторинга подземных вод в районах водозаборов. В качестве мер по улучшению водоснабжения в сельских населенных пунктах может быть рекомендовано использование ионообменных фильтров для очистки вод от нитратов, однако кардинальным решением является перевод водоснабжения на использование артезианских скважин, эксплуатирующих более глубокие водоносные горизонты.

Необходима постановка специальных работ с целью изучения общих закономерностей формирования нитратного загрязнения подземных вод и разработки рекомендаций по улучшению качества вод хозяйственно-питьевого назначения, уменьшению негативных последствий для окружающей среды и здоровья человека.

Список цитированных источников

1. Петухов, Н. И. К вопросу о миграции нитратов в почве и грунтовых водах / Н. И. Петухов // Гигиена и санитария. – 1969. – № 12. – С. 76–78.
2. Пашкевич, В. И. Гидрогеологические факторы, определяющие комфортность среды обитания человека на территории Центральной Беларуси / В. И. Пашкевич, Е. А. Кухарик, А. М. Кухарик // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 131–137. – DOI: 10.47612/2079-3928-2025-1-131-137.
3. Strebel, O. Nitrate Pollution of Groundwater in Western Europe / O. Strebel, W. H. M. Duynisveld, J. Böttcher // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 1989. – Vol. 26, Iss. 3–4. – P. 189–214. – DOI: 10.1016/0167-8809(89)90013-3.
4. Hallberg, G. R. Nitrate in Ground Water in the United States / G. R. Hallberg // Developments in Agricultural & Managed Forest Ecology. – 1989. – Vol. 21. – P. 35–74. – DOI: 10.1016/B978-0-444-87393-4.50009-5.

5. Power, J. F. Nitrate Contamination of Groundwater in North America / J. F. Power, J. S. Schepers // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 1989. – Vol. 26, Iss. 3–4. – P. 165–187. – DOI: 10.1016/0167-8809(89)90012-1.
6. Impact of Diffuse Nitrate Pollution Sources on Groundwater Quality – Some Examples from Czechoslovakia / V. Benes, V. Pekny, J. Skorepa, J. Vrba // Environmental Health Perspectives. – 1989. – Vol. 83. – P. 5–24. – DOI: 10.1289/ehp.89835.
7. Хвесик, М. А. О предупреждении загрязнения подземных и поверхностных вод / М. А. Хвесик // Гигиена и санитария. – 1990. – № 10. – С. 16–18.
8. Клоченко, П. Д. Особенности накопления нитратов и нитритов в источниках питьевого назначения / П. Д. Клоченко, А. И. Сакевич // Гигиена и санитария. – 1991. – № 6. – С. 17–20.
9. Klimas, A. Nitrate contamination of groundwater In the Republic of Lithuania / A. Klimas, B. Paukstys // Nor. geol. unders. Bull. – 1993. – Vol. 424. – P. 75–85.
10. НСМОС Беларуси – 30 лет! Перспективы развития : научно-практическое издание / под общ. ред. главного информационно-аналитического центра Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь. – Минск, 2023. – 94 с.
11. Пресные подземные воды Беларуси (ресурсы и качество) / А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич, М. Г. Ясовеев [и др.] // Літасфера. – 1994. – № 1. – С. 160–167.
12. Оношко, М. П. Азот в окружающей среде Беларуси : автореф. дис. … д-ра геол.-мин. наук : 04.00.02 / Мария Петровна Оношко ; Ин-т геологических наук НАН Беларуси. – Минск, 1998. – 30 с.
13. Азот в водах Западного Поозерья / Г. В. Новиков, М. П. Оношко, Н. А. Капельщиков [и др.] // Вестник БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География. – 1998. – № 1. – С. 53–57.
14. Natural and Anthropogenic Nitrate Contamination of Groundwater in a Rural Community, California / A. E. Williams, L. J. Lund, J. A. Johnson, Z. J. Kabala // Environmental Science & Technology. – 1998. – Vol. 32, Iss. 1. – P. 32–39. – DOI: 10.1021/es970393a.
15. Wolter, R. Nitrate contamination of surface and groundwater in Germany – results of monitoring / R. Wolter // Water and Sustainable Development. – 2004. – Vol. 48. – P. 71–84.
16. Timescales and development of groundwater pollution by nitrate in drinking water wells of the Jahna-Aue, Saxonia, Germany / K. Osenbrück, S. Fiedler, K. Knöller [et al.] // Water Resources Research. – 2006. – Vol. 42, W12416. – P. 1–20. – DOI: 10.1029/2006WR004977.
17. Качановская, Т. П. Исследование качества подземных вод г. Харькова / Т. П. Качановская // Коммунальное хозяйство городов. – 2006. – № 74. – С. 218–222.
18. Nas, B. Groundwater contamination by nitrates in the city of Konya (Turkey): A GIS perspective / B. Nas, A. Berktay // Journal of Environmental Management. – 2006. – Vol. 79, Iss. 1. – P. 30–70. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.05.010.
19. Прудовский, Э. Л. Проблемы площадного нитратного загрязнения подземных вод Липецкой области / Э. Л. Прудовский, С. М. Бойко // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 7. – С. 70–74.
20. Калинин, М. Ю. Степень химического загрязнения подземных вод Барановичского района / М. Ю. Калинин, М. А. Писарик // Вестник Брестского государственного технического университета Серия: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – 2001. – № 2. – С. 63–66.
21. Хартон, М. О. Оценка уровней нитратного загрязнения колодезных вод Барановичского района / М. О. Хартон, С. А. Хорева // Наука – образованию, производству, экономике : материалы V междунар. науч.-технич. конф. : в 2 т. / Белорусский нац. технич. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталев, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск : БНТУ, 2007. – Т. 2. – С. 464–468.
22. Пашкевич, В. И. Условия формирования нитратного загрязнения грунтовых вод Беларуси / В. И. Пашкевич // Природопользование и охрана окружающей среды – 2000 : сб. ст. ; редкол.: И. И. Лиштван (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ИПИПРЭ НАН Беларуси, 2000. – С. 30–31.
23. Оценка уровней нитратного загрязнения подземных вод, используемых для централизованного и нецентрализованного водоснабжения / В. И. Пашкевич, В. Д. Коркин, Н. П. Волкова [и др.] // Природные ресурсы. – 2003. – № 3. – С. 101–102.
24. Кудельский, А. В. Водные ресурсы Беларуси: состояние, проблемы и перспективы использования / А. В. Кудельский // Наука и инновации. – 2006. – № 10 (44). – С. 13–14.
25. Пресные подземные воды Беларуси: ресурсы и качество / М. Г. Ясовеев, Н. В. Ястребова, Н. И. Ясовеева, О. В. Шершнев // Весці БДПУ. Серыя 3. Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія. – 2007. – № 2. – С. 67–71.
26. Sources of nitrate and ammonium contamination in groundwater under developing Asian megacities / Y. Umezawa, T. Hosono, S. Onodera [et al.] // Science of The Total Environment. – 2008. – Vol. 404, Iss. 2–3. – P. 361–376. – DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2008.04.021.
27. Колесникова, Е. В. Проявление нитратного загрязнения в грунтовых и подземных водах / Е. В. Колесникова, А. Ф. Симакин // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики : материалы V Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Тула, 28–30 окт. 2009 г. : в 2 т. / Тульский гос. ун-т ; под общ. ред. Р. А. Ковалева – Тула : ТулГУ, 2009. – Т. 2. – С. 333–336.
28. Кудельский, А. В. Питьевые воды Беларуси / А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич, М. К. Коваленко // Питание и обмен веществ : сб. науч. ст. / НАН Беларуси, Ин-т фармакологии и биохимии ; под ред. А. Г. Мойсеенка. – Минск, 2008. – Вып. 3. – С. 134–143.
29. Феденя, В. М. Экологическое состояние подземных вод г. Бреста / В. М. Феденя, С. И. Кузьмин, М. А. Писарик // Проблемы водоснабжения, водоотведения и энергосбережения в западном регионе Республики Беларусь : сб. материалов междунар. науч.-технич. конф., посвящ. 65-летию Победы в Великой Отечественной войне, Брест, 22–23 апр. 2010 г. / Мин-во образования Респ. Беларусь, Брестский гос. технич. ун-т ; редкол.: С. В. Басов [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2010. – С. 336–339.
30. Дроздова, Е. В. Нитратное загрязнение питьевых вод в Республике Беларусь: анализ состояния проблемы и обоснование направлений дальнейших исследований / Е. В. Дроздова, В. В. Бурая, В. А. Рудик // Здоровье и окружающая среда : сб. науч. тр. / Респ. науч.-практ. центр гигиены ; редкол.: В. П. Филонов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. – Вып. 15. – С. 56–62.
31. Жогло, В. Г. Мониторинг подземных вод на водозаборах и экологически опасных объектах юго-востока Беларуси / В. Г. Жогло, А. Н. Галкин. – Витебск : ВГУ им. П. М. Машерова, 2008. – 161 с.
32. Новых, Л. Л. Влияние положения родников в ландшафтах на содержание нитратов в их водах / Л. Л. Новых, Ю. В. Юдина, Г. А. Орехова // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2012. – Т. 18, № 3 (122). – С. 242–250.
33. Groundwater nitrate contamination and risk assessment in an agricultural area, South Korea / J. Y. Cheong, S. Y. Hamm, J. H. Lee [et al.] // Environmental Earth Sciences. – 2012. – Vol. 66. – P. 1127–1136. – DOI: 10.1007/s12665-011-1320-5.
34. Wick, K. Groundwater nitrate contamination: Factors and indicators / K. Wick, C. Heumesser, E. Schmid // Journal of Environmental Management. – 2012. – Vol. 111. – P. 178–186. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.06.030.
35. Dar, I. A. Nitrate contamination in groundwater of Sopore town and its environs, Kashmir, India / I. A. Dar, A. D. Mithas, K. Sankar // Arabian Journal of Geosciences. – 2010. – Vol. 3. – P. 267–272. – DOI: 10.1007/s12517-009-0067-8.
36. Ясовеев, М. Г. Экологические аспекты формирования качества вод на групповых водозаборах Минской агломерации / М. Г. Ясовеев, Д. Д. Таликадзе, А. А. Колосовский // Весці БДПУ. Серыя 3. Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія. – 2013. – № 1 (75). – С. 19–23.
37. Флерко, Т. Г. Ландшафтно-экологические условия размещения сельских поселений Гомельской области и химическое загрязнение вод колодцев / Т. Г. Флерко, О. В. Шершнев // Природопользование. – 2012. – Вып. 21. – С. 166–173.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-174-183

38. Khandare, H. W. Scenario of Nitrate contamination in Groundwater: Its causes and Prevention / H. W. Khandare // International Journal of ChemTech Research. – 2013. – Vol. 5, No. 4. – P. 1921–1926.
39. Hamed, Y. Nitrate contamination in groundwater in the Sidi Aïch–Gafsa oases region, Southern Tunisia / Y. Hamed, S. Awad, A. B. Saad // Environmental Earth Sciences. – 2013. – Vol. 70. – P. 2335–2348. – DOI: 10.1007/s12665-013-2445-5.
40. Клецкина, О. В. Азотное загрязнение подземных вод и управление их качеством в промышленных районах / О. В. Клецкина, И. И. Минькевич // Вестник Пермского университета. Геология. – 2013. – № 4 (21). – С. 8–20.
41. Нитраты в колодезной воде Владивостока / Е. А. Аверина, И. А. Андаякова, С. В. Зарецкая, Ю. В. Ковалева // Здоровье. Медицинская экология. Наука. – 2013. – № 2–3 (52). – С. 28–29.
42. Шкаликов, В. А. Химический состав основных источников подземных вод на территории г. Смоленска / В. А. Шкаликов, И. В. Анкинович // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2013. – № 5. – С. 448–454.
43. Каримова, А. В. Содержание нитрат-ионов в питьевых водах Восточно-Казахской области / А. В. Каримова // Мир науки, культуры, образования. – 2013. – № 4 (41). – С. 402–405.
44. Светличный, А. А. Геоинформационная база данных оценки потенциала нитратного загрязнения поверхностных и грунтовых вод / А. А. Светличный, С. В. Плотницкий // Вісник Одеський національний університет. Серія: Географічні та геологічні науки. – 2014. – Т. 19, вип. 2. – С. 58–69.
45. Орехова, Г. А. Динамика содержания нитратов в водах родников урочища «Маршалково» / Г. А. Орехова, Л. Л. Новых // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах : материалы VI Междунар. науч. конф., Белгород, 12–16 окт. 2015 г. ; отв. ред. П. В. Голеусов. – Белгород : Политерра, 2015. – С. 277–280.
46. Галиулин, Р. В. Загрязнение нитратами водных экосистем при антропогенной нагрузке / Р. В. Галиулин, Р. А. Галиулина, Р. Р. Хоробрых // Вода: химия и экология. – 2015. – № 11 (89). – С. 3–6.
47. Нестеров, Е. М. Экологические проблемы питьевого водоснабжения Брянского Полесья / Е. М. Нестеров, С. Д. Магомета // География: развитие науки и образования : коллективная монография по материалам Междунар. науч.-практич. конф. LXVIII Герценовские чтения, посвящ. 70-летию создания ЮНЕСКО, Санкт-Петербург, 22–25 апр. 2015 г. ; отв. ред. В. П. Соломин, В. А. Румянцев, В. А. Субетто, Н. В. Ловелиус. – СПб. : Российский гос. педагогич. ун-т им. А. И. Герцена, 2015. – С. 321–326.
48. Воронюк, Г. Ю. Пространственно-временная изменчивость химического состава подземных вод на территории Ижорского плато / Г. Ю. Воронюк, В. М. Питулько, В. В. Кулибаба // Региональная экология. – 2015. – № 6 (41). – С. 67–79.
49. Шумигай, И. В. Влияние нитратов подземных вод на состояние здоровья населения / И. В. Шумигай // Агроекологічний журнал. – 2015. – № 4. – С. 53–58.
50. Нитратное загрязнение подземных вод на территории Республики Татарстан / О. Ю. Тарасов, И. И. Шакирова, Ф. М. Абдуллина, Р. Ч. Юранец-Лужаева // Экология и промышленная безопасность. – 2015. – № 1–2. – С. 33–35.
51. Driving mechanism and sources of groundwater nitrate contamination in the rapidly urbanized region of south China / Q. Zhang, J. Sun, J. Liu [et al.] // Journal of Contaminant Hydrology. – 2015. – Vol. 182. – P. 221–230. – DOI: 10.1016/j.jconhyd.2015.09.009.
52. Nitrates in springs and rivers of East Ukraine: Distribution, contamination and fluxes / V. Yakovlev, Y. Vystavna, D. Diadin, Y. Vergeles // Applied Geochemistry. – 2015. – Vol. 53. – P. 71–78. – DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.12.009.
53. Галицкая, И. В. Качество пресных подземных вод Минской и Московской городских агломераций: современное состояние, тенденции изменения, возможность управления / И. В. Галицкая, В. И. Пашкевич, Г. И. Батрак // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2015. – № 4. – С. 340–351.
54. Геоэкологическое состояние подземных вод на водозаборе «Новинки» Минска и разработка мероприятий по предотвращению их антропогенного загрязнения / О. В. Васнева, В. И. Пашкевич, А. Н. Авхимович [и др.] // Літасфера. – 2016. – № 2 (45). – С. 122–128.
55. Васнева, О. В. Оценка влияния источников загрязнения на химический состав и качество подземных вод Минской городской агломерации : дис. … канд. геол.-мин. наук : 25.01.07 / Васнева Ольга Владимировна ; РУП «НПЦ по геологии». – Минск, 2014. – 333 л.
56. Житенев, Б. Н. Снижение массовой концентрации нитратов в воде шахтных колодцев для водоснабжения / Б. Н. Житенев, С. В. Андреюк // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2016. – № 2 (98). – С. 62–65.
57. Житенев, Б. Н. Современное состояние проблемы загрязнения подземных вод Беларуси соединениями азота и пути ее решения / Б. Н. Житенев, С. В. Андреюк // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2016. – № 4 (100). – С. 52–57.
58. Баитова, С. Н. Мониторинг содержания нитратов в подземных водах / С. Н. Баитова, Н. Е. Журавская // SWorldJournal. – 2022. – № 11 (01). – С. 62–67. – DOI: 10.30888/2663-5712.2022-11-01-087.
59. Nitrate pollution of groundwater; all right…, but nothing else? / A. Mencio, J. Mas-Pla, N. Otero [et al.] // Science of the Total Environment. – 2016. – Vol. 539. – P. 241–251. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.151.
60. Дребот, В. В. Оценка суммарного риска для здоровья человека в связи с распространением нитратного загрязнения грунтовых вод в районе озера Поянху (Китай) / В. В. Дребот, Е. А. Солдатова // Экология энергетики – 2017 : труды Междунар. науч. конф. молодых ученых и специалистов, Москва, 23–24 нояб. 2017 г. – М. : МЭИ, 2017. – С. 36–38.
61. Иванов, Д. О. Азотсодержащие компоненты в подземных водах / Д. О. Иванов // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2017. – № 17. – С. 197–201.
62. Мониторинг загрязненности нитрат-ионами подземных вод территории городов Севастополя и Бахчисарай / И. И. Косинова, Г. А. Сигора, Л. А. Ничкова [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2016. – № 3. – С. 123–127.
63. Изменение загрязненности нитрат-ионами родников города Севастополя / Г. А. Сигора, Т. В. Ляшко, Л. А. Ничкова, Т. Ю. Хоменко // Системы контроля окружающей среды. – 2018. – № 14 (34). – С. 150–156. – DOI: 10.33075/2220-5861-2018-4-150-156.
64. Impact of agriculture and land use on nitrate contamination in groundwater and running waters in central-west Poland / A. E. Lawniczak, J. Zbierska, B. Nowak [et al.] // Environmental Monitoring and Assessment. – 2016. – Vol. 188, № 172. – P. 1–17. – DOI: 10.1007/s10661-016-5167-9.
65. Hydrogeology and groundwater quality in the Nordic and Baltic countries / N. O. Kitterød, J. Kvaerner, P. Aagaard [et al.] // Hydrology Research. – 2022. – Vol. 53, Iss. 7. – P. 958–982. – DOI: 10.2166/nh.2022.018.
66. Косинова, И. И. Система экологического менеджмента состояния неоген-четвертичного и верхнедевонского водоносных комплексов территории Липецкой области / И. И. Косинова, Р. А. Ляпин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2020. – № 2. – С. 83–89. – DOI: 10.17308/geology.2020.2/2862.
67. Ramalingam, S. Effect of high nitrate contamination of groundwater on human health and water quality index in semi-arid region, South India / S. Ramalingam, B. Panneerselvam, S. P. Kaliappan // Arabian Journal of Geosciences. – 2022. – Vol. 15, No. 242. – C. 1–14. – DOI: 10.1007/s12517-022-09553-x.
68. Пашкевич, В. Гидроминеральные ресурсы / В. Пашкевич, О. Васнева // Наука и инновации. – 2025. – № 3. – С. 11–15.

References

1. Petuhov, N. I. K voprosu o migracii nitratov v pochve i gruntovyh vodah / N. I. Petuhov // Gigiena i sanitariya. – 1969. – № 12. – S. 76–78.

2. Pashkevich, V. I. Gidrogeologicheskie faktory, opredelyayushchie komfortnost' sredy obitaniya cheloveka na territorii Central'noj Belarusi / V. I. Pashkevich, E. A. Kuharik, A. M. Kuharik // Prirodopol'zovanie. – 2025. – № 1. – S. 131–137. – DOI: 10.47612/2079-3928-2025-1-131-137.
3. Strebel, O. Nitrate Pollution of Groundwater in Western Eu-rope / O. Strebel, W. H. M. Duynisveld, J. Böttcher // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 1989. – Vol. 26, Iss. 3–4. – P. 189–214. – DOI: 10.1016/0167-8809(89)90013-3.
4. Hallberg, G. R. Nitrate in Ground Water in the United States / G. R. Hallberg // Developments in Agricultural & Managed Forest Ecology. – 1989. – Vol. 21. – P. 35–74. – DOI: 10.1016/B978-0-444-87393-4.50009-5.
5. Power, J. F. Nitrate Contamination of Groundwater in North America / J. F. Power, J. S. Schepers // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 1989. – Vol. 26, Iss. 3–4. – P. 165–187. – DOI: 10.1016/0167-8809(89)90012-1.
6. Impact of Diffuse Nitrate Pollution Sources on Groundwater Quality – Some Examples from Czechoslovakia / V. Benes, V. Pekny, J. Skorepa, J. Vrba // Environmental Health Perspectives. – 1989. – Vol. 83. – P. 5–24. – DOI: 10.1289/ehp.89835.
7. Hvesik, M. A. O preduprezhdenii zagryazneniya podzemnyh i poverhnostnyh vod / M. A. Hvesik // Gigiena i sanitariya. – 1990. – № 10. – S. 16–18.
8. Klochenko, P. D. Osobennosti nakopleniya nitratov i nitritov v istochnikah pit'evogo naznacheniya / P. D. Klochenko, A. I. Sakevich // Gigiena i sanitariya. – 1991. – № 6. – S. 17–20.
9. Klimas, A. Nitrate contamination of groundwater In the Republic of Lithuania / A. Klimas, B. Paukstys // Nor. geol. unders. Bull. – 1993. – Vol. 424. – P. 75–85.
10. NSMOS Belarusi – 30 let! Perspektivy razvitiya : nauchno-prakticheskoe izdanie / pod obshch. red. glavnogo infor-macionno-analiticheskogo centra Nacional'noj sistemy monitoringa okruzhayushchej sredy v Respublike Belarus'. – Minsk, 2023. – 94 s.
11. Presnye podzemnye vody Belarusi (resursy i kachestvo) / A. V. Kudel'skij, V. I. Pashkevich, M. G. YAsoveev [i dr.] // Litasfera. – 1994. – № 1. – S. 160–167.
12. Onoshko, M. P. Azot v okruzhayushchej srede Belarusi : avtoref. dis. … d-ra geol.-min. nauk : 04.00.02 / Mariya Petrovna Onoshko ; In-t geologicheskih nauk NAN Belarusi. – Minsk, 1998. – 30 s.
13. Azot v vodah Zapadnogo Poozer'ya / G. V. Novikov, M. P. Onoshko, N. A. Kapel'shchikov [i dr.] // Vestnik BGU. Ser. 2, Himiya. Biologiya. Geografiya. – 1998. – № 1. – S. 53–57.
14. Natural and Anthropogenic Nitrate Contamination of Groundwater in a Rural Community, California / A. E. Williams, L. J. Lund, J. A. Johnson, Z. J. Kabala // Environmental Science & Technology. – 1998. – Vol. 32, Iss. 1. – P. 32–39. – DOI: 10.1021/es970393a.
15. Wolter, R. Nitrate contamination of surface and groundwater in Germany – results of monitoring / R. Wolter // Water and Sustainable Development. – 2004. – Vol. 48. – P. 71–84.
16. Timescales and development of groundwater pollution by nitrate in drinking water wells of the Jahna-Aue, Saxonia, Germany / K. Osenbrück, S. Fiedler, K. Knöller [et al.] // Water Resources Research. – 2006. – Vol. 42, W12416. – P. 1–20. – DOI: 10.1029/2006WR004977.
17. Kachanovskaya, T. P. Issledovanie kachestva podzemnyh vod g. Har'kova / T. P. Kachanovskaya // Kommunal'noe hozyajstvo gorodov. – 2006. – № 74. – S. 218–222.
18. Nas, B. Groundwater contamination by nitrates in the city of Konya (Turkey): A GIS perspective / B. Nas, A. Berktay // Journal of Environmental Management. – 2006. – Vol. 79, Iss. 1. – P. 30–70. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.05.010.
19. Prudovskij, E. L. Problemy ploshchadnogo nitratnogo za-gryazneniya podzemnyh vod Lipeckoj oblasti / E. L. Prudovskij, S. M. Bojko // Razvedka i ohrana nedr. – 2007. – № 7. – S. 70–74.
20. Kalinin, M. YU. Stepen' himicheskogo zagryazneniya podzemnyh vod Baranovichskogo rajona / M. YU. Kalinin, M. A. Pisarik // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta Seriya: Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika, ekologiya. – 2001. – № 2. – S. 63–66.
21. Harton, M. O. Ocenka urovnej nitratnogo zagryazneniya kolodeznyh vod Baranovichskogo rajona / M. O. Harton, S. A. Horeva // Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike : materialy V mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. : v 2 t. / Belorusskij nac. tekhnich. un-t ; redkol.: B. M. Hrustalev, F. A. Romanyuk, A. S. Kalinichenko. – Minsk : BNTU, 2007. – T. 2. – S. 464–468.
22. Pashkevich, V. I. Usloviya formirovaniya nitratnogo zagryazneniya gruntovyh vod Belarusi / V. I. Pashkevich // Prirodo-pol'zovanie i ohrana okruzhayushchej sredy – 2000 : sb. st. ; redkol.: I. I. Lishtvan (gl. red.) [i dr.]. – Minsk : IPIPRE NAN Belarusi, 2000. – S. 30–31.
23. Ocenka urovnej nitratnogo zagryazneniya podzemnyh vod, ispol'zuemyh dlya centralizovannogo i necentralizovannogo vodosnabzheniya / V. I. Pashkevich, V. D. Korkin, N. P. Volkova [i dr.] // Prirodnye resursy. – 2003. – № 3. – S. 101–102.
24. Kudel'skij, A. V. Vodnye resursy Belarusi: sostoyanie, problemy i perspektivy ispol'zovaniya / A. V. Kudel'skij // Nauka i innovacii. – 2006. – № 10 (44). – S. 13–14.
25. Presnye podzemnye vody Belarusi: resursy i kachestvo / M. G. YAsoveev, N. V. YAstrebova, N. I. YAsoveeva, O. V. SHershnev // Vesci BDPU. Seryya 3. Fizika. Matematyka. Infarmatyka. Biyalogiya. Geagrafiya. – 2007. – № 2. – S. 67–71.
26. Sources of nitrate and ammonium contamination in groundwater under developing Asian megacities / Y. Umezawa, T. Hosono, S. Onodera [et al.] // Science of The Total Environment. – 2008. – Vol. 404, Iss. 2–3. – P. 361–376. – DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2008.04.021.
27. Kolesnikova, E. V. Proyavlenie nitratnogo zagryazneniya v gruntovyh i podzemnyh vodah / E. V. Kolesnikova, A. F. Simakin // Social'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki : materialy V Mezhdunar. konf. po problemam gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki, Tula, 28–30 okt. 2009 g. : v 2 t. / Tul'skij gos. un-t ; pod obshch. red. R. A. Kovaleva – Tula : TulGU, 2009. – T. 2. – S. 333–336.
28. Kudel'skij, A. V. Pit'evye vody Belarusi / A. V. Kudel'skij, V. I. Pashkevich, M. K. Kovalenko // Pitanie i obmen veshchestv : sb. nauch. st. / NAN Belarusi, In-t farmakologii i biohimii ; pod red. A. G. Mojseenka. – Minsk, 2008. – Vyp. 3. – S. 134–143.
29. Fedenya, V. M. Ekologicheskoe sostoyanie podzemnyh vod g. Bresta / V. M. Fedenya, S. I. Kuz'min, M. A. Pisarik // Problemy vodosnabzheniya, vodootvedeniya i energosberezheniya v zapadnom regione Respubliki Belarus' : sb. materialov mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf., posvyashch. 65-letiyu Pobedy v Veli-koj Otechestvennoj vojne, Brest, 22–23 apr. 2010 g. / Min-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Brestskij gos. tekhnich. un-t ; redkol.: S. V. Basov [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2010. – S. 336–339.
30. Drozdova, E. V. Nitratnoe zagryaznenie pit'evyh vod v Respublike Belarus': analiz sostoyaniya problemy i obosnovanie napravlenij dal'nejshih issledovanij / E. V. Drozdova, V. V. Buraya, V. A. Rudik // Zdorov'e i okruzhayushchaya sreda : sb. nauch. tr. / Resp. nauch.-prakt. centr gigieny ; redkol.: V. P. Filonov (gl. red.) [i dr.]. – Minsk, 2010. – Vyp. 15. – S. 56–62.
31. ZHoglo, V. G. Monitoring podzemnyh vod na vodozaborah i ekologicheski opasnyh ob"ektah yugo-vostoka Belarusi / V. G. ZHoglo, A. N. Galkin. – Vitebsk : VGU im. P. M. Masherova, 2008. – 161 s.
32. Novyh, L. L. Vliyanie polozheniya rodnikov v landshaftah na soderzhanie nitratov v ih vodah / L. L. Novyh, YU. V. YUdina, G. A. Orekhova // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. – 2012. – T. 18, № 3 (122). – S. 242–250.
33. Groundwater nitrate contamination and risk assessment in an agricultural area, South Korea / J. Y. Cheong, S. Y. Hamm, J. H. Lee [et al.] // Environmental Earth Sciences. – 2012. – Vol. 66. – P. 1127–1136. – DOI: 10.1007/s12665-011-1320-5.
34. Wick, K. Groundwater nitrate contamination: Factors and indicators / K. Wick, C. Heumesser, E. Schmid // Journal of Environmental Management. – 2012. – Vol. 111. – P. 178–186. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.06.030.
35. Dar, I. A. Nitrate contamination in groundwater of Sopore town and its environs, Kashmir, India / I. A. Dar, A. D. Mithas, K. Sankar // Arabian Journal of Geosciences. – 2010. – Vol. 3. – P. 267–272. – DOI: 10.1007/s12517-009-0067-8.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-174-183

36. YAsoveev, M. G. Ekologicheskie aspekty formirovaniya kachestva vod na gruppovyh vodozaborah Minskoj aglomeracii / M. G. YAsoveev, D. D. Talikadze, A. A. Kolosovskij // Vesci BDPU. Seryya 3. Fizika. Matematyka. Infarmatyka. Biyalogiya. Geagrafiya. – 2013. – № 1 (75). – S. 19–23.
37. Flerko, T. G. Landshaftno-ekologicheskie usloviya razmeshcheniya sel'skih poselenij Gomel'skoj oblasti i himicheskoe zagryaznenie vod kolodcev / T. G. Flerko, O. V. SHershnev // Prirodopol'zovanie. – 2012. – Vyp. 21. – S. 166–173.
38. Khandare, H. W. Scenario of Nitrate contamination in Groundwater: Its causes and Prevention / H. W. Khandare // Interna-tional Journal of ChemTech Research. – 2013. – Vol. 5, No. 4. – P. 1921–1926.
39. Hamed, Y. Nitrate contamination in groundwater in the Sidi Aïch–Gafsa oases region, Southern Tunisia / Y. Hamed, S. Awad, A. B. Saad // Environmental Earth Sciences. – 2013. – Vol. 70. – P. 2335–2348. – DOI: 10.1007/s12665-013-2445-5.
40. Kleckina, O. V. Azotnoe zagryaznenie podzemnyh vod i upravlenie ih kachestvom v promyshlennyh rajonah / O. V. Kleckina, I. I. Min'kevich // Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. – 2013. – № 4 (21). – S. 8–20.
41. Nitraty v kolodeznoj vode Vladivostoka / E. A. Averina, I. A. Andayakova, S. V. Zareckaya, YU. V. Kovaleva // Zdorov'e. Medicinskaya ekologiya. Nauka. – 2013. – № 2–3 (52). – S. 28–29.
42. SHkalikov, V. A. Himicheskij sostav osnovnyh istochnikov podzemnyh vod na territorii g. Smolenska / V. A. SHkalikov, I. V. Ankinovich // Aktual'nye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk. – 2013. – № 5. – S. 448–454.
43. Karimova, A. V. Soderzhanie nitrat-ionov v pit'evyh vodah Vostochno-Kazahskoj oblasti / A. V. Karimova // Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya. – 2013. – № 4 (41). – S. 402–405.
44. Svetlichnyj, A. A. Geoinformacionnaya baza dannyh ocenki potenciala nitratnogo zagryazneniya poverhnostnyh i gruntovyh vod / A. A. Svetlichnyj, S. V. Plotnickij // Visnik Odes'kij nacional'nij universitet. Seriya: Geografichni ta geologichni nauki. – 2014. – T. 19, vip. 2. – S. 58–69.
45. Orekhova, G. A. Dinamika soderzhaniya nitratov v vodah rodnikov urochishcha «Marshalkovo» / G. A. Orekhova, L. L. Novyh // Problemy prirodopol'zovaniya i ekologicheskaya situaciya v Evropejskoj Rossii i sopredel'nyh stranah : materialy VI Mezhdunar. nauch. konf., Belgorod, 12–16 okt. 2015 g. ; otv. red. P. V. Goleusov. – Belgorod : Politerra, 2015. – S. 277–280.
46. Galiulin, R. V. Zagryaznenie nitratami vodnyh ekosistem pri antropogennoj nagruzke / R. V. Galiulin, R. A. Galiulina, R. R. Horobryh // Voda: himiya i ekologiya. – 2015. – № 11 (89). – S. 3–6.
47. Nesterov, E. M. Ekologicheskie problemy pit'evogo vodosnabzheniya Bryanskogo Poles'ya / E. M. Nesterov, S. D. Magometa // Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya : kollektivnaya monografiya po materialam Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. LXVIII Gercenovskie chteniya, posvyashch. 70-letiyu sozdaniya YUNESKO, Sankt-Peterburg, 22–25 apr. 2015 g. ; otv. red. V. P. Solomin, V. A. Rumyancev, V. A. Subetto, N. V. Lovelius. – SPb. : Rossijskij gos. pedagogich. yn-t im. A. I. Gercena, 2015. – S. 321–326.
48. Voronyuk, G. YU. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' himicheskogo sostava podzemnyh vod na territorii Izhorskogo plato / G. YU. Voronyuk, V. M. Pitul'ko, V. V. Kulibaba // Regional'naya ekologiya. – 2015. – № 6 (41). – S. 67–79.
49. SHumigaj, I. V. Vliyanie nitratov podzemnyh vod na so-stoyanie zdorov'ya naseleniya / I. V. SHumigaj // Agroekologichnij zhurnal. – 2015. – № 4. – S. 53–58.
50. Nitratnoe zagryaznenie podzemnyh vod na territorii Respubliki Tatarstan / O. YU. Tarasov, I. I. SHakirova, F. M. Abdullina, R. CH. YUranec-Luzhaeva // Ekologiya i promyshlennaya bezopasnost'. – 2015. – № 1–2. – S. 33–35.
51. Driving mechanism and sources of groundwater nitrate contamination in the rapidly urbanized region of south China / Q. Zhang, J. Sun, J. Liu [et al.] // Journal of Contaminant Hydrology. – 2015. – Vol. 182. – P. 221–230. – DOI: 10.1016/j.jconhyd.2015.09.009.
52. Nitrates in springs and rivers of East Ukraine: Distribution, contamination and fluxes / V. Yakovlev, Y. Vystavna, D. Diadin, Y. Vergeles // Applied Geochemistry. – 2015. – Vol. 53. – P. 71–78. – DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.12.009.
53. Galickaya, I. V. Kachestvo presnyh podzemnyh vod Minskoj i Moskovskoj gorodskih aglomeracij: sovremennoe sostoyanie, tendencii izmeneniya, vozmozhnost' upravleniya / I. V. Galickaya, V. I. Pashkevich, G. I. Batrak // Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. – 2015. – № 4. – S. 340–351.
54. Geoekologicheskoe sostoyanie podzemnyh vod na vodozabore «Novinki» Minska i razrabotka meropriyatij po predotvrashcheniyu ih antropogennogo zagryazneniya / O. V. Vasneva, V. I. Pashkevich, A. N. Avhimovich [i dr.] // Litasfera. – 2016. – № 2 (45). – S. 122–128.
55. Vasneva, O. V. Ocenka vliyaniya istochnikov zagryazneniya na himicheskij sostav i kachestvo podzemnyh vod Minskoj gorodskoj aglomeracii : dis. … kand. geol.-min. nauk : 25.01.07 / Vasneva Ol'ga Vladimirovna ; RUP «NPC po geologii». – Minsk, 2014. – 333 l.
56. ZHitenev, B. N. Snizhenie massovoj koncentracii nitratov v vode shahtnyh kolodcev dlya vodosnabzheniya / B. N. ZHitenev, S. V. Andreyuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya. – 2016. – № 2 (98). – S. 62–65.
57. ZHitenev, B. N. Sovremennoe sostoyanie problemy zagryazneniya podzemnyh vod Belarusi soedineniyami azota i puti ee resheniya / B. N. ZHitenev, S. V. Andreyuk // Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. – 2016. – № 4 (100). – S. 52–57.
58. Baitova, S. N. Monitoring soderzhaniya nitratov v pod-zemnyh vodah / S. N. Baitova, N. E. ZHuravskaya // SWorldJournal. – 2022. – № 11 (01). – S. 62–67. – DOI: 10.30888/2663-5712.2022-11-01-087.
59. Nitrate pollution of groundwater; all right…, but nothing else? / A. Mencio, J. Mas-Pla, N. Otero [et al.] // Science of the Total Environment. – 2016. – Vol. 539. – P. 241–251. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.151.
60. Drebot, V. V. Ocenka summarnogo riska dlya zdorov'ya cheloveka v svyazi s rasprostraneniem nitratnogo zagryazneniya gruntovyh vod v rajone ozera Poyanhu (Kitaj) / V. V. Drebot, E. A. Soldatova // Ekologiya energetiki – 2017 : trudy Mezhdunar. nauch. konf. molodyh uchenyh i specialistov, Moskva, 23–24 noyab. 2017 g. – M. : MEI, 2017. – S. 36–38.
61. Ivanov, D. O. Azotsoderzhashchie komponenty v podzemnyh vodah / D. O. Ivanov // Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala. – 2017. – № 17. – S. 197–201.
62. Monitoring zagryaznennosti nitrat-ionami podzemnyh vod territorii gorodov Sevastopolya i Bahchisaraj / I. I. Kosinova, G. A. Sigora, L. A. Nichkova [i dr.] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – 2016. – № 3. – S. 123–127.
63. Izmenenie zagryaznennosti nitrat-ionami rodnikov goroda Sevastopolya / G. A. Sigora, T. V. Lyashko, L. A. Nichkova, T. YU. Homenko // Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy. – 2018. – № 14 (34). – S. 150–156. – DOI: 10.33075/2220-5861-2018-4-150-156.
64. Impact of agriculture and land use on nitrate contamination in groundwater and running waters in central-west Poland / A. E. Lawniczak, J. Zbierska, B. Nowak [et al.] // Environmental Monitoring and Assessment. – 2016. – Vol. 188, № 172. – P. 1–17. – DOI: 10.1007/s10661-016-5167-9.
65. Hydrogeology and groundwater quality in the Nordic and Baltic countries / N. O. Kitterød, J. Kvaerner, P. Aagaard [et al.] // Hydrology Research. – 2022. – Vol. 53, Iss. 7. – P. 958–982. – DOI: 10.2166/nh.2022.018.
66. Kosinova, I. I. Sistema ekologicheskogo menedzhmenta sostoyaniya neogen-chetvertichnogo i verhnedevonskogo vodonosnyh kompleksov territorii Lipeckoj oblasti / I. I. Kosinova, R. A. Lyapin // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – 2020. – № 2. – S. 83–89. – DOI: 10.17308/geology.2020.2/2862.
67. Ramalingam, S. Effect of high nitrate contamination of groundwater on human health and water quality index in semi-arid region, South India / S. Ramalingam, B. Panneerselvam, S. P. Kaliappan // Arabian Journal of Geosciences. – 2022. – Vol. 15, No. 242. – S. 1–14. – DOI: 10.1007/s12517-022-09553-x.
68. Pashkevich, V. Gidromineral'nye resursy / V. Pashkevich, O. Vasneva // Nauka i innovacii. – 2025. – № 3. – S. 11–15.

Материал поступил 06.12.2025, одобрен 20.01.2026, принят к публикации 26.01.2026

УДК 628.4

ОТХОДЫ КАК РЕСУРС: ВЛИЯНИЕ РОП НА ФОРМИРОВАНИЕ РЫНКА ВМР В БЕЛАРУСИ И РОССИИ (СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В КОНТЕКСТЕ ЭКОНОМИКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА)

Е. В. Куцобина

К. ф. н., доцент кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: elkutco@gmail.com

Реферат

В статье представлен сравнительный анализ становления рынков вторичных материальных ресурсов (ВМР) в Беларуси и России на фоне глобального тренда к экономике замкнутого цикла. Несмотря на общее советское наследие в сфере природопользования, в настоящее время каждая из стран формирует собственную нормативно-правовую базу и уникальные системы обращения с отходами, что порождает как схожие, так и различные вызовы. Особое внимание уделяется роли расширенной ответственности производителя (РОП) как основного инструмента, который рассматривается в качестве центрального драйвера, создающего экономические стимулы для извлечения ВМР и их возврата в хозяйственный оборот. На основе анализа официальной статистики (с учетом методологических различий в учете твердых коммунальных отходов (ТКО) в России и ВМР в Беларуси) рассматриваются достигнутые результаты и системные проблемы. Беларусь демонстрирует более стабильный рост переработки на душу населения, но сталкивается с проблемами низкой рентабельности переработки сложных фракций и износа мощностей. Россия, обладая колоссальными объемами отходов, лидирует по абсолютным инвестициям и масштабу федеральных реформ, но до сих пор направляет на захоронение колоссальный объем ТКО, испытывая сложности с логистикой, региональными диспропорциями и недоверием населения к системе раздельного сбора. Несмотря на разные траектории (плановое госуправление в Республике Беларусь и рыночно-проектный подход в Российской Федерации), обе страны ставят амбициозные цели по переработке отходов к 2030 г. Достижение этих показателей будет зависеть от успешной цифровизации, создания экономических стимулов для глубокой переработки и решения инфраструктурных проблем, причем опыт каждой из стран представляет ценность для взаимного учета в рамках евразийской интеграции.

Ключевые слова: обращение с отходами, вторичные материальные ресурсы (ВМР), расширенная ответственность производителя (РОП), твердые коммунальные отходы (ТКО), экономика замкнутого цикла, ответственное производство, ответственное потребление.

WASTE AS A RESOURCE: THE IMPACT OF ROP ON THE FORMATION OF THE SUBSTANCES AND RAW MATERIALS MARKET IN BELARUS AND RUSSIA (A COMPARATIVE ANALYSIS IN THE CONTEXT OF A CLOSED-LOOP ECONOMY)

E. V. Kutsobina

Abstract

The article presents a comparative analysis of the development of secondary material resource (SMR) markets in Belarus and Russia against the backdrop of the global trend toward a circular economy. Despite a shared Soviet legacy in environmental management, each country is currently developing its own regulatory framework and unique waste management systems, giving rise to both similar and distinct challenges. Particular attention is paid to the role of Extended Producer Responsibility (EPR) as a primary tool, viewed as a central driver creating economic incentives for the extraction of SMRs and their reintegration into the economic cycle. Based on the analysis of official statistics (taking into account methodological differences in accounting for municipal solid waste (MSW) in Russia and SMRs in Belarus), the study examines achieved results and systemic issues. Belarus demonstrates more stable growth in per capita recycling but faces challenges regarding low profitability in processing complex fractions and equipment obsolescence. Russia, possessing vast volumes of waste, leads in absolute investment and the scale of federal reforms, yet still disposes of a massive volume of MSW in landfills, facing difficulties with logistics, regional disparities, and public distrust in separate collection systems. Despite different trajectories (planned state management in Belarus versus a market-project approach in Russia), both countries have set ambitious waste recycling targets for 2030. Achieving these goals will depend on successful digitalization, the creation of economic incentives for deep processing, and the resolution of infrastructural issues, with each country's experience offering valuable insights for mutual consideration with in the framework of Eurasian integration.

Keywords: waste management, secondary material resources (SMR), extended producer responsibility (EPR), municipal solid waste (MSW), circular economy, responsible production, responsible consumption.

Введение

Переход от линейной экономической модели к экономике замкнутого цикла уже становится необходимым требованием современного устойчивого развития. В этом процессе отходы перестают рассматриваться как неизбежная проблема и финальная стадия жизненного цикла продукта, а становятся ценным источником вторичных материальных ресурсов (ВМР). И Республика Беларусь, и Российская Федерация, следуя Цели 12 Устойчивого Развития ООН (ЦУР 12) – «Обеспечение перехода к рациональным моделям потребления и производств» [1, 2, 3], демонстрируют различные подходы к ее реализации, которые будут рассмотрены ниже.

В основе трансформации системы управления отходами в обеих странах лежит концепция экономики замкнутого цикла. Эта концепция радикально противостоит линейной модели «производство – потребление – захоронение», предлагая стратегию минимизации отходов за счет их системного возврата в хозяйственный оборот. Двигателями такой трансформации выступают ответственное производство и ответственное потребление.

Ответственное производство как элемент этой системы предполагает переход на возобновляемые ресурсы и внедрение «зеленых» технологий переработки и использованию отходов, создание замкнутых производственных цепочек, где отходы одного процесса становятся сырьем для другого, организацию эффективного сбора и глубокой переработки вторичных материалов. Ответственное потребление же реализуется через сокращение образования отходов, а именно – сокращение количества упаковочных материалов,

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-184-189

культуру повторного использования, ремонта товаров, осознанного потребительского выбора в пользу товаров, произведенных из вторичных материальных ресурсов (ВМР) с применением экологически безопасных методов.

Таким образом, совершенствование системы обращения с вторичными материальными ресурсами – стратегический ресурс для повышения устойчивости экономики и снижения нагрузки на природные экосистемы и в Беларуси, и в России. Сбор и использование ВМР и в Республике Беларусь, и в Российской Федерации, представляют значительный потенциал для снижения нагрузки на природную среду и повышение устойчивости экономики.

Материалы и методы

В основу исследования положены официальные статистические данные и нормативно-правовые документы Российской Федерации и Республики Беларусь. Для сбора и анализа данных использовались некоторые методы анализа. Статистический анализ – проведена обработка и сравнительная оценка официальных данных, представленных Росприроднадзором Российской Федерации (за 2019–2024 гг.) и Белстатом Республики Беларусь (за 2014–2024 гг.). Сравнительно-правовой анализ – изучены ключевые законодательные акты, регулирующие обращение с отходами, внедрение и развитие механизма расширенной ответственности производителя (РОП) в обеих странах. Анализ других источников, таких как отчеты в рамках национальных проектов, стратегические документы определяющие цели и приоритеты государств в области устойчивого развития и обращения с отходами, а также данные из открытых источников и аналитических обзоров. Методология направлена на выявление общих тенденций, специфических проблем и сравнительной эффективности двух моделей управления отходами в контексте перехода к экономике замкнутого цикла.

Особенности статистического учета и анализ динамики образования отходов

К сожалению, полную и подробную статистику за 20 лет как в Беларуси, так и в России показать затруднительно, т. к. статистические данные 2005–2012 годов фрагментарны и часто агрегированы по использованию отходов в целом, а не по сбору ВМР. Но уже с 2013–2014 гг. ситуация начинает немного меняться, данные начинают публиковаться благодаря и реформам в странах, и созданием структур, которые занимаются обращением с отходами.

В Республике Беларусь в 2012 году был введен принцип расширенной ответственности производителя (РОП) и создано Государственное учреждение – «Оператор вторичных материальных ресурсов» [4]. В России расширенная ответственность производителей введена в 2015 г. [5], в 2019 году была создана публично-правовая компания «Российский экологический оператор» (ППК РЭО) [6]. Это стало ключевыми знаками, первыми попытками реформ, направленными на создание комплексной системы обращения с отходами. При сравнении опубликованных статических данных по отходам важно учитывать фокус рассмотрения, он у стран отличаются. В Российской Федерации – направлен на твердые коммунальные отходы (ТКО), в Республике Беларусь – на традиционные ВМР.

Официальная статистика в России не предоставляет единого показателя по общему проценту использования всех видов вторичных материальных ресурсов. В открытых источниках опубликованы только данные по отдельным сегментам отходов, а также показатели: сколько отходов обработано для повторного применения – рециклинга; сколько предварительно прошло обработку; сколько утилизировано, обезврежено; сколько ТКО передано региональным операторам для обработки, обезвреживания, утилизации, хранения, захоронения. В таблице 1 приведены данные Росприроднадзора по образованию отходов в России, начиная с 2019 года [7].

Пока сводных данных за 2025 год нет, а по итогам 2024 года зафиксировано 8,5 млрд тонн отходов. Снижение показали 47 российских регионов. Однако, скорее всего это снижение обусловлено применением новых норм в законодательстве в части отнесения к «отходам» и «не отходам». В добывающей промышленности это отнесение к «побочным продуктам производства вскрышных пород», а в агросекторе – к «побочным продуктам животноводства». С 1 марта 2023 года в России действует Федеральный закон [8], который регулирует обращение с побочными продуктами. Это нововведение напрямую повлияло на статистику: часть веществ, которые раньше считались «отходами», теперь классифицируются как «побочные продукты».

Что касается данных по обезвреживанию и захоронению твердых ТКО в России, наблюдается тенденция к росту. Общий объем коммунальных отходов за пять лет вырос, это отражено в таблице 2 [7].

И данные приведенной таблицы 2, и данные Федерального проекта «Комплексная система обращения с ТКО» в отчете Национального проекта «Экология» [9], констатируют, что процент ТКО направляемых и на обработку (2024 г. – 55,1 %), и на утилизацию (2024 г. – 14,3 %) растет опережая план, в т. ч. в сравнении с предыдущими годами. Но все же более 80 % ТКО в России идут на полигоны.

Статистика образования отходов в Республике Беларусь за последние 10 лет показывает общую тенденцию к росту объемов, особенно в части отходов производства, и стабилизацию объемов ТКО. Официальный статистический портал Белстата предоставляет агрегированные данные по отходам производства, которые составляют основную часть всего объема отходов [10]. Общее количество образовавшихся отходов в 2024 году в Республике Беларусь на 4 млн тонн больше, чем в 2023 году, что связано с ростом объемов промышленного производства.

В таблице 3 представлены официальные данные по образованию отходов производства (без учета крупнотоннажных, таких как галитовые отходы, которые могут сильно искажать общую динамику, составляя до 35 млн тонн в год).

Таблица 1 – Образование и использование отходов производства в Российской Федерации за 2019–2024 годы

Отчетный год	Образование отходов / тонн	Обработано отходов / тонн	Утилизировано отходов / тонн	Обезврежено отходов / тонн	Размещение отходов / захоронение / тонн
2019	7 750 877 313	237 193 681	3 857 286 601	24 584 930	1 178 876 088
2020	6 955 716 994	15 992 102	3 406 325 585	22 688 116	832 301 742
2021	8 448 642 555	23 462 277	3 920 105 041	17 134 377	981 458 359
2022	9 17 264 500	21 661 843	4 106 970 687	18 234 709	2 415 390 029
2023	9 278 837 848	18 721 479	3 946 841 388	14 074 792	1 623 297 882
2024	8 514 681 141	18 660 239	3 065 697 816	14 230 209	1 908 080

Таблица 2 – Образование и использование ТКО в Российской Федерации за 2020–2024 годы

Отчетный год	Образование ТКО за отчетный год / тонн	Направлено на обработку / тонн	Направлено на обезвреживание / тонн	Направлено на утилизацию / тонн	Направлено на захоронение / тонн
2020	48 462 031	18 702 204	1 491 594	1 761 912	36 097 368
2021	48 362 836	22 496 161	2 594 248	3 124 728	44 481 735
2022	45 867 422	22 404 868	1 139 507	3 012 346	36 807 501
2023	47 087 064	23 558 960	1 272 314	3 268 153	38 084 611
2024	47 504 164	25 309 366	1 120 527	3 889 067*	40 496 728

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-184-189

Таблица 3 – Образование отходов производства и ТКО в Республике Беларусь за 2014–2024 годы

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Образовано отходов производства, тонн/год	52 529 300	49 865 300	49 448 200	55 506 000	60 723 400	60 836 800	61 183 400	62 250 000	39 160 500	50 404 000	55 348 100
Образовано твердых коммунальных отходов, тонн/год	3 722 800	3 734 600	3 794 000	3 801 400	3 795 300	3 784 800	4 070 400	3 970 200	3 994 300	3 982 600	4 263 000

Объем образования твердых коммунальных отходов (ТКО) в Республике Беларусь за последние 10 лет демонстрирует относительную стабильность при небольшом росте интенсивности образования на душу населения. Он колеблется в пределах 3,7–4,3 млн тонн в год [10]. При этом, на протяжении 2012–2025 гг. наблюдается устойчивая положительная динамика сбора (таблица 4) и использования вторичных материальных ресурсов [11]. Эти показатели выросли благодаря целенаправленной политике, созданию необходимой инфраструктуры и стимулированию населения к раздельному сбору.

Таблица 4 – Динамика объемов сбора ВМР за 2012–2024 годы

	2012	2014	2016	2018	2020	2022	2024
Процент использования коммунальных отходов	10 %	14,5 %	15,8 0%	18,8 %	25 %	33,9 %	39,6 %
Объемы сбора ВМР тонн/год	381 600	551 800	599 500	714 800	789 900	802 600	840 200

С 2012 года общий объем сбора ВМР в Республике Беларусь увеличился более чем в два раза. Положительная динамика наблюдалась во всех регионах страны. Пока нет отчета ГУ «Оператор вторичных материальных ресурсов» за 2025 год, но только з**а первое полугодие 2025 года** собрано на 13,4 % больше по сравнению с аналогичным периодом 2024 года [12, 13]. При этом уровень использования ТКО с 2012 вырос почти в четыре раза и составил 39,6 %. Цель на 2025 год – 64 %, а на 2040-й – 90 % [14]. В целом динамика показывает последовательный рост как в объемах сбора, так и в уровне использования ВМР, что свидетельствует об успешном развитии системы обращения с отходами в Республике Беларусь.

Роль и проблемы механизма расширенной ответственности производителя (РОП)

В обеих странах сбор ВМР вырос не только за счет развития инфраструктуры. Ключевым механизмом стало развитие системы расширенной ответственности производителей (РОП).

Внедрение системы РОП в Республике Беларусь началась в 2012 году [4], а в 2020 году вышел Указ Президента «**О совершенствовании порядка обращения с отходами товаров и упаковки»** [15], что привело к **значительному увеличению объемов сбора и использования вторичных материальных ресурсов** и стало ключевым фактором роста уровня переработки отходов в стране. Уровень использования ТКО вырос более чем в 3 раза за период действия системы РОП, что позволило Беларуси стать лидером по этому показателю среди стран ЕАЭС и СНГ [16]. Также новая редакция закона «Об обращении с отходами» [17], вступившая в силу в 2024 году запрещает в стране захоронение вторичных материальных ресурсов.

Однако, несмотря на статус лидера в СНГ, внедрение и развитие системы РОП в Беларуси сопровождается рядом системных сложностей, как экономического, так организационно-технологического характера. Себестоимость сбора и сортировки некоторых видов отходов – сложного пластика, композитной упаковки (типа Tetra Pak), электронного оборудования превышает стоимость извлечённого сырья. Низкая рентабельность приводит к тому, что компании не готовы инвестировать в это направление, соответственно требуются постоянные дотации из средств, аккумулируемых ГУ «Оператор вторичных материальных ресурсов». Также цены на первичное сырье (нефть, целлюлозу) делают вторичные ресурсы менее конкурентоспособными, а это снижает интерес бизнеса к переработке.

Еще одна проблема характерная для Беларуси – сложность извлечения ВМР из общего потока ТКО. Извлечь чистое сырье из смешанных отходов на сортировочных линиях технически сложно. Из-за **недостаточного качества сортировки отходов населением** значительная часть полезных компонентов попадает в общий контейнер**. Часто попавшие на конвейер материалы загрязнены, что** снижает его стоимость и пригодность для переработки.

Актуальной проблемой для Республики Беларусь остается захоронение промышленных отходов. Большая часть отходов (особенно от крупных промышленных предприятий) захоранивается на полигонах, что приводит к потере ресурсов и загрязнению окружающей среды. Только за 2024 год уровень переработки промышленных отходов (а это 93 % от общего объема) составил 10 %, коммунальных же отходов переработано почти 40 %. Причин несколько – это и недостаток современных технологий, и довольно слабая инфраструктура**.**

Важный момент, на который стоит обратить внимание – в стране наблюдается износ мощностей и недостаток современных технологий по глубокой переработке собранного сырья. **В Беларуси всего** 9 заводов и 82 сортировочные линии, они покрывают только 1 млн тонн в год. Несмотря на строительство новых заводов, часть региональных мусоросортировочных станций требует модернизации, что необходимо для перехода на производство RDF-топлива.

Большинство этих проблем обозначены, сформулированы, и планируется их решение в рамках «Стратегии по обращению с отходами до 2040 года», принятой в августе 2025 года, где основной упор сделан на модернизацию и автоматизацию учета и создание крупных региональных экотехнопарков.

Следует все же отметить, что система РОП в Беларуси способствовала привлечению инвестиций, которые были направлены на модернизацию предприятий по переработке, реконструкцию мусоросортировочных заводов, финансирование строительства новых производств. Открылся целый ряд новых предприятий, которые перерабатывают собранное сырье. Уже работают предприятия по переработки упаковки Tetra Pak и RDF-топлива. Система РОП заложила основу для планов по увеличению уровня использования ТКО и объема сбора вторичных материальных ресурсов к концу 2025 года до 64 % и к 2040 году – 90 %.

В России расширенная ответственность производителей введена в 2015 г. и была направлена на стимулирование переработки отходов [5], однако ее результаты оказались довольно скромными. Система в период 2015–2023 годов не привела к позитивным изменениям, столкнулась с рядом трудностей и не дала значимых

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-184-189

результатов. Фактически **полноценная реформа РОП началась только в 2024 году.** По состоянию на 2024 год, в России перерабатывается всего 14 % от общей массы ТКО. И вклад системы РОП в эти показатели был минимальным.

Проблемы внедрения системы РОП в России отличаются от проблем Беларуси. До 2024 года значительная часть производителей и импортеров в Российской Федерации предпочитала заключать фиктивные договоры с недобросовестными компаниями о переработке (т. н. "бумажная" утилизация), фактически не перерабатывая отходы [18–23]. Это привело к тому, что государство не получало ни денег (экосбора), ни реальной переработки. Т. е. реальные объемы переработки оставались низкими, а собранные средства не покрывали развитие отрасли.

Вторая системная проблема – ответственность по утилизации ранее лежала на производителях товаров. А в России – это сотни тысяч юридических лиц, контроль такого количества производителей осуществить невозможно. И в 2024 году были предприняты законодательные меры – с января 2024 года вступил в силу Закон Российской Федерации **№ 451-ФЗ** [24]**,** который радикально изменил систему РОП и позволил упросить контроль. Главное изменение – перенос ответственности за утилизацию упаковки с производителей товаров на **производителей самой упаковки.** Т. е. теперь производители упаковок (юридические лица, производящие упаковку – коробки, бутылки и пр.), которых в десятки раз меньше, должны либо заниматься утилизацией сами/заключать договор с утилизатором, либо уплачивать экосбор. Также, в соответствии с этим законом, вступило с силу требование о ведении реестра юридических лиц/ИП, осуществляющих утилизацию отходов от использования товаров.

Реестр утилизаторов сейчас является центральным элементом системы реформы системы РОП в России. Без включения в этот реестр предприятие не имеет права выдавать акты об утилизации, которые освобождают производителей товаров и упаковки от уплаты экологического сбора. Чтобы попасть в реестр, утилизатор проходит выездную проверку Росприроднадзора. Инспекторы подтверждают, что у компании действительно есть оборудование, электроэнергия и персонал для переработки заявленного объема отходов. **При этом введена система автоматического контроля –** ЕГИС УЗТ, она автоматически сопоставляет объем закупленного вторсырья и объем выпущенной продукции из вторсырья. Если утилизатор пытается выдать актов больше, чем позволяют его мощности, система блокирует такую операцию. На начало 2026 года в российский Реестр утилизаторов включено **196 компаний** [25]**.** Основной упор сделан на переработчиков полимеров, макулатуры, шин и электроники.

Следует выделить еще одну проблему, характерную для именно для России – логистическую. В отличие от компактной Беларуси, в России сбор ВМР в удаленных регионах экономически невыгоден. Стоимость перевозки, например, из Якутии или Сибири на перерабатывающий завод в ЦФО превышает стоимость самого сырья. РОП до сих пор не полностью покрывает эти логистические разрывы. Именно поэтому строительство новых сортировочных и перерабатывающих комплексов в каждом регионе – это важная и актуальная задача.

Однако одной из ключевых проблем в России является недоверие населения к сортировке. Из-за скандалов прошлых лет, когда отсортированный мусор сваливали в одну машину, у людей сохранился высокий уровень скепсиса, и сортировка населением отходов во многих регионах некачественная [19, 26]**.** При этом важно отметить, что во многих в областных центрах субъектов Российской Федерации, не говоря о районных городах и сельских населенных пунктах, до сих пор не организована система сортировки ТКО для населения [27]**.** Это приводит к тому, что на заводы переработки поступает «грязное» сырье, которое требует дорогостоящей мойки и досортировки.

Подводя итог, можно заключить, что система РОП в России в период 2015–2023 годов не привела к значительным позитивным изменениям. Только с 2024 года началось ее радикальное реформирование, направленное на достижение конкретных и довольно амбициозных целей.

Заключение

Сравнивая системы и результаты внедрения РОП в Российской Федерации и Республике Беларусь, можно констатировать следующее: Беларусь ввела РОП в 2012 году и создала централизованного госоператора, который аккумулирует средства от субъектов и затем направляет на модернизацию или строительство объектов. Россия же выбрала децентрализованную модель, где бизнес может либо сам утилизировать отходы, либо нанимать подрядчиков-утилизаторов, либо платить экосбор государству. Беларусь сделала ставку на **государственную монополию и выработала четкий план,** Россия прошла через **длительный период «серого рынка»,** который удалось начать зачищать только с переходом к новой модели РОП в 2024–2025 годах.

Если сравнивать объемы и темпы использования отходов, то за 2015–2025 гг. наблюдается рост переработки в обеих странах, но темпы в Беларуси выше относительно масштаба (Россия генерирует в 10–15 раз больше отходов из-за промышленности). В обеих странах довольно высокий процент захоронения ТКО – в Российской Федерации – 82,5 %; в Республике Беларусь – 60 %, и в обеих странах стоит задача по снижению этого показателя. Россия демонстрирует более агрессивный подход с федеральными реформами и инвестициями, но сталкивается с региональными диспропорциями. Беларусь акцентирует превентивные меры и "ноль отходов", с меньшим масштабом, но лучшей координацией на местном уровне. Россия фокусируется на крупных реформах и национальных проектах, а Беларусь – на постепенном внедрении через "зеленую" экономику и локальные инициативы. В целом, Беларусь показывает более стабильный рост переработки на душу населения, но Россия лидирует по масштабу и инвестициям. К 2030 г. обе страны могут достичь 50–60 % переработки при усилении РОП, цифровизации системы обращения с отходами.

Список цитированных источников

1. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года : одобр. резолюцией 70/1 Генер. Ассамблеи от 25 сентября 2015 г. // Организация Объединенных Наций. – URL: https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/2030_Agenda_ru.pdf (дата обращения: 05.02.2026).
2. Национальный координатор по достижению Целей устойчивого развития : [сайт]. – Минск, 1998–2025. – URL: https://sdgs.by (дата обращения: 05.02.2026).
3. Добровольный национальный обзор хода осуществления Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года : [сайт] // Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – URL: https://ac.gov.ru (дата обращения: 05.02.2026).
4. О некоторых вопросах обращения с отходами потребления : Указ Президента Респ. Беларусь от 11 июля 20212 № 313 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P31200313 (дата обращения: 05.02.2026).
5. О внесении изменений в Федеральный закон "Об отходах производства и потребления", отдельные законодательные акты Российской Федерации и признании утратившими силу отдельных законодательных актов (положений законодательных актов) Российской Федерации : Федер. закон от 29 декабря 2014 N 458-ФЗ // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 05.02.2026).
6. О создании публично-правовой компании по формированию комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами Российский экологический оператор : Указ Президента Российской Федерации от 14 янв. 2019 N // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 05.02.2026).
7. Федеральная служба по надзору в сфере природопользования : [сайт]. – URL: https://rpn.gov.ru (дата обращения: 05.02.2026).
8. О побочных продуктах животноводства и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федер. закон от 14 июля 2022 N 248-ФЗ // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 05.02.2026).

9. Национальный проект «Экология» 2019-2024 [сайт]. // Министерство природ. ресурсов и экологии РФ – URL: https://www.mnr.gov.ru/activity/np_ecology (дата обращения: 05.02.2026).
10. Национальный статистический комитет Республики Беларусь : [сайт]. – Мн., 1998–2025. – URL: http://belstat.gov.by (дата обращения: 05.02.2026).
11. ГУ Оператор вторичных материальных ресурсов : [сайт]. – URL: https://clck.ru/3S659T (дата обращения: 05.02.2026).
12. За первое полугодие 2025 года в Беларуси было собрано (заготовлено) 468,98 тыс. тонн вторичных материальных ресурсов // Нормативно-правовая система Нормативка.by. – URL: https://normativka.by (дата обращения: 05.02.2026).
13. Более 50 кг вторресурсов в среднем отправлял каждый белорус на переработку в I полугодии // БЕЛТА. – URL: https://belta.by (дата обращения: 05.02.2026).
14. О Стратегии по обращению с отходами производства и потребления в Республике Беларусь : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 18 авг. 2025 г. № 444 // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500444 (дата обращения: 05.02.2026).
15. О совершенствовании порядка обращения с отходами товаров и упаковки : Указ Президента Респ. Беларусь от 17 января 2020 №16 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32000016 (дата обращения: 05.02.2026).
16. Беларусь лидирует среди стран ЕАЭС по росту уровня переработки ТКО // БЕЛТА. – URL: https://belta.by (дата обращения: 05.02.2026).
17. Об изменении Закона Республики Беларусь «Об обращении с отходами» : Закон Респ. Беларусь от 29 декабря 2023 № 333-З // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H12300333 (дата обращения: 05.02.2026).
18. Утилизация «на бумаге»: Росприроднадзор фиксирует несоответствия // Научно-практический журнал «Твердые бытовые отходы». – URL: https://news.solidwaste.ru/2025/08/utilizatsiya-na-bumage-rosprirodnadzor-fiksiruet-nesootvetstviya (дата обращения: 29.08.2025).
19. Экологическая ситуация и проблема мусора / «ФОМнибус» – еженедельный всероссийский поквартирный опрос. 4–6 июня 2021 г. 53 субъекта РФ, 104 населенных пункта, 1500 респондентов. Статпогрешность не превышает 3,6 % // Фонд Общественное Мнение (проект ФОМ-ОМ). – URL: https://fom.ru (дата обращения: 05.02.2026).
20. Переработка «на бумаге»: Росприроднадзор фиксирует несоответствия актов утилизации // Росприроднадзор. – URL: https://rpn.gov.ru/press/news/pererabotka_na_bumage_rosprirodnadzor_fiksiruet_nesootvetstviya_aktov_utilizatsii (дата обращения: 05.02.2026).
21. Парфенкова, М. Закон о РОП улучшит ситуацию с утилизацией отходов в России / М. Парфенкова // Ведомости. – URL: https://www.vedomosti.ru/esg/regulation/articles/2023/07/25/986895-eksperti-zakon-o-rop-uluchshit-situatsiyu-s-utilizatsiei-othodov-v-rossii (дата обращения: 12.09.2024).
22. Чугунов, А. Росутильнадзор. Утилизаторов впишут в реестр благонадежных по усмотрению регулятора / А. Чугунов // Коммерсант. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/6162614 (дата обращения: 18.08.2023).
23. Астахов, Д. РОП-компания / Д. Астахов // Коммерсант. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/7737618 (дата обращения: 22.05.2025).
24. О внесении изменений в Федеральный закон "Об отходах производства и потребления" и отдельные законодательные акты Российской Федерации" : Федер. закон от 04 августа 2023 N 451-ФЗ // КонсультантПлюс. Россия справ. правовая система (дата обращения: 05.02.2026).
25. Реестр утилизаторов // Публичный портал ЕФГИС УОИТ. – URL: https://reestr-uoit.mnr.gov.ru/public/lists/equipment_analytics (дата обращения: 05.02.2026).
26. Осознанное потребление в российских условиях // Фонд «Институт экономики города». – URL: https://www.urbaneconomics.ru/centr-obshchestvennyh-svyazey/news/osoznannoe-potreblenie-v-rossiyskih-usloviyah-i-v-gencler-o (дата обращения: 05.02.2026).
27. Димин, В. Квартирный эковопрос: осознанное потребление в российских условиях / В. Димин // РБК. – URL: https://trends.rbc.ru/trends/green/cmrm/68061af79a79475395709fbb (дата обращения: 05.02.2026).
28. Об отходах производства и потребления : Федер. закон от 24 июня 1998 N 89-ФЗ : в ред. от 28 дек. 2025 N 495-ФЗ : с изм., внесенными постановлениями Конституционного Суда РФ от 19 июля 2019 N 30-П, от 30 мая 2023 N 27-П // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система (дата обращения: 05.02.2026).
29. Об обращении с отходами : Закон Респ. Беларусь 20 июля 2007 г. № 271-З: в ред. от 29 дек. 2023 № 333-З: с изм. и доп. от 30 дек. 2025 г. №126-З // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=h10700271 (дата обращения: 05.02.2026).

References

1. Preobrazovanie nashego mira: Povestka dnya v oblasti ustojchivogo razvitiya na period do 2030 goda : odobr. rezolyuciej 70/1 Gener. Assamblei ot 25 sentyabrya 2015 g. // Organizaciya Ob"edinennyh Nacij. – URL: https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/2030_Agenda_ru.pdf (data obrashcheniya: 05.02.2026).
2. Nacional'nyj koordinator po dostizheniyu Celej ustojchivogo razvitiya : [sajt]. – Minsk, 1998–2025. – URL: https://sdgs.by (data obrashcheniya: 05.02.2026).
3. Dobrovol'nyj nacional'nyj obzor hoda osushchestvleniya Povestki dnya v oblasti ustojchivogo razvitiya na period do 2030 goda : [sajt] // Analiticheskij centr pri Pravitel'stve Rossijskoj Federacii. – URL: https://ac.gov.ru (data obrashcheniya: 05.02.2026).
4. O nekotoryh voprosah obrashcheniya s othodami potrebleniya : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 11 iyulya 20212 № 313 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P31200313 (data obrashcheniya: 05.02.2026).
5. O vnesenii izmenenij v Federal'nyj zakon "Ob othodah proizvodstva i potrebleniya", otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii i priznanii utrativshimi silu otdel'nyh zakonodatel'nyh aktov (polozhenij zakonodatel'nyh aktov) Rossijskoj Federacii : Feder. zakon ot 29 dekabrya 2014 N 458-FZ // Konsul'tantPlyus. Rossiya : sprav. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 05.02.2026).
6. O sozdanii publichno-pravovoj kompanii po formirovaniyu kompleksnoj sistemy obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi othodami Rossijskij ekologicheskij operator : Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 14 yanv. 2019 N // Konsul'tantPlyus. Rossiya : sprav. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 05.02.2026).
7. Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere prirodopol'zovaniya : [sajt]. – URL: https://rpn.gov.ru (data obrashcheniya: 05.02.2026).
8. O pobochnyh produktah zhivotnovodstva i o vnesenii iz-menenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii : Feder. zakon ot 14 iyulya 2022 N 248-FZ // Konsul'tantPlyus. Rossiya : sprav. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 05.02.2026).
9. Nacional'nyj proekt «Ekologiya» 2019-2024 [sajt]. // Ministerstvo prirod. resursov i ekologii RF – URL: https://www.mnr.gov.ru/activity/np_ecology (data obrashcheniya: 05.02.2026).
10. Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus' : [sajt]. – Mn., 1998–2025. – URL: http://belstat.gov.by (data obrashcheniya: 05.02.2026).
11. GU Operator vtorichnyh material'nyh resursov : [sajt]. – URL: https://clck.ru/3S659T (data obrashcheniya: 05.02.2026).
12. Za pervoe polugodie 2025 goda v Belarusi bylo sobrano (zagotovleno) 468,98 tys. tonn vtorichnyh material'nyh resursov // Normativno-pravovaya sistema Normativka.by. – URL: https://normativka.by (data obrashcheniya: 05.02.2026).
13. Bolee 50 kg vtorresursov v srednem otpravlyal kazhdyj belorus na pererabotku v I polugodii // BELTA. – URL: https://belta.by (data obrashcheniya: 05.02.2026).

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-184-189

14. O Strategii po obrashcheniyu s othodami proizvodstva i potrebleniya v Respublike Belarus' : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus' ot 18 avg. 2025 g. № 444 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Resp. Belarus'. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500444 (data obrashcheniya: 05.02.2026).
15. O sovershenstvovanii poryadka obrashcheniya s othodami tovarov i upakovki : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 17 yanvarya 2020 №16 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32000016 (data obrashcheniya: 05.02.2026).
16. Belarus' lidiruet sredi stran EAES po rostu urovnya pererabotki TKO // BELTA. – URL: https://belta.by (data obrashcheniya: 05.02.2026).
17. Ob izmenenii Zakona Respubliki Belarus' «Ob obrashchenii s othodami» : Zakon Resp. Belarus' ot 29 dekabrya 2023 № 333-Z // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H12300333 (data obrashcheniya: 05.02.2026).
18. Utilizaciya «na bumage»: Rosprirodnadzor fiksiruet nesootvetstviya // Nauchno-prakticheskij zhurnal «Tverdye bytovye othody». – URL: https://news.solidwaste.ru/2025/08/utilizatsiya-na-bumage-rosprirodnadzor-fiksiruet-nesootvetstviya (data obrashcheniya: 29.08.2025).
19. Ekologicheskaya situaciya i problema musora / «FOMnibus» – ezhenedel'nyj vserossijskij pokvartirnyj opros. 4–6 iyunya 2021 g. 53 sub"ekta RF, 104 naselennyh punkta, 1500 respondentov. Statpogreshnost' ne prevyshaet 3,6 % // Fond Obshchestvennoe Mnenie (proekt FOM-OM). – URL: https://fom.ru (data obrashcheniya: 05.02.2026).
20. Pererabotka «na bumage»: Rosprirodnadzor fiksiruet nesootvetstviya aktov utilizacii // Rosprirodnadzor. – URL: https://rpn.gov.ru/press/news/pererabotka_na_bumage_rosprirodnadzor_fiksiruet_nesootvetstviya_aktov_utilizatsii (data obrashcheniya: 05.02.2026).
21. Parfenkova, M. Zakon o ROP uluchshit situaciyu s utili-zaciej othodov v Rossii / M. Parfenkova // Vedomosti. – URL: https://www.vedomosti.ru/esg/regulation/articles/2023/07/25/986895-eksperti-zakon-o-rop-uluchshit-situatsiyu-s-utilizatsiei-othodov-v-rossii (data obrashcheniya: 12.09.2024).
22. CHugunov, A. Rosutil'nadzor. Utilizatorov vpishut v reestr blagonadezhnyh po usmotreniyu regulyatora / A. CHugunov // Kommersant. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/6162614 (data obrashcheniya: 18.08.2023).
23. Astahov, D. ROP-kompaniya / D. Astahov // Kommersant. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/7737618 (data obrashcheniya: 22.05.2025).
24. O vnesenii izmenenij v Federal'nyj zakon "Ob othodah proizvodstva i potrebleniya" i otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii" : Feder. zakon ot 04 avgusta 2023 N 451-FZ // Konsul'tantPlyus. Rossiya sprav. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 05.02.2026).
25. Reestr utilizatorov // Publichnyj portal EFGIS UOIT. – URL: https://reestr-uoit.mnr.gov.ru/public/lists/equipment_analytics (data obra-shcheniya: 05.02.2026).
26. Osoznannoe potreblenie v rossijskih usloviyah // Fond «Institut ekonomiki goroda». – URL: https://www.urbaneconomics.ru/centr-obshchestvennyh-svyazey/news/osoznannoe-potreblenie-v-rossiyskih-usloviyah-i-v-gencler-o (data obrashcheniya: 05.02.2026).
27. Dimin, V. Kvartirnyj ekovopros: osoznannoe potreblenie v rossijskih usloviyah / V. Dimin // RBK. – URL: https://trends.rbc.ru/trends/green/cmrm/68061af79a79475395709fbb (data obrashcheniya: 05.02.2026).
28. Ob othodah proizvodstva i potrebleniya : Feder. zakon ot 24 iyunya 1998 N 89-FZ : v red. ot 28 dek. 2025 N 495-FZ : s izm., vnesennymi postanovleniyami Konstitucionnogo Suda RF ot 19 iyulya 2019 N 30-P, ot 30 maya 2023 N 27-P // Konsul'tantPlyus. Rossiya : sprav. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 05.02.2026).
29. Ob obrashchenii s othodami : Zakon Resp. Belarus' 20 iyulya 2007 g. № 271-Z: v red. ot 29 dek. 2023 № 333-Z: s izm. i dop. ot 30 dek. 2025 g. №126-Z // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=h10700271 (data obrashcheniya: 05.02.2026).

Материал поступил 11.02.2026, одобрен 16.02.2026, принят к публикации 17.02.2026

УДК 556.166:551.577.38:551.578.3

РЕЗКИЕ ПЕРЕХОДЫ В СИСТЕМЕ «ВЕСЕННЕЕ ПОЛОВОДЬЕ – ЗАСУХА – ДОЖДЕВОЙ ПАВОДОК»

О. П. Мешик[1], А. А. Волчек[2], С. И. Парфомук[3], С. В. Сидак[4], М. В. Борушко[5], А. С. Протасевич[6], Ю. П. Коляда[7]

[1] К. т. н., доцент, декан факультета инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: omeshik@mail.ru

[2] Д. г. н., профессор, профессор кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

[3] К. т. н., доцент, заведующий кафедрой математики и информатики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: parfom@mail.ru

[4] К. г. н., старший преподаватель кафедры математики и информатики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: harchik-sveta@mail.ru

[5] Магистр, старший преподаватель кафедры лингвистических дисциплин и межкультурных коммуникаций, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail borushko.marina@mail.ru

[6] Магистр, заместитель декана по идеологической и воспитательной работе факультета инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: protasevichnastua@gmail.com

[7] Магистр, старший преподаватель кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: juliagirodniuk99@gmail.com

Реферат

В статье рассматривается гипотеза о том, что в Белорусском Полесье все чаще возникают резкие переходы в системе «весеннее половодье → засуха → дождевой паводок». Эти переходы объясняются сочетанием трех причин. Во-первых, весна становится теплее и приходит раньше, половодье начинается и заканчивается раньше обычного, а затем быстро растёт испаряемость (PET), и почва резко теряет влагу. Во-вторых, для Полесья важным антропогенным фактором является осушительная мелиорация, которая обеспечивает быстрый отвод воды после половодья, влагозапасы к началу лета существенно снижаются. В-третьих, в теплый период возможны сильные ливни, которые на фоне сухой почвы и развитой гидрографической сети быстрее превращаются в поверхностный сток и создают риск дождевых паводков. Гипотеза проверена по данным р. Припять (створ Мозырь) и метеостанции Василевичи. Засушливость оценивалась суточным индексом SPEI30 (30-дневный водный баланс P–PET), а сильные ливни выделялись по порогам P95 = 12,1 мм/сут и P99 = 25,0 мм/сут (апрель – октябрь). Показано, что в 1991 году произошла статистически значимая перестройка режима: половодье стало начинаться раньше (тренд примерно − 4,7 дней за 10 лет; p = 0,0007). После окончания половодья засуха нередко наступает в течение 1–2 месяцев (fast60 ≈ 0,74), а экстремальные осадки после засушливых периодов в период современного потепления выпадают чаще и интенсивнее. Полученные результаты важны для раннего предупреждения рисков наводнений и засух для управления водным режимом мелиорированных земель территории Белорусского Полесья.

Ключевые слова: Белорусское Полесье, наводнение, весеннее половодье, засуха, дождевой паводок, резкие переходы, потенциальная испаряемость, водный баланс, экстремальные осадки, лаг перехода, режимный перелом.

ABRUPT TRANSITIONS IN THE SYSTEM “SPRING FLOOD – DROUGHT – RAIN-INDUCED FLOOD”

O. P. Meshik, A. A. Volchak, S. I. Parfomuk, S. V. Sidak, M. V. Borushko, A. S. Protasevich, Ju. P. Koljada

Abstract

This study considers the hypothesis that rapid regime shifts in the sequence "spring flood → drought → rain-inducedl flood" system are occurring more frequently in the Belarusian Polesie. These transitions are explained by three interacting factors. First, spring is becoming warmer and arriving earlier advancing earlier onset and conclusion of spring floods followed by a rapid rise in potential evapotranspiration (PET) causing the soil to lose moisture sharply. Second, an important anthropogenic factor in Polesie is drainage reclamation which accelerates post-flood water runoff severely reducing moisture reserves by early summer. Third, during the warm season, intense rainfall events are possible which, exacerbated by dry soils and an extensive drainage network, more quickly generate surface runoff creating the risk of flash floods. The hypothesis was validated using data from the Pripyat River (Mozyr gauge) and the Vasilevichi meteorological station. Drought conditions were assessed using the daily SPEI30 index (30-day water balance P–PET) and heavy rainfall was identified using thresholds of P95 = 12,1 mm/day and P99 = 25,0 mm/day (April–October). The assessment shows that a statistically significant regime shift occurred in 1991 with spring floods now beginning earlier (the trend of approximately − 4,7 days per decade; p = 0,0007). After the end of the spring flood, drought often sets in within 1–2 months (fast60 ≈ 0,74) and extreme rainfall events after drought periods during the current warming are becoming more frequent and intense.

These findings are critical for the early warning of flood and drought risks for adaptive water management of reclaimed lands in the Belarusian Polesie.

Keywords: Belarusian Polesie, flood, spring flood, drought, rainfall flood, abrupt transitions, potential evapotranspiration, water balance, extreme precipitation, transition lag, regime shift.

Введение

Наметившееся с конца XX века глобальное потепление оказывает большое влияние на гидрологический цикл и, как результат, на динамику речного стока. Изменение водного режима рек оказывает непосредственное воздействие на функционирование водных экосистем через изменение величин, продолжительности, времени прохождения, частоты и скорости изменения расходов воды в реке. В условиях устойчиво меняющегося климата и постоянно меняющейся антропогенной нагрузки на водные ресурсы, актуальная гидрологическая информация по продолжительности половодья, максимальным расходам воды, продолжительности и интенсивности перехода от половодий/паводков к засухам, и наоборот, выступает

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-190-206

в качестве важного экономического фактора, который помогает субъектам хозяйствования выбрать правильную стратегию развития, своевременно принять защитные меры для предотвращения ущерба от неблагоприятных и опасных гидрометеорологических явлений.

В последние годы в научной и прикладной повестке управления водными рисками все чаще обсуждается не только рост частоты отдельных экстремумов (наводнений либо засух), но и учащение их последовательных сочетаний – резких переходов от очень влажных фаз (половодий, дождевых паводков) к дефициту влаги (почвенной и гидрологической засухе) и обратно. В международной литературе такие «хлыстовые» смены режимов описывают как *hydroclimate/hydrological whiplash* или *hydroclimate volatility* – переходы между «очень сухо» и «очень влажно» на внутрисезонных и межгодовых масштабах. Современные исследования показывают, что усиление гидрологоклиматической изменчивости связано с антропогенным потеплением: ростом влагосодержания атмосферы и потенциальной интенсивности осадков, смещениями траекторий циклонов и блокирующими антициклонами, а также повышением испаряемости и усилением обратных связей «почвенная влага – температура». В результате появляется риск ситуаций, когда системы водопользования и защиты от наводнений переключаются между взаимоисключающими режимами управления, испытывая дефицит времени на адаптацию [1].

Проблема резких переходов имеет отчетливо выраженный международный и национальный характер. По оценкам Всемирной метеорологической организации (ВМО), водные опасности в последние годы развиваются на фоне рекордных температур, что приводит к одновременному усилению рисков как засух (через рост испаряемости и дефицит влаги), так и половодий/паводков (через экстремальные осадки и поверхностный сток). Отчет ВМО по глобальным водным ресурсам отмечает, что водный режим становится более изменчивым: наблюдаются сильные аномалии речного стока и почвенной влаги, а также рост значимости мониторинга и раннего предупреждения для управления ущербом [2]. На этом фоне формируются и методические направления анализа последовательных экстремумов: обсуждаются критерии выделения переходов «весеннее половодье → засуха → дождевой паводок», сравнимость алгоритмов и чувствительность результатов к выбору порогов и временных шкал [3].

С научно-методической точки зрения исследование резких переходов опирается на быстро развивающееся направление анализа последовательных гидрологических экстремумов. Важный вклад внесли работы, которые формализуют понятие резкого перехода и показывают, что результаты сильно зависят от выбора порогов, временного сглаживания, индикаторов и источников данных; это особенно критично при сравнении регионов и оценке трендов. В работе [4] подчеркивается, что прогнозирование и моделирование засух и паводков сталкивается с общими проблемами данных, понимания процессов, неопределенностей моделей и взаимодействия в системе «человек – вода», а значит требует интегрированных подходов. В итоге, «*whiplash*»-подход выступает как методологическая связь между классическими школами гидрологии суши (паводкообразование, русловые процессы и др.) и климатологией засух (метеорологические и почвенно-гидрологические механизмы, индексы SPI/SPEI и др.).

Для Европы исследование резких переходов особенно важно из-за высокой плотности населения и инфраструктуры, большой доли интенсивного землепользования и водозависимых отраслей экономики. Европейская оценка климатических рисков (EUCRA) фиксирует широкий спектр угроз для водных ресурсов, продовольственной безопасности, инфраструктуры и экосистем, подчеркивая необходимость стратегий адаптации, учитывающих каскадные и составные эффекты, включая последовательные засухи и наводнения [5]. В отчетах о состоянии климата в Европе отмечается, что 2024 год сопровождался широко распространенными наводнениями и сильными штормами на фоне рекордного тепла, при этом сохранялись контрасты влажных и сухих условий в разных частях континента, что соответствует логике роста гидролого-климатической изменчивости [6, 7]. Экономические последствия гидролого-климатических явлений существенны: в Европе наводнения исторически дают значительную долю прямого ущерба от погодных экстремумов, а ущерб от засух все чаще проявляется через потери урожая, ограничения водопользования, ухудшение состояния экосистем и повышение пожароопасности.

Международная исследовательская повестка по резким переходам активно развивается также в Китае, где переходы «засуха→дождевой паводок» рассматриваются как фактор риска для сельского хозяйства, водного хозяйства и качества воды. Показателен рост числа научных работ, посвященных оценке частоты и интенсивности исследуемых явлений на глобальном уровне и в условиях изменения климата, а также развитию статистических методов для оценки редких событий и рисков. В частности, в работе [8] показано усиление сухо-влажных резких чередований на глобальном фоне потепления, обсуждаются взаимосвязи и региональные особенности, что делает эту работу важной для сопоставления регионов Восточной Азии и Европы, в частности Беларуси. Развитие методического инструментария показывает работа [9], предлагающая подходы к оценке частоты и сочетаний экстремумов через «обратные» распределения и копулы, что важно для оценки риска резких переходов. Параллельно развиваются исследования связанных экстремумов (например, «сильная жара – засуха») и их последствий для социо-экосистем [10].

Белорусское Полесье представляет собой один из наиболее репрезентативных регионов Восточной Европы для анализа резких переходов, поскольку сочетает пойменно-болотную морфологию, высокую роль сезонности и русловых процессов в бассейне р. Припять, многолетнюю антропогенную трансформацию водосборов рек (мелиорация, гидротехническое строительство, распашка земель и др.) [11]. Сильные половодья и дождевые паводки могут быть скоротечными (с ограниченным пополнением почвенных влагозапасов, питанием грунтовых вод), а затем при установлении антициклонов и высокой испаряемости быстро формируются дефициты влаги и маловодье. В обратном направлении, после засушливого периода происходит деградация структуры поверхности почвы (корка, уплотнение), деградация растительного покрова, что повышает долю поверхностного стока при первых интенсивных осадках и ведет к «быстрым» дождевым паводкам.

Региональные исследования Полесья и бассейна Припяти показывают значимость как многоводий, так и маловодий для природных и хозяйственных систем региона. В работах белорусской гидрологической школы (А. А. Волчек и др.) рассматривается формирование наводнений на территории Полесья и подчеркивается роль региональных условий и режимных особенностей в развитии опасных уровней и расходов воды [12, 13]. Анализ рисков и трансформации стока в бассейне Припяти и водных ресурсов Белорусского Полесья в современных условиях [14, 15] дополняет картину оценкой изменений компонентов водного режима, важных для прогноза водообеспеченности и гидролого-климатических экстремумов. Значимый междисциплинарный аспект связан с торфяно-болотными экосистемами Полесья, в ряде работ по пожарной опасности и деградации ландшафтов отмечается, что необычно сухие периоды и трансформация гидрологического режима (включая снижение выраженности традиционных весенних разливов) могут усиливать восприимчивость к пожарам и деградации природных комплексов [16]. На уровне управления рисками Беларусь рассматривается международными институтами как страна, испытывающая разнообразные гидролого-климатические опасности (в том числе сильные ливни, засухи, пожары), что подчеркивается, например, в дорожной карте Всемирного банка по укреплению гидрометеослужб и систем раннего предупреждения [17].

Таким образом, актуальность исследования резких переходов между половодьями, засухами и паводками для Белорусского Полесья определяется одновременно глобальными тенденциями роста гидролого-климатической изменчивости и региональной спецификой водосбора Припяти, где природные пойменно-болотные ландшафты и антропогенно преобразованная территория могут ускорять смену режимов экстремальной тепловлагообеспеченности. Настоящая работа позиционирует анализ территории Белорусского Полесья в международном контексте, используя современную методологию определения последовательных экстремумов, оценки ущерба и климатических рисков, опираясь на региональную белорусскую эмпирическую базу по наводнениям, половодьям, паводкам, водным и климатическим ресурсам.

Материалы и методы

Объект исследования – бассейн р. Припять и ее отдельные притоки, характеризующиеся выраженной сезонностью стока и значимой ролью весеннего половодья.

Исследование выполнено для территории Белорусского Полесья на основе совмещения данных гидрологических и метеорологических рядов наблюдений. Гидрологический блок включает: данные о расходах воды (Q) р. Припять в створе г. Мозырь за период наблюдений с 1882 по 2018 гг., фенологические характеристики весеннего половодья по створу Мозырь – дату начала половодья и продолжительность половодья в сутках. Метеорологический блок включает суточные (1960–2025 гг.) и месячные значения (1882–2025 гг.) атмосферных осадков (P) и температуры воздуха (T) по ближайшей репрезентативной метеостанции Василевичи.

Календарные преобразования и сезонная шкала (DOY)

Для фенологического описания половодья календарные даты переводились в порядковый день года *day-of-year* (DOY), что обеспечивает корректное сравнение сезонных сдвигов между годами и используется при стандартизации сезонности индексов засухи [18].

$$\mathrm{DOY} = (\text{дата} - 1\ \text{января данного года}) + 1, \quad (1)$$

где DOY – порядковый день года (1…365/366).

DOY позволяет выявлять тренды в сроках начала половодья и корректно сравнивать внутрисезонные параметры между годами.

Фенология весеннего половодья

Для анализа климатических факторов, предшествующих половодью и сопровождающих его, задавались фиксированные окна: предполоводный период: 7, 10, 15 и 30 суток до даты начала половодья; период половодья от даты начала до даты окончания (включительно); послеполоводный период (для оценки резких переходов к дефициту влаги): 30, 60 и 90 суток после окончания половодья.

Такая схема позволяет оценивать как триггеры запуска половодья, так и условия, приводящие к быстрому развитию засушливости после прохождения пика половодья.

Для каждого года (y) задавались: день года начала половодья ($\mathrm{DOY}_{\mathrm{start(y)}}$) и длительность ($\mathrm{dur(y)}$). Окончание половодья вычислялось по формуле

$$\mathrm{DOY}_{\mathrm{end(y)}} = \mathrm{DOY}_{\mathrm{start(y)}} + \mathrm{dur(y)} - 1, \quad (2)$$

где $\mathrm{DOY}_{\mathrm{end(y)}}$ – день года окончания половодья.

Дата окончания половодья нами используется как «точка отсчета» для вычисления лага перехода (половодье → засуха).

Потенциальная испаряемость (PET) и водный баланс P−PET

Потенциальная испаряемость PET оценивалась по методу Торнтвейта на месячных данных (m) с учетом широты станции, позволяющей скорректировать длину дня. Данный метод широко применяется при ограниченной метеорологической информации и его применение обосновывается рядом работ российских ученых [19 и др.], однако здесь могут иметь место систематические смещения относительно физически обоснованной стандартной международной методики *FAO Penman – Monteith* [20] (особенно при изменениях дефицита влажности воздуха, ветрового режима и облачности). Рассчитанные величины P–PET и производные индексы (SPEI30) интерпретируются в настоящем исследовании прежде всего как индикаторы относительной динамики влагодефицита и скорости переходов, а не как точная оценка испарения в миллиметрах. Формула Торнтвейта имеет вид [21]

$$\mathrm{PET_m} = 16\,\mathrm{k_m}\left(10\,\frac{\mathrm{T_m}}{\mathrm{I}}\right)^{\mathrm{a}},\ \mathrm{T_m} > 0\ ;\ \mathrm{PET_m} = 0\ ,\ \mathrm{T_m} \le 0. \quad (3)$$

Тепловой индекс (I) рассчитывается как

$$\mathrm{I} = \left(\frac{\mathrm{T_1}}{5}\right)^{1{,}514} + \cdots + \left(\frac{\mathrm{T_{12}}}{5}\right)^{1{,}514}. \quad (4)$$

Учитываются значения температур только при $T_m > 0$.

Показатель степени (a) определяется по формуле [21]

$$\mathrm{a} = 6{,}75 * 10^{-7} * \mathrm{I}^3 - 7{,}71 * 10^{-5} * \mathrm{I}^2 + 1{,}792 * 10^{-2} * \mathrm{I} + 0{,}49239\ . \quad (5)$$

Климатический водный баланс определяется как

$$\mathrm{D_m} = \mathrm{P_m} - \mathrm{PET_m}, \quad (6)$$

где Dm – водный баланс, мм; Pm – осадки, мм.

При полученных значениях Dm < 0 соответствует влагодефициту, Dm > 0 – избытку влаги.

Для внутрисезонного анализа месячная PET распределялась по дням месяца равномерно [20, 21]:

$$\mathrm{PET_{day}}_{(t)} = \frac{\mathrm{PET_m}}{\mathrm{Ndays_m}};\ \mathrm{D_{day(t)}} = \mathrm{P_{day(t)}} - \mathrm{PET_{day(t)}}, \quad (7)$$

где t – номер дня во временном ряду; $\mathrm{D_{day(t)}}$ – суточный водный баланс, мм; $\mathrm{P_{day(t)}}$ – суточная сумма осадков, мм; $\mathrm{PET_{day(t)}}$ – суточная потенциальная испаряемость, мм.

Данное приближение позволяет выявить краткосрочные периоды влагодефицита при отсутствии суточной PET.

Индексы засухи SPI/SPEI и внутрисезонный индекс SPEI30

SPI (*Standardized Precipitation Index*) характеризует аномалии осадков на выбранном временном масштабе [22]. SPEI (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*) расширяет SPI, используя баланс P−PETP, и тем самым учитывает влияние потепления на засушливость [23]. Для исследования быстрых переходов в пределах сезона использован суточный индекс SPEI30 на 30-дневной шкале.

$$\mathrm{D30\ (t)} = \mathrm{D_{day(t)}} + \mathrm{D_{day(t-1)}} + \mathrm{D_{day(t-2)}} + \ldots + \mathrm{D_{day(t-29)}}, \quad (8)$$

где Dday (t) = Pday (t) – PETday (t).

D30 отражает накопленный за 30 суток влагодефицит/избыток влаги и служит основой стандартизированного индекса.

Для корректного сравнения D30 в разные дни года выполнена стандартизация сезонности непараметрической ранговой нормализацией по DOY [23]:

$$\mathrm{SPEI30(t)} = \Phi^{(-1)\left(\frac{\mathrm{rank(D30|DOY)}-0{,}5}{\mathrm{n_{DOY}}}\right)}, \quad (9)$$

где $\Phi^{(-1)}$ – обратная функция стандартного нормального распределения (квантиль нормального распределения); $\mathrm{rank(D30|DOY)}$ – ранг значения D30(t) среди всех лет для того же дня года DOY(t); n_{DOY} – число наблюдений (лет) для данного DOY.

Получаемый SPEI30 имеет следующую интерпретацию: около 0 – норма; ≤ −1 – умеренная засуха; ≤ −1,5 – сильная; ≥ +1 – влажные условия.

В работе [24] нами ранее проведен анализ индикаторов и индексов засух и в настоящем исследовании обосновано использование SPI и SPEI.

Экстремальные осадки и пороги P95/P99

Экстремальные суточные осадки оценивались непараметрическими порогами (процентилями) для теплого сезона (апрель – октябрь), что соответствует подходам к анализу экстремальных индексов осадков и кратковременных ливневых экстремумов [25, 26].

$$\mathrm{P95} = \mathrm{Quantile}_{0{,}95(\mathrm{P_{day}})};\ \mathrm{P99} = \mathrm{Quantile}_{0{,}99(\mathrm{P_{day}})}, \quad (10)$$

Экстремальный дождь фиксируется при Pday ≥ P95 (или ≥ P99).

Диагностика резких переходов

Переход «весеннее половодье → засуха» определялся как лаг (в днях) от окончания половодья до первой даты после окончания половодья, когда SPEI30 ≤ −1,0 (умеренная засуха). Дополнительно анализировался порог SPEI30 ≤ −1,5.

$$\mathrm{lag_{wd(y)}} = \mathrm{t_{drought(y)}} - \mathrm{t_{end_{flood(y)}}}, \quad (11)$$

где $\mathrm{t_{end_{flood(y)}}}$ – дата окончания половодья; $\mathrm{t_{drought(y)}}$ – первая дата после окончания половодья, когда SPEI30 ≤ порог.

Малые значения $\mathrm{lag_{wd(y)}}$ (например ≤ 30–60 дней) трактуются как быстрый переход к влагодефициту.

Переход «засуха→дождевой паводок» трактовался как климатическая предпосылка дождевого паводка: после засушливого периода (SPEI30 ≤ −1 длительностью ≥20 суток) в течение 90 суток фиксировалась первая дата экстремального дождя Pday ≥ P95. Однако для строгого гидрологического подтверждения паводка требуется сопоставление событий с суточным рядом расходов Q (время до пика и величина пика).

Тренды и смена режимов (MK+Sen и Pettitt)

Долгосрочные изменения фенологии половодья и производных индикаторов оценивались тестом Манна–Кендалла (значимость тренда) и наклоном Сенна (величина тренда) [27, 28].

$$\mathrm{Sen} = \mathrm{median}\left(\frac{(\mathrm{x_j} - \mathrm{x_i})}{(\mathrm{t_j} - \mathrm{t_i})}\right),\ \text{для всех}\ \mathrm{i} < \mathrm{j}, \quad (12)$$

где i и j – индексы наблюдений во временном ряду.

Смена режима для ряда начала половодья DOYstart выявлялась тестом Петтитта [29]. Смена режима указывает на переход системы

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-190-206

формирования весеннего стока в иной режим сезонности (более раннее/позднее наступление половодной фазы).

$$U_t = 2 * \mathrm{sum}_{i=1}^{t} R_i - t * (n+1),$$
$$K = \mathrm{argmax}_{1<=t<=n-1} \mathrm{abs}(U_t), \quad (13)$$

где Ri – ранг значения x_i среди всех $x_1 \ldots x_n$ (от 1 до n); К – точка перелома.

Полученное малое значение (p) указывает на статистически значимый перелом.

Все вычисления выполнялись в единой аналитической среде *Python* с фиксированными параметрами обработки, порогами событий и правилами расчета индикаторов. Это обеспечивало сопоставимость полученных результатов между разделами анализа и воспроизводимость итоговых оценок.

Результаты исследования и их обсуждение

Половодье/наводнение и засуха в Беларуси (краткий обзор 2023 года)

В гидрологическом режиме Беларуси наибольшее практическое значение имеют периоды аномально высокой и аномально низкой водности, поскольку именно они определяют основные риски для населенных пунктов, транспортной инфраструктуры, сельскохозяйственных земель и водохозяйственных систем. Для равнинных речных бассейнов республики наиболее характерны весенние подъемы воды, однако в отдельные годы существенную роль начинают играть и дождевые паводки теплого периода. В последние десятилетия все более важным становится не изолированное рассмотрение отдельных экстремумов, а анализ их последовательной смены в пределах одного года.

К катастрофическим наводнениям на реках республики за период регулярных наблюдений относятся три наводнения. Одно из них произошло в 1931 году на реках Западная Двина, Днепр, Березина и Сож. Второе – в 1958 году на реках Неман и Щара. Кроме этого, для бассейна реки Припять катастрофическим стало наводнение 1845 года.

С 1990 года на территории Беларуси значительно увеличивается повторяемость засух в теплый период, увеличивается также площадь их распространения, интенсивность и продолжительность данных явлений [30]. Наиболее сильные засухи отмечались в Беларуси в 1992, 1999, 2002, 2010, 2015, 2018 гг. Следует отметить засуху в мае 2023 года, когда по республике выпало осадков около 19 % климатической нормы на фоне превышения климатической нормы температур воздуха на 1–2 ºС.

События 2023 года можно рассматривать как показательный пример резкой сезонной перестройки гидролого-климатического режима. Именно поэтому дальнейший анализ этого года важен не только как описание отдельного экстремального сезона, но и как иллюстрация механизма перехода от избытка влаги к ее дефициту.

Половодье (наводнение) 2023 года

Предпосылки весеннего половодья 2023 года начали формироваться еще в конце 2022 года. Повышенное увлажнение предшествующего периода способствовало сохранению сравнительно высоких уровней воды уже в начале зимы и подготовило фон для дальнейшего усиления стока в бассейнах крупных рек.

Холодный сезон 2022-2023 гг. отличался повышенной гидролого-климатической изменчивостью. Серии оттепелей сопровождались частичным таянием снежного и ледового покрова, что поддерживало большую зимнюю водность и ускоряло поступление воды в русловую сеть еще до развития основной фазы весеннего половодья.

Переход к основной фазе половодья произошел уже в марте при сочетании положительных температур воздуха и дополнительного атмосферного водного питания. Для большинства рек это выразилось в быстром формировании весенних максимумов, тогда как в бассейне Припяти повышение уровней фактически продолжало процессы, начавшиеся еще в зимние месяцы.

В период развития половодья до 70 % годового стока рек Беларуси прошла через русла за несколько весенних недель, при этом на многих реках наблюдались годовые максимумы.

Весенний подъем воды в 2023 году сопровождался повышенной водностью в ряде бассейнов (135–165 % от нормы), однако основные последствия носили преимущественно локальный характер. Воздействие проявлялось главным образом в подтоплении пойменных участков, прибрежных территорий и отдельных элементов дорожной сети, тогда как масштабных разрушительных последствий отмечено не было.

Ко второй половине апреля на большинстве рек началась фаза отчетливого снижения уровней воды до 40 см в сутки. При этом на отдельных участках пойменные территории еще сохраняли избыточное увлажнение, тогда как в бассейне Припяти инерционность половодного режима оставалась заметно выше.

По состоянию на 14–17 апреля 2023 года рост уровней воды продолжался в основном только в бассейне Припяти, тогда как на остальных реках доминировала фаза спада.

По продолжительности весенний подъем воды соответствовал обычной для территории пространственной дифференциации: на малых и средних реках активная фаза была сравнительно короткой (30-40 дней), тогда как на крупных водотоках, прежде всего в бассейне Припяти, повышенная водность сохранялась заметно дольше.

Хотя весеннее половодье 2023 года не носило катастрофического характера, уже вскоре после его завершения система перешла к фазе быстрого снижения водности. На фоне резкого дефицита атмосферных осадков и усиления суммарного испарения сложились условия для резкого перехода от весеннего избытка воды к раннелетнему ее дефициту.

Засуха 2023 года

Весенне-летний сезон 2023 года характеризовался выраженным дефицитом влаги, который выделялся по интенсивности и пространственному охвату на фоне последних десятилетий. Существенную роль сыграло не столько суммарное годовое количество атмосферных осадков, сколько их резкое внутрисезонное перераспределение в сочетании с повышенным температурным фоном.

Март 2023 года был очень влажным (одно из первых мест по увлажнению за период наблюдений с 1945 года), а апрель по осадкам был близок к норме (около 39 мм, что составляет 102 %). С конца апреля до примерно 25 июня в большинстве районов страны осадки составили не более 10–30 % климатической нормы, что и сформировало основное «ядро» засухи 2023 года. Это привело к полному иссушению верхнего 10-см слоя почвы на большей части территории. Май 2023 года стал самым засушливым с 1945 года, в среднем по Беларуси выпало 12 мм осадков, или около 19 % климатической нормы Предыдущий минимум (26 мм) был в 1971 году.

В целом за год по стране выпало 724 мм осадков (113 % нормы), но внутри года распределение было крайне неравномерным: весна – 121 мм (86 % климатической нормы), май – 12 мм (19 %). В мае дефицит осадков был повсеместным, особенно выраженным в центральных и южных регионах. В таблице приведена доля майских осадков от климатической нормы по областным центрам Беларуси.

Таблица 1 – Доля атмосферных осадков от климатической нормы мая, %

Брест	Витебск	Гомель	Гродно	Могилев	Минск
27	16	27	28	22	9

Среднегодовая температура воздуха в Беларуси в 2023 году составила примерно +8,7 °С, что выше климатической нормы на 1,5 °С и соответствует одному из самых теплых лет наблюдений.

На протяжении года температурный фон был выше нормы почти во все месяцы, включая весну и лето. Отмечалось много очень жарких дней летом, что усиливало испарение и усугубляло засуху.

В результате засухи погибло около 141 тыс. га посевов (менее 5 % посевной площади) и повреждено 368 тыс. га (около 15 %), главным образом зерновые культуры в южных областях.

Засуха вызвала снижение уровней грунтовых вод и маловодье рек. В отдельных населенных пунктах отмечалось пересыхание колодцев и ухудшение качества питьевой воды.

Значительно увеличились риски лесных и торфяных пожаров, ухудшилось состояние болотных и луговых экосистем, особенно в южных районах Полесья.

Из-за низких уровней воды и увеличения ее температур, ухудшались условия работы отдельных гидроузлов и водозаборов, что требовало дополнительного регулирования водного режима.

Подобные 2023 году явления в Беларуси наблюдаются в 60–70 % лет весной в Брестской и Гомельской областях, в 20–30 % в Витебской. В работах академика В. Ф. Логинова отмечается явно выраженная тенденция аридизации климата Беларуси [31].

Стоит также отметить, что риск наводнений и других опасных гидрологических и климатических явлений становится ограничивающим фактором природопользования. В свою очередь опасно низкие уровни воды влекут за собой проблемы в хозяйственном водоснабжении, высокий риск пожаров, приостановку судоходства, снижение разнообразия флоры и фауны, изменение морфологии бассейна водного объекта, нарушение работы сельскохозяйственных отраслей и энергетики.

Механизмы и гипотеза резких переходов в системе «весеннее половодье → засуха → дождевой паводок»

Механизмы формирования весенних половодий и дождевых паводков

В классической гидрологии выделяют, по меньшей мере, два базовых режима формирования поверхностного стока после выпадения атмосферных осадков: инфильтрационно-избыточный – возникающий, когда интенсивность дождя превышает инфильтрационную способность почвы [32]; насыщенно-избыточный – связанный с формированием переменной области стока, когда почва на водосборе является насыщенной водой до состояния полной влагоемкости и любая дополнительная вода формирует поверхностный сток [33]. Дополнительно существенен вклад внутрипочвенного стока и подземного питания, определяющий меженный сток и характер спада гидрографа [34].

Весеннее половодье формируется при сочетании запаса воды в снежном покрове, интенсивности снеготаяния (температурный режим, солнечная радиация), состояния почвы (ее промерзание и влажность), весенних осадков и русловых факторов (ледовые явления, заторы) [35]. Половодья/паводки возникают при превышении пропускной способности русла/поймы и могут быть как фазой затяжного половодья/паводка, так и результатом кратковременных экстремальных осадков. В Белорусском Полесье существенны пойменные процессы и влияние мелиоративной сети. Например, открытая сеть каналов и закрытый дренаж способны усиливать пики половодья и менять форму гидрографа.

Атмосферные осадки (P) распределяются на инфильтрацию (в почву и далее в грунтовые воды), поверхностный сток (быстрый приток в русло), испарение и транспирацию, накопление (снег, лед, пруды и водохранилища, почвенная влага).

Формирование половодья (типично снежного)

Половодья в умеренных широтах обусловлены сезонным высвобождением запаса воды в снежном покрове. Можно выделить пять последовательных процессов.

1. Накопление.

Зимой, в холодный период формируется запас воды в снежном покрове (водный эквивалент снега).

2. Снеготаяние.

Критичны скорость поступления энергии на таяние и фаза атмосферных осадков. Энергобалансовые модели снежного покрова [36] показывают, что дождь, выпавший на снежный покров, усиливает приток воды и тепла одновременно, способствуя ускоренному таянию и формированию пиков половодий [37].

3. Ограничение инфильтрации.

Весной почва может быть: промерзшей (инфильтрация резко снижена), переувлажненной (почвенные поры заполнены водой), с уплотненной коркой/ледяной линзой. Тогда значительная часть воды превращается в поверхностный сток.

4. Концентрация и маршрутизация стока.

Вода быстро попадает в речную русловую сеть, особенно при развитой мелиоративной сети, сети балок/оврагов, малой шероховатости подстилающей земной поверхности (деградированная растительность, сельскохозяйственные угодья, урбанизированные территории).

5. Русловые эффекты.

Уровни воды растут сильнее при ледовых заторах, заилении/зарастании русла, узких поймах, подпорах от водохранилищ/дамб и других гидротехнических сооружений, совпадении пиков половодий на притоках.

Формирование дождевого паводка

Основу формирования дождевого паводка составляют, прежде всего, экстремальные атмосферные осадки и условия, рассмотренные выше, связанные с инфильтрацией, насыщением почвенных пор водой, состоянием поверхности и др.

Механизмы образования засухи

Засуха может проявляться на метеорологическом, почвенном (агрономическом) и гидрологическом уровнях. Классические индексы, такие как PDSI [38], SPI [22] и SPEI [23], позволяют количественно фиксировать дефицит влаги для различных временных масштабов. Механистически засуха возникает при недостатке атмосферных осадков, росте потенциальной испаряемости вследствие высокой температуры, солнечной радиации и дефицита влажности воздуха, и слабом пополнении запасов почвенной влаги и грунтовых вод. Важную роль играют обратные связи «влажность почвы – температура/осадки», способные ускорять нагрев и иссушение поверхности.

SPI и SPEI используются для стандартизированной количественной оценки аномалий увлажнения (SPI – по осадкам; SPEI – по балансу P−PET, который чувствителен к происходящему потеплению). Для Белорусского Полесья показательна связка «ранняя весна → раннее окончание половодья → рост PET в конце весны/начале лета → быстрое иссушение», при этом осушительная мелиорация уменьшает влагозапасы в почве и тем самым может ускорять переход «весеннее половодье→засуха». Засуха – это не только когда отсутствуют атмосферные осадки, это несоответствие притока влаги и потерь, а также изменение способности ландшафта удерживать и отдавать воду. Можно выделить следующие причинно-следственные связи образования засухи.

Атмосферные факторы, приводящие к уменьшению осадков – это устойчивая антициклоническая циркуляция → ясная погода, низкая вероятность фронтов и конвекции, смещение фронтальных зон, более редкие влажные переносы.

Поверхностно-энергетические факторы, приводящие к потере влаги при ясном небе и жаре – это рост потенциальной испаряемости, усиление испарения подстилающей земной поверхности и транспирация (если есть растительность и доступность воды).

Почвенно-гидрологические факторы, приводящие к потере влаги имеют место тогда, когда почва теряет влагу неравномерно в вертикальном профиле, при иссушении верхнего слоя уменьшается капиллярный подъем воды из более глубоких слоев. Грунтовые воды могут понижаться из-за недостаточного инфильтрационного питания, повышенного водоотбора, осушительной мелиорации. Гидрологическая засуха часто запаздывает относительно метеорологической, но при определенных условиях может наступать достаточно быстро.

Биофизические обратные связи засухи приводят к снижению влажности почвы, уменьшению ее испарительного охлаждения, сильному прогреву, увеличивающему испаряемость. В условиях сильного теплового стресса растения сбрасывают листья, а иногда и почки и плоды, чтобы сохранить влагу, это одновременно ухудшает инфильтрацию в будущем (деградация структуры растительного покрова, оголение почвы, почвенная корка).

Гипотеза быстрого перехода от весеннего половодья к засухе

Предлагаемая нами гипотеза утверждает, что быстрый переход от весеннего половодья к засухе возможен тогда, когда экстремальный приток воды не преобразуется в устойчивые ее запасы (почвенная влага, грунтовые воды, аккумулирование воды болотами), а уходит транзитом по русловой сети. Ситуацию усиливает снижение инфильтрации (кольматаж почвенных пор, почвенная корка, уплотнение почвы) и последующее установление условий высокой потенциальной испаряемости (антициклон, сильная жара, сильный ветер), в результате чего верхние горизонты быстро иссушаются. То есть половодье может быть не признаком «влажного года», а признаком неэффективного удержания воды.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-190-206

Физические механизмы, делающие переход быстрым, можно разделить по блокам.

1. Гидрологический «сброс» и малое пополнение запасов.

Здесь выделяется короткое, но мощное половодье. Вода проходит транзитом, промерзшая или уже насыщенная водой почва во время половодья инфильтрует воду слабо, грунтовые воды почти не пополняются. Высокая дренированность территорий в результате осушительной мелиорации способствует быстрому отводу воды и освобождению от нее поймы. С другой стороны, построенные дамбы на польдерных мелиоративных системах сужают пойму и ограничивают весенний разлив воды увеличивая ее уровни в реках. В результате формируются большие пики половодья, после которых идет резкий спад уровней и создаются предпосылки к гидрологической засухе.

2. Деградация инфильтрации и структуры почвы вследствие наводнения.

Парадоксально, но избыток воды может ухудшить последующее удержание влаги. При больших скоростях воды происходит разрушение мелкодисперсных частиц почвы и последующее их осаждение на поверхности, кольматаж порового пространства, образование почвенной корки. На сельскохозяйственных угодьях механическая обработка переувлажненной почвы приводит к ее уплотнению и ухудшению агрегатного состава, в результате уменьшаются коэффициенты фильтрации, в будущем возрастает поверхностный сток.

3. Быстрый рост испаряемости после избытка воды.

Этот сценарий является распространенным для территории Белорусского Полесья. Половодье случается ранней весной, затем происходит резкое потепление и идет переход от зимней циркуляции к летней, когда возможны резкие колебания скорости ветра, далее устанавливается антициклонический режим погоды. Если влага не ушла в глубокие почвенные горизонты, растительность быстро развивается, так как имеет место большое водопотребление, при этом верхние горизонты быстро высыхают и стремительно наступает почвенная засуха.

4. Атмосферная перестройка режима.

Если после влажного периода возникает блокирующий антициклон, атмосферные осадки прекращаются, солнечная радиация и температура растут, усиливается испарение, тогда формируется засуха даже при недавних половодьях/наводнениях.

Лаг (скорость перехода) «половодье→засуха» определяется сочетанием факторов среди которых, время окончания половодья, количественный показатель весенних влагозапасов почвы/грунтовых вод после половодья, тип последующей атмосферной циркуляции (серии без осадков), рост PET, наличие искусственной гидрографической сети, морфология поймы и структура почвенного покрова.

Переход удобно описывать лагом (в днях) от даты окончания половодья до первой даты засушливого периода по SPEI/SPEI30, долей быстрых переходов (≤ 30/≤ 60 дней) и условной вероятностью засухи при «ранней/поздней весне», «коротком/длинном половодье» и т. д. Такой набор характеристик соответствует современным подходам к описанию «точки смены», длительности и скорости перехода.

Ранневесеннее половодье при промерзшей почве чаще ведет к малому пополнению грунтовых вод, происходит быстрый его спад и возникает риск засухи в конце весны/летом. Летние дождевые паводки могут сильнее пополнять почвенные влагозапасы, но только если инфильтрация почвенной благи не блокирована коркой или уплотнением.

При высокой инфильтрационной способности, наличии легких по гранулометрическому составу почв и грунтов избыточная вода переходит в запасы, переход «половодье→засуха» происходит медленнее.

Пруды и водохранилища могут как сглаживать, так и усиливать риск засухи ниже по течению (если режимы сбросов и накопления не совпадают с потребностями экосистем и водопользования).

Если после весеннего половодья начинается период жаркой, сухой, ветреной погоды переход резко ускоряется. Если идут умеренные дожди, облачность и низкая испаряемость вода удерживается дольше.

Для территории Белорусского Полесья целесообразно рассматривать режимы «до/после» периодов интенсивных преобразований водосборов путем мелиоративных мероприятий. Непараметрический тест Петтитта [29] широко применяется для выявления года разрыва (перестройки уровня временного ряда). Режимное деление должно обсуждаться физически: потепление и ранняя весна, гидрологоклиматическая изменчивость, а также антропогенные изменения стока. Режимы необходимы для корректного сопоставления вероятностей «половодье→засуха» и «засуха→дождевой паводок», а также для интерпретации трендов как климатического или климатоантропогенного характера.

Механизмы и гипотеза быстрого перехода от засухи к дождевому паводку

Быстрый переход от засухи к дождевому паводку обусловлен тем, что засушливые периоды часто снижают инфильтрационную способность почв именно в момент первого сильного дождя [40]. Факторы включают коркообразование и уплотнение, а также водоотталкивающие свойства почв, особенно после пожаров [41]. При выпадении атмосферных осадков высокой интенсивности формируется инфильтрационно-избыточный сток, который быстро концентрируется по мелиоративной, овражно-балочной сети, дорогам и ливневой инфраструктуре, что приводит к высокому пику и малому времени добегания.

Переход часто связан со сменой циркуляционных режимов: после сухого периода (антициклон) происходит вторжение влажных масс и/или развитие конвекции, приводящее к интенсивным ливням. Экстремальные события могут возникать как из-за редких осадков, так и из комбинации нескольких «не экстремальных» факторов, дающих совместный критический эффект. Это хорошо ложится на концепцию «последовательных событий» и «скачкообразного» ответа [42]. В последовательности «засуха→ливень» переход к дождевому паводку определяется гидрологическим откликом – при иссушении и уплотнении поверхности может снижаться инфильтрация и расти доля поверхностного стока, мелиоративная сеть ускоряет поверхностный и внутрипочвенный сток повышая потенциал дождевых паводков. Интуитивно кажется, что сухая почва впитает влагу. Однако на практике засуха часто повышает риск дождевого паводка, потому что меняются свойства поверхности и путей стока.

Основными механизмами данного резкого перехода являются:

1. Потеря инфильтрационной способности почвы из-за корки, уплотнения и гидрофобности.

Во время засухи верхний слой распадается на мелкие дисперсные частицы, первый дождь «запечатывает» поверхность, образуется корка. Пересыхание вызывает усадку, появляются трещины, иногда повышающие инфильтрацию локально, однако при экстремальных осадках вода быстро находит пути стока по уплотненной поверхности между трещинами и по микрорельефу. После пожаров или сильного перегрева может возникать гидрофобность, приводящая к резкому снижению инфильтрации.

2. Низкая растительная защита и шероховатость поверхности.

Засуха приводит к деградации растительного покрова, происходит увядание листьев и усыхание травяного покрова, как следствие, меньший перехват выпадающих осадков. На оголенной почве быстрее формируется поверхностный сток, проявляется эрозия. Отмирание корневой системы растений ухудшает структуру почвы, макропор становится меньше.

3. Очень большая интенсивность атмосферных осадков (конвективные ливни).

После сильной жары часто возрастает вероятность очень интенсивных ливней (конвекция на фоне перегретой поверхности при поступлении влаги). Даже если почва и способна впитывать влагу, интенсивность осадков может превышать инфильтрационную способность.

4. «Первый промыв» и перенос наносов.

Первый дождь после засухи смывает пыль и мелкие частицы в русло, повышает мутность воды, приводит к заилению мелкой гидрографической сети, снижает ее пропускную способность, засоряется ливневая канализация, что дополнительно увеличивает уровни воды и локальные подтопления.

Скорость перехода «засуха→дождевой паводок» зависит от следующих факторов: интенсивности и длительности ливня; состояния подстилающей земной поверхности (корка/уплотнение/гидрофобность/пожары); степени покрытия растительностью и специфики землепользования (сельскохозяйственные угодья, лесопосадки, вырубки, урбанизированные территории); рельефа и связность путей стока (овраги, балки, дорожная сеть);

состояния русел естественной и искусственной гидрографической сети и гидротехнических сооружений (заиление, зарастание, засорение, пропускная способность ливневой канализации и др.).

На рисунке 1 представлена схема, наглядно характеризующая резкие переходы в системе «весеннее половодье → засуха → дождевой паводок».

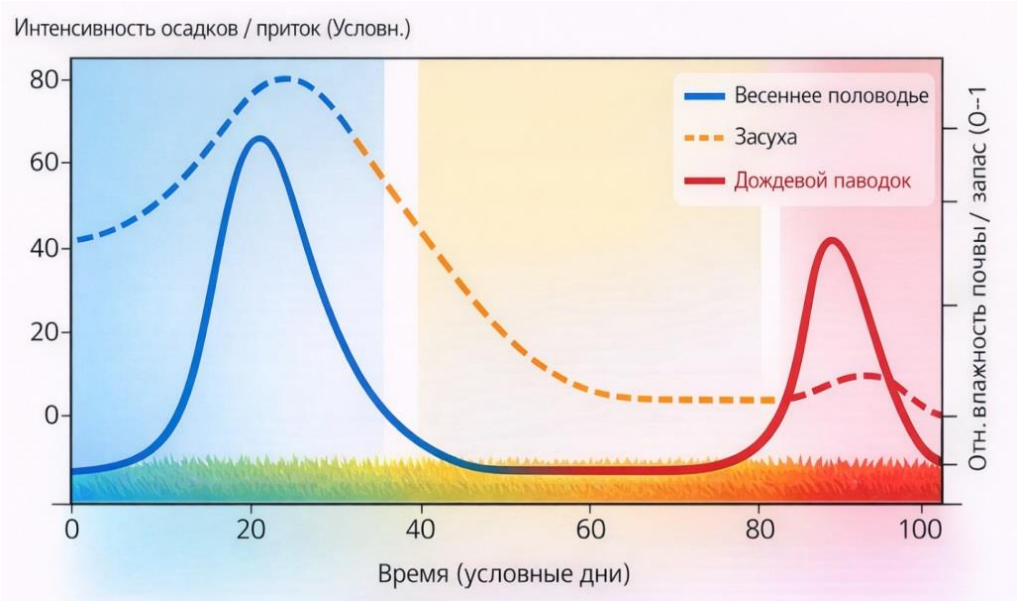


Рисунок 1 – Схема резких переходов «весеннее половодье → засуха → дождевой паводок»

Рисунок 1 показывает концептуальную модель сезонной трансформации водного режима, при которой весеннее половодье, обусловленное избыточной влагой, сменяется фазой летнего иссушения, а затем при выпадении интенсивных осадков развивается дождевой паводок. Схема подчеркивает нелинейный характер изменений гидрологического режима и возможность резких переходов в исследуемой системе.

Для каждого типа ландшафта имеется свой сценарий быстрых переходов (таблица 2).

Таблица 2 – Сценарии быстрых переходов «весеннее половодье→засуха→дождевой паводок» для различных типов ландшафтов/территорий

«весеннее половодье→засуха»	**«засуха→дождевой паводок»**
Лесная зона (смешанные леса)	
– половодье проходит в условиях промерзшей почвы и наличии ледовых явлений на реках → высокие уровни воды и быстрый транзитный русловой сток; – на осушенной/дренированной территории (агролесомелиорация) ускоряется поверхностный и внутрипочвенный сток; – после влажного периода антициклон, теплая весна → рост суммарного испарения, верхние горизонты быстро иссушаются	– после засухи/пожаров возможна гидрофобность подстилающей земной поверхности, лесной подстилки; – выгорание и иссушение лесной подстилки и повреждение почвенной структуры → рост поверхностного стока при ливнях; – буреломы/завалы/санитарные рубки → снос древесины в русла каналов и рек, приводящий к локальным подпорам
Пойменные/болотные ландшафты	
– в естественном состоянии переход обычно медленнее (болота/поймы аккумулируют воду); – но при осушительных мелиорациях и одамбировании рек – наоборот быстрый сток → ускорение засухи	– если торфяники переосушены, возможна деградация и пожары → дальнейшая потеря водоудержания; – на восстановленных болотах пики паводков обычно ниже и они растянуты во времени
Урбанизированные территории	
– «городской избыток воды» почти не пополняет ее запасы, вода быстро уходит по ливневой канализации; – далее имеет место дефицит влаги и формируется «городской остров тепла», усиливается испаряемость → жара, локальная засушливость и перегрев искусственных сооружений	– почти гарантированный риск при ливнях: застройка, закрытые поверхности (дороги, улицы, площадки) на фоне засоренной ливневой канализации после сухого периода; – «первый смыв» мусора и пыли ухудшает пропуск труб/решеток → локальные подтопления
Речные бассейны с зарегулированным стоком (пруды, водохранилища)	
– если управление ориентировано на противопаводковую защиту, пруды и водохранилища будут заполняться стоком воды весеннего половодья, однако ниже по течению может формироваться маловодье (зависит от правил эксплуатации)	– локально может снижаться риск пиков дождевых паводков, но при переполнении прудов и водохранилищ, аварийных сбросах возможен резкий подъем уровней воды в русловой сети

Предложенная гипотеза согласуется с классическими представлениями о формировании руслового стока и его ролью и связью с засухами в условиях неустойчивого и переменного естественного увлажнения. В итоге можно сказать, что быстрые переходы чаще всего возникают, когда: экстремальность атмосферных осадков/таяния снега сочетается с низкой способностью ландшафта удерживать воду и/или с резким ростом испаряемости, а затем засушливое состояние подготавливает поверхность к инфильтрационно-избыточному стоку при первом сильном дожде. Это означает, что адаптационные меры должны быть двусторонними [43, 44]. Для уменьшения последствий перехода «весеннее половодье→засуха» необходимо повышение

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-190-206

влагосодержания почв на водосборе, повышения их инфильтрационной способности (восстановление болот/лугов, противоэрозионные мероприятия и др.), для предотвращения последствий в системе «засуха→дождевой паводок» – мероприятия по организации поверхностного стока, восстановление растительности, управление пожарами, поддержание пропускной способности русел и ливневой канализации и др.

Комплексный анализ гидрологического режима р. Припять и климатических условий Белорусского Полесья

Комплексный анализ гидрологического режима р. Припять и климатических условий выполнен для различных периодов (1882–2018 гг., 1960–2025 гг.) и разрешения данных (месяц, сутки). В частности, рисунки 2, 3 показывают динамику начала половодья и его продолжительность за период 1882–2018 гг.

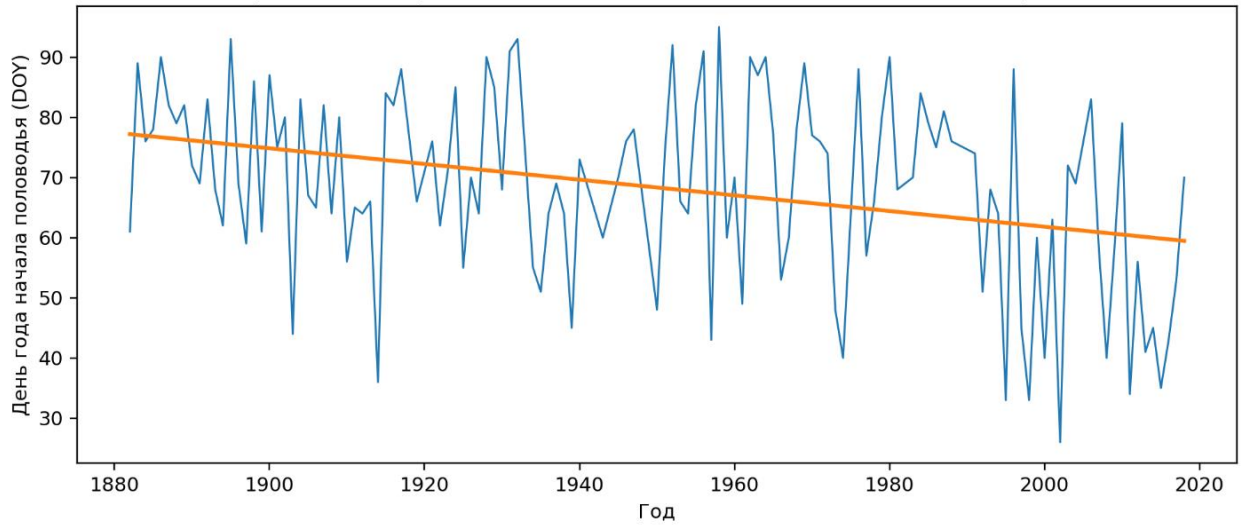


Рисунок 2 – Начало половодья (DOY) на р. Припять, порядковый день года

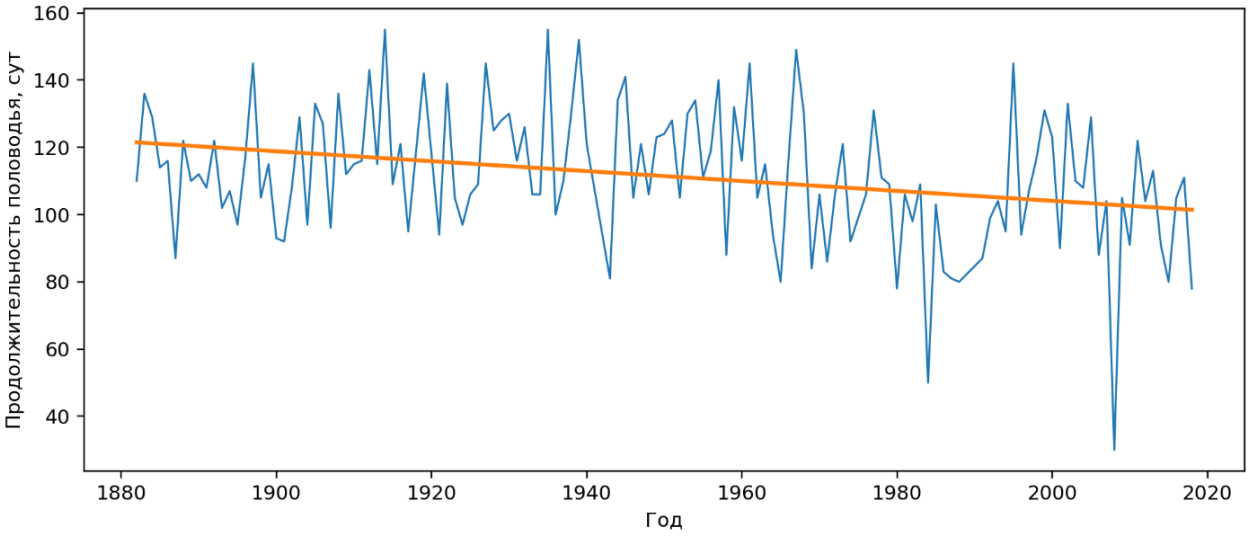


Рисунок 3 – Продолжительность половодья на р. Припять, сут.

Рисунки 2, 3 показывают, что фенология весеннего половодья в Припять (створ Мозырь) за 1882–2018 гг. претерпевает направленные изменения. Дата начала половодья демонстрирует тенденцию к смещению на более ранние сроки, а продолжительность половодья – к сокращению. Несмотря на значительную межгодовую изменчивость, обе линии тренда имеют устойчивый нисходящий характер. Это свидетельствует о перестройке сезонного водного режима под влиянием климатических изменений, прежде всего потепления зимне-весеннего периода, которое способствует более раннему и более быстрому прохождению весеннего половодья.

На рисунках 4, 5 представлена динамика климатических характеристик за период 1882–2025 гг. по репрезентативной метеостанции Василевичи.

Рисунок 4 демонстрирует устойчивое повышение среднегодовой температуры воздуха в Василевичах, особенно выраженное в последние десятилетия. Это свидетельствует о современном потеплении климатических условий, способном оказывать существенное влияние на сроки снеготаяния, испаряемость и влагообеспеченность территории. Рисунок 5 показывает, что годовая сумма осадков также обнаруживает тенденцию к увеличению, однако данный рост сопровождается высокой межгодовой изменчивостью и выраженным чередованием сухих и влажных лет.

Если рассматривать оба рисунка совместно, они позволяют сделать вывод о том, что на исследуемой территории наблюдается одновременное повышение температуры и умеренное увеличение осадков, однако эти два процесса неравнозначны по своему гидрологическому эффекту. Температура возрастает более последовательно и устойчиво, тогда как осадки остаются сильно изменчивыми. В результате рост осадков может частично компенсироваться усилением испаряемости на фоне потепления. Именно поэтому увеличение годовой суммы осадков само по себе не гарантирует улучшения влагообеспеченности и не исключает развития засушливых состояний. Напротив, сочетание потепления с высокой вариабельностью осадков создает предпосылки для усиления гидролого-климатической контрастности.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-190-206

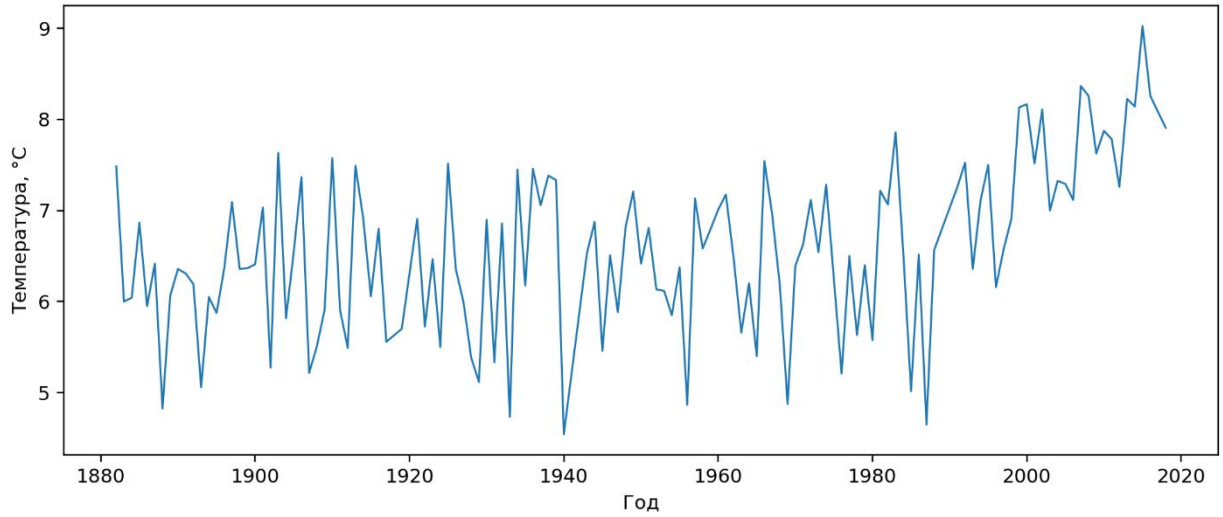


Рисунок 4 – Среднегодовая температура воздуха (Василевичи), °C

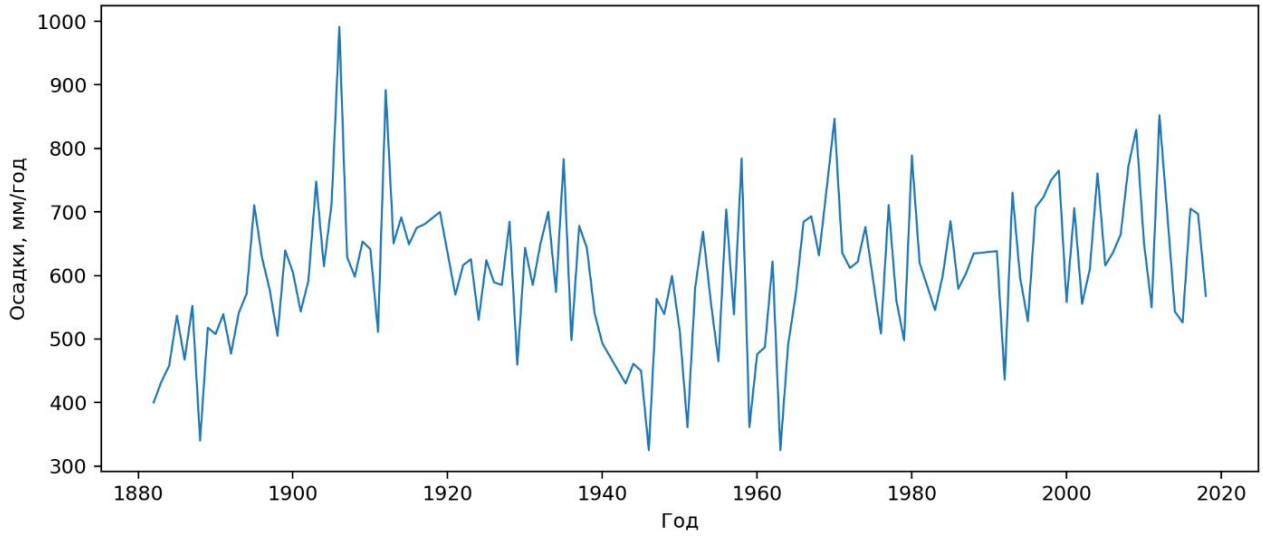


Рисунок 5 – Годовая сумма атмосферных осадков (Василевичи), мм

Таблица 3 дает достаточно полное представление как о фенологии весеннего половодья, так и о фоновых климатических условиях, на которых это половодье формируется. Здесь показаны не только средние значения, медиана, а также нижние и верхние процентили (P10 и P90). Благодаря этому можно судить не просто о типичном гидролого-климатическом режиме, а о его устойчивости и межгодовой изменчивости.

Таблица 3 – Основные статистики по фенологии половодья и климатическим показателям

Показатель	Среднее	Медиана	P10	P90
Начало половодья (DOY), дней	68,4	69,0	44,9	88,1
Длительность половодья (dur), сут	111,5	110,0	87,0	136,3
Окончание половодья (DOY), дней	178,8	180,0	154,8	205,0
Среднегодовая температура (T), °C	6,6	6,5	5,4	7,8
Годовая сумма атмосферных осадков, мм	604,0	604,0	464,6	738,5
Климатический водный баланс (P−PET), мм	8,0	15,0	–117,0	151,9

Таблица 3 показывает, что фенология весеннего половодья характеризуется сравнительно устойчивыми средними сроками начала (68,4 дня с начала года) и окончания (178,8 дней с начала года), а также значительной средней продолжительностью (111,5 суток). Близость средних и медианных значений по всем показателям свидетельствует об отсутствии выраженной асимметрии распределений и позволяет рассматривать указанные параметры как репрезентативные для исследуемого ряда. Вместе с тем широкий диапазон между P10 и P90 указывает на существенную межгодовую изменчивость сроков и длительности половодья. Климатический фон территории характеризуется среднегодовой температурой 6,6 °C и годовой суммой осадков около 604 мм, однако наиболее показателен климатический водный баланс, среднее значение которого близко к нулю. Это отражает пограничный характер влагообеспеченности территории, при котором даже умеренные колебания температуры и осадков способны смещать систему от избыточного увлажнения к выраженному дефициту влаги.

Тренды оценены тестом Манна–Кендалла (двусторонний) и наклоном Сенна [27, 28], приведены скорости изменения исследуемых характеристик за десятилетие (таблица 4).

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-190-206

Таблица 4 – Результаты трендового анализа гидролого-климатических характеристик (1882-2018 гг.)

Показатель	Тренд (Sen) за 10 лет	p (MK)
Начало половодья (DOY), день	–1,2	0,001
Длительность половодья (dur), сут	–1,3	0,002
Окончание половодья (DOY), день	–2,6	0,000
Среднегодовая температура (T), °C	0,1	0,000
Годовая сумма атмосферных осадков (P), мм	7,5	0,003
Климатический водный баланс (P−PET), мм	4,1	0,097

Результаты трендового анализа показывают статистически значимую перестройку фенологии весеннего половодья. Начало половодья смещается на более ранние сроки со скоростью 1,2 дня за 10 лет, а его окончание – на 2,6 дня за 10 лет, что обусловливает сокращение общей продолжительности половодья примерно на 1,3 суток за десятилетие. Одновременно выявлен достоверный рост среднегодовой температуры воздуха (0,1 °C/10 лет) и годовой суммы осадков (7,5 мм/10 лет). При этом климатический водный баланс обнаруживает лишь слабую положительную тенденцию, статистически незначимую на уровне $p < 0,05$. Это свидетельствует о том, что повышение температуры, несмотря на некоторый рост осадков, остается ведущим фактором трансформации гидрологического режима, способствуя более раннему и более короткому прохождению весеннего половодья.

Корреляционный анализ Спирмена [45] приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Корреляционный анализ Спирмена [45]

Соотношение	Коэффициент корреляции Спирмена (ρ)	Уровень статистической значимости связи (p)
DOY начала / Зимняя температура воздуха (T)	–0,44	0,000
DOY начала / Весенняя температура воздуха (T)	–0,62	0,000
DOY начала / Сумма атмосферных осадков зимой (P)	–0,07	0,422

Корреляционный анализ Спирмена показал, что дата начала весеннего половодья статистически значимо связана с температурными условиями зимы и особенно весны. Наиболее тесная обратная связь выявлена с весенней температурой марта – мая ($\rho = -0,62$; $p < 0,001$), что указывает на более раннее начало половодья в теплую весну. Связь с зимней температурой также значима, но менее выражена ($\rho = -0,44$, $p < 0,001$). В то же время зависимость между датой начала половодья и зимними осадками статистически незначимая ($\rho = -0,07$, $p = 0,422$). Это свидетельствует о том, что сроки начала половодья определяются прежде всего термическими условиями, тогда как вклад зимних осадков в смещение даты его начала в данном случае не выявлен.

Дополнительно построена диаграмма рассеяния DOY начала половодья и средней температуры марта–мая (рисунок 6).

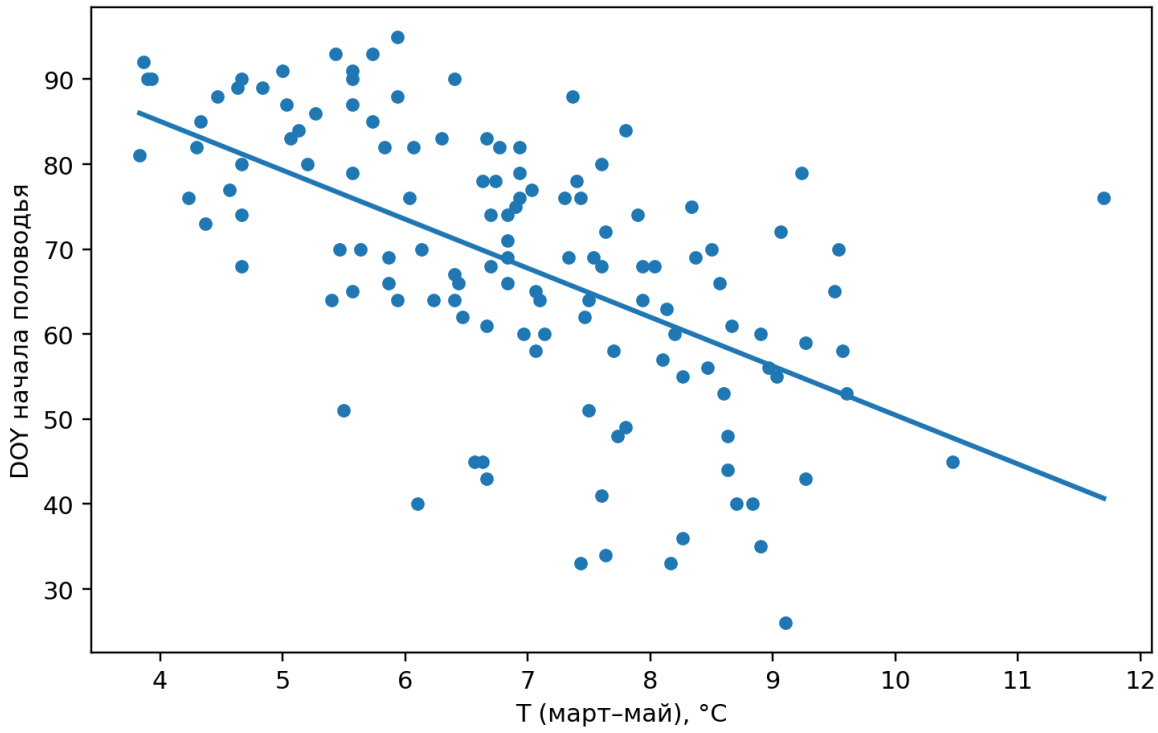


Рисунок 6 – Связь начала половодья с температурой весны (март – май)

Рисунок 6 демонстрирует выраженную обратную зависимость между средней температурой весны (март – май) и датой начала половодья. С увеличением весенней температуры начало половодья смещается на более ранние сроки. Несмотря на заметное рассеяние точек, отражающее влияние сопутствующих факторов, общая направленность зависимости является устойчивой и согласуется с результатами корреляционного анализа.

Для оценки внутрисезонных переходов рассчитаны SPI-3 (по осадкам) и SPEI-3 (по климатическому водному балансу P−PET) с ранговой стандартизацией внутри каждого календарного месяца

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-190-206

окончания 3-месячного периода. Рассматривались периоды (май–июль) и (июль–сентябрь). Определение событий резкого перехода выполнено в климатической постановке: «весеннее половодье→засуха»: SPI-3 ≥ 0,8 и SPEI-3 ≤ −0,8; «засуха→дождевой паводок»: SPEI-3 ≤ −0,8 и SPI-3 ≥ 0,8. Частоты сведены по 30-летним периодам (рисунок 7).

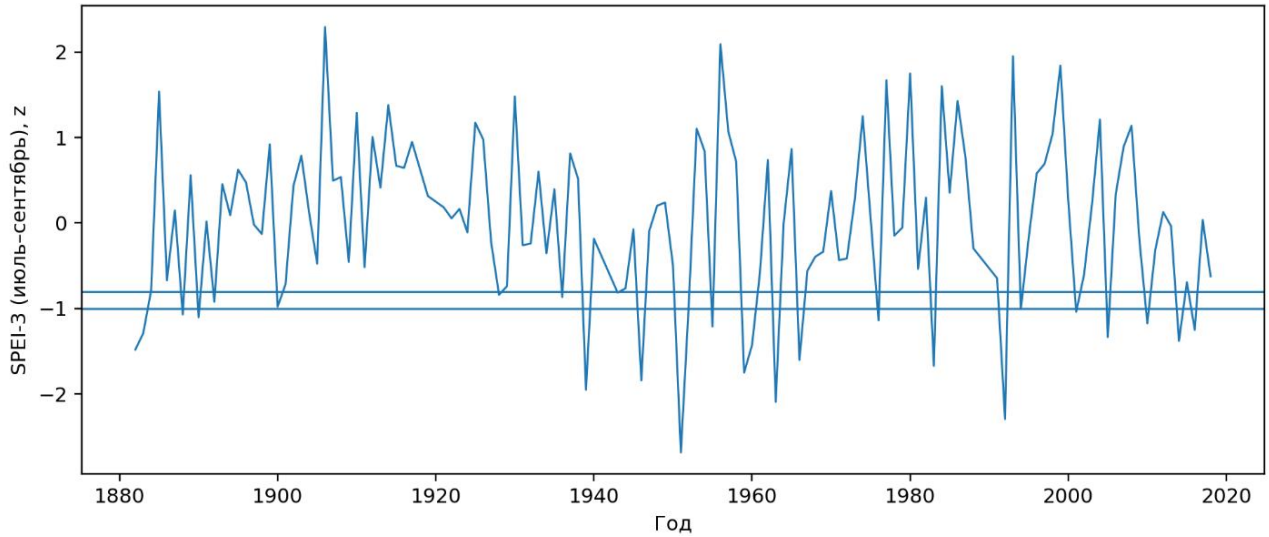


Рисунок 7 – SPEI-3: летне-осенний влагодефицит (пороговые линии −1,0 и −0,8)

Рисунок 7 отражает многолетнюю изменчивость индекса SPEI-3, характеризующего влагообеспеченность в летне-осенний период. Поскольку SPEI учитывает не только осадки, но и потенциальную испаряемость, этот показатель особенно информативен для оценки именно влагодефицита в условиях потепления.

По рисунку 7 можно заключить, что летне-осенняя влагообеспеченность отличается высокой нестабильностью, а эпизоды дефицита влаги являются не исключением, а регулярным элементом многолетней динамики. Это создает климатическую основу для сценариев, в которых после относительно влажных условий может быстро наступать дефицит влаги, и наоборот.

Рисунок 8 развивает этот вывод и показывает уже не сами значения индекса, а частоту резких переходов по 30-летним интервалам. Здесь сопоставляются два типа переходов: синий фоном показано – «весеннее половодье →засуха», то есть переход от влажных условий к сухим; оранжевым – «засуха →дождевой паводок», то есть переход от сухих условий к влажным.

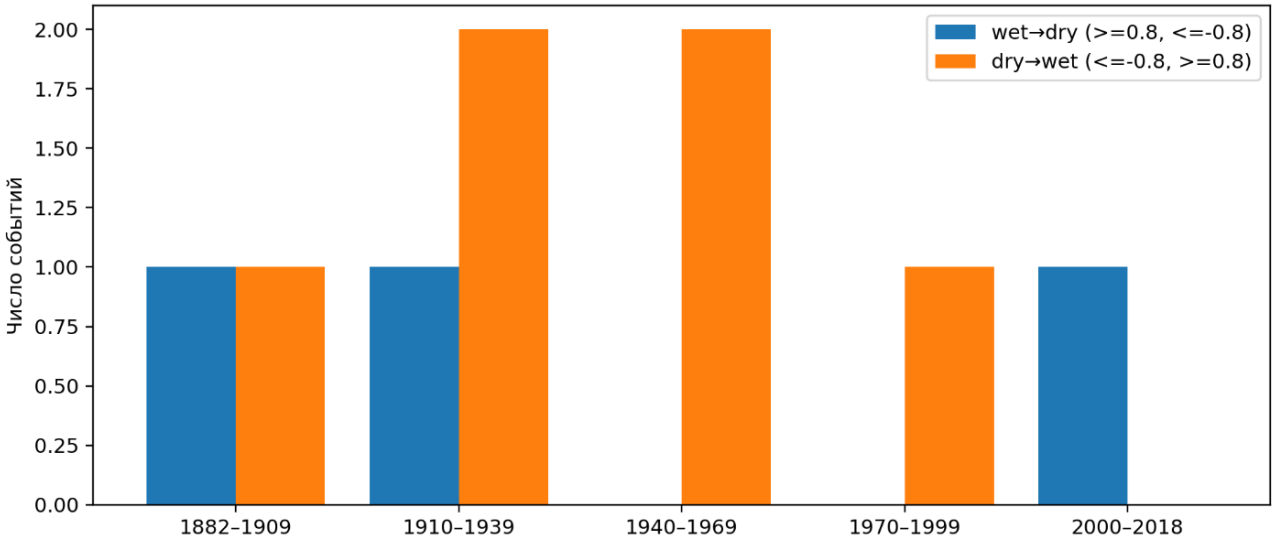


Рисунок 8 – Частота «весеннее половодье →засуха» и «засуха →дождевой паводок» переходов по 30-летиям

Такие переходы наблюдаются во всех или почти во всех анализируемых 30-летиях, однако их частота невелика. Это означает, что речь идет не о регулярном ежегодном явлении, а о сравнительно редких, но климатически значимых событиях. Именно поэтому каждый такой эпизод может рассматриваться как экстремальное проявление нестабильности гидролого-климатического режима.

Тест Петтитта [29] выявил статистически значимую смену гидрологического режима в 1991 году (p = 0,0016) в ряду DOY начала половодья. Это означает скачкообразную перестройку сезонности: половодье стало наступать раньше. Раннее начало увеличивает продолжительность высокой PET в конце весны/начале лета и тем самым повышает вероятность быстрого перехода «весеннее половодье →засуха».

В таблице 6 приведены результаты трендового анализа по методу Манна – Кендалла и наклону Сенна [27, 28], при этом использованы гидролого-климатические данные за период 1960–2025 гг., в том числе данные атмосферных осадков (P) и температур воздуха (T) в суточном разрезе.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-190-206

Таблица 6 – Результаты трендового анализа гидролого-климатических характеристик (1960–2025 гг.)

Показатель	Тренд (Sen) за 10 лет	p (MK)
Среднегодовой расход воды (Q), м³/с	–1,6	0,906
Максимальный расход воды (Qmax), м³/с	–117,3	0,018
Минимальный летний расход воды (Qmin л), м³/с	–1,9	0,650
Минимальный зимний расход воды (Qmin з), м³/с	15,4	0,010
Дата начала весеннего половодья (doy_star), день	–4,7	0,001
Длительность половодья (dur), сут	–1,4	0,302
Дата окончания половодья (doy_end), день	–6,2	0,000
Годовая сумма атмосферных осадков (P), мм	8,4	0,252
Среднегодовая температура воздуха (T), °C	0,4	0,000
Годовой климатический водный баланс (P−PET), мм	–1,6	0,857
Максимальная сумма атмосферных осадков за 1 сутки, мм	1,2	0,104
Максимальная сумма атмосферных осадков за 5 последовательных суток, мм	0,2	0,896
Максимальная продолжительность сухого периода, сут	–0,8	0,114
Число дней за период с осадками не менее 10 мм в сутки	0,5	0,058
12-месячный стандартизированный индекс, рассчитанный на декабрь (SPEI12)	–0,02	0,857

Результаты трендового анализа показывают, что наиболее выраженные и статистически значимые изменения относятся к фенологии весеннего половодья и температурному режиму. Начало половодья смещается на более ранние сроки со скоростью 4,7 дня за 10 лет ($p = 0,001$), а его окончание — на 6,5 дня за 10 лет ($p < 0,001$). Одновременно выявлено значимое снижение максимального стока (Qmax) и рост зимнего минимального стока (Qmin з), что указывает на перестройку сезонной структуры речного режима. Среднегодовая температура воздуха достоверно повышается на 0,4 °C за десятилетие ($p < 0,001$), тогда как для годовой суммы осадков, климатического водного баланса и большинства индексов экстремальных осадков статистически значимых трендов не установлено. Это свидетельствует о том, что ключевым фактором наблюдаемых изменений выступает потепление, приводящее прежде всего к временной и сезонной трансформации гидрологических процессов.

Корреляции Спирмена [45] представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Корреляционный анализ Спирмена [45]

Соотношение	Коэффициент корреляции Спирмена (ρ)	Уровень статистической значимости связи (p)
DOY начала / Зимняя температура воздуха (T)	–0,65	0,000
DOY начала / Весенняя температура воздуха (T)	–0,59	0,000
DOY начала / Сумма атмосферных осадков зимой (P)	–0,10	0,471
DOY начала / Сумма атмосферных осадков весной (P)	–0,50	0,720
dur / Весенняя температура воздуха (T)	0,22	0,102
dur / Сумма атмосферных осадков весной (P)	0,12	0,382
Qmax / Весенняя температура воздуха (T)	–0,18	0,169
Qmax / Сумма атмосферных осадков зимой (P)	0,31	0,015
Qmin л / SPEI12	0,58	0,000
Среднегодовой расход воды (Q) / Годовая сумма атмосферных осадков (P)	0,33	0,010

Корреляционный анализ Спирмена показал, что дата начала весеннего половодья тесно связана с температурными условиями зимы и весны ($\rho = -0,65$ и $-0,59$ при $p < 0,001$), тогда как влияние зимних и весенних осадков на сроки его начала статистически не подтверждается. Максимальный расход воды обнаруживает значимую положительную связь с зимними осадками ($\rho = 0,31$; $p = 0,015$), что указывает на роль снегозапасов в формировании пика половодья. Минимальный летний сток тесно коррелирует с интегральным индексом увлажнения SPEI-12 ($\rho = 0,58$; $p < 0,001$), а средний расход воды – с годовой суммой осадков ($\rho = 0,33$; $p = 0,010$). Это свидетельствует о дифференцированном влиянии климатических факторов на различные характеристики речного режима.

Для суточной диагностики рассчитан 30-дневный скользящий водный баланс $D30 = \Sigma(P - PET_day)$ и непараметрический индекс SPEI30 (стандартизация внутри дня года). Начало засухи фиксировалось как первая дата после окончания половодья, когда $SPEI30 \le -1,0$ (умеренная/сильная засуха), а также отдельно порог $SPEI30 \le -1,5$ (сильная засуха). Лаг (дни) – разность между датой начала засухи и датой окончания половодья. Таблица 8 сопоставляет характеристики перехода «весеннее половодье →засуха» по двум периодам – до 1991 г. и после 1991 г. – и позволяет оценить, насколько быстро после окончания половодья система достигает порога засухи по SPEI30.

Таблица 8 показывает, что после 1991 г. переход от влажного состояния к засухе в целом ускорился. Средний лаг между окончанием половодья и достижением порога засухи снизился с 53,2 до 47,6 дня, медианный – с 42 до 38 дней. При этом верхний процентиль сократился с 118,6 до 102 дней, что указывает на уменьшение доли наиболее затянутых переходов. Хотя доля очень быстрых переходов (≤ 30 дней) несколько ниже, после 1991 г. возрастает доля переходов в пределах 60 дней (с 0,70 до 0,79), что свидетельствует о большей типичности сравнительно быстрого сезонного перехода к влагодефициту. В целом это согласуется с гипотезой о том, что в современных условиях более раннее окончание половодья и усиление испарительной способности атмосферы интенсифицирует ускоренное развитие летней засухи.

На рисунке 9 показано распределение лага «весеннее половодье →засуха» ($SPEI30 \le -1$).

Таблица 8 – Лаг «весеннее половодье →засуха» по периодам

Период	Число переходов n	lag_среднее	lag_медиана	lag_p10	lag_p90	Доля переходов с лагом ≤30 дней	Доля переходов с лагом ≤60 дней
1991+	19	47,6	38	1	102	0,32	0,79
до 1991	27	53,2	42	1	118,6	0,41	0,70

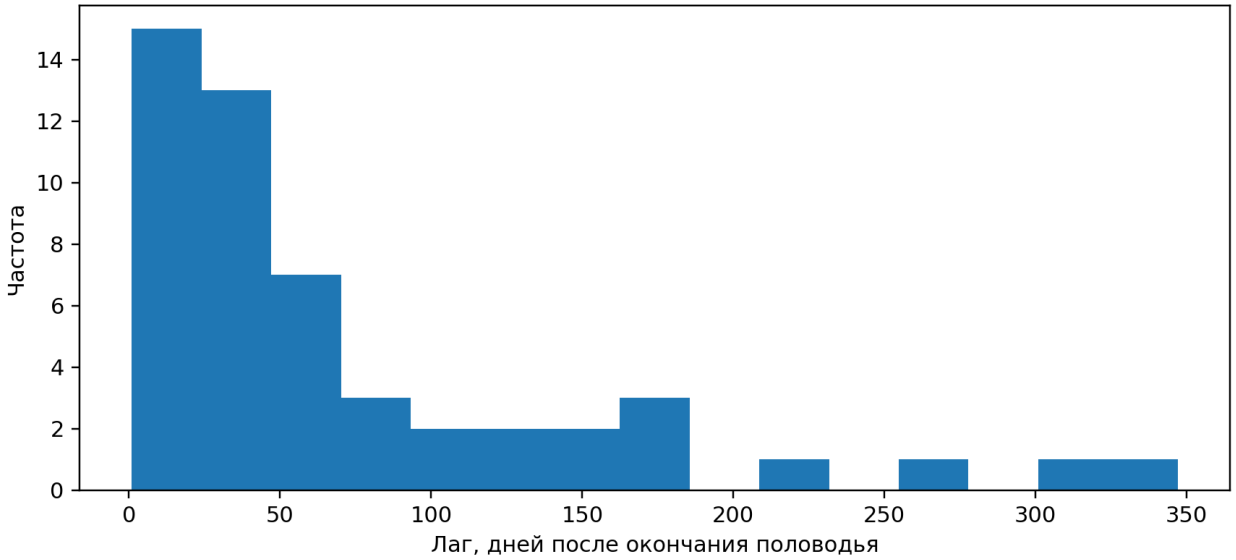


Рисунок 9 – Распределение lag_wd (SPEI30 ≤ −1)

Распределение имеет выраженную правостороннюю асимметрию: основная масса наблюдений сосредоточена в области малых и умеренных лагов, тогда как отдельные годы формируют длинный правый хвост.

На рисунке 10 представлена связь между величиной максимального расхода воды весеннего половодья (Qmax) и лагом до наступления засухи.

При более высоких значениях Qmax переход к засушливым условиям в среднем происходит быстрее. Это указывает на то, что мощное половодье не обязательно обеспечивает длительное сохранение влагозапасов, а в ряде случаев сопровождается быстрым транзитом воды по русловой сети. Вместе с тем значительное рассеяние точек показывает, что скорость перехода к засухе определяется также совокупностью постполоводных климатических и гидрологических условий, прежде всего атмосферными осадками, испаряемостью и особенностями водоудержания территории.

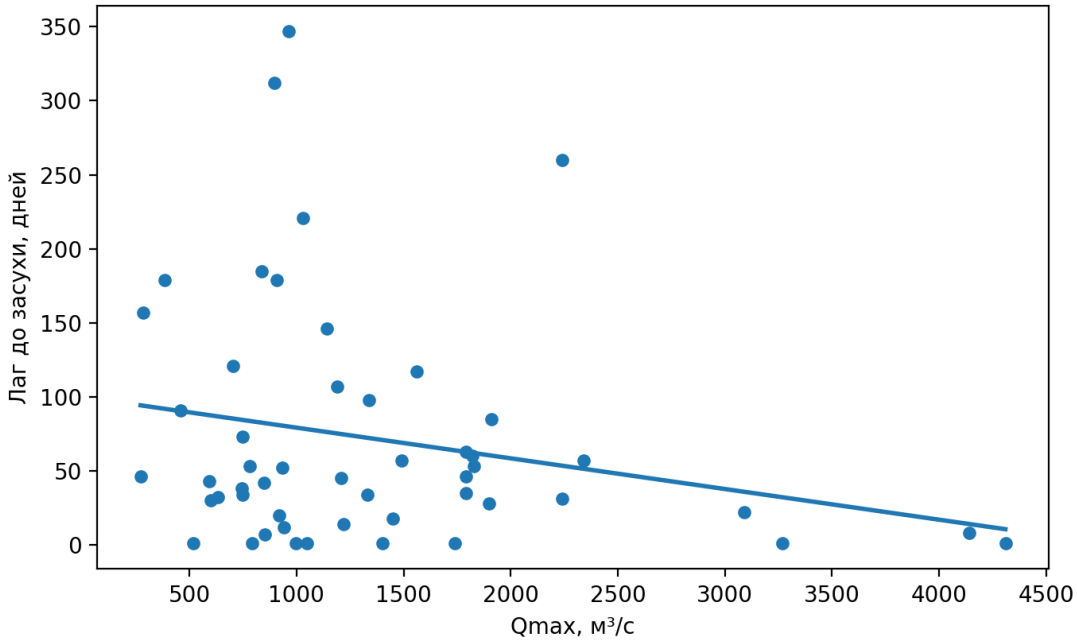


Рисунок 10 – Связь лага до наступления засухи с величиной Qmax

Таблица 9 показывает, как менялись характеристики перехода «весеннее половодье →засуха» по десятилетиям, то есть насколько быстро после окончания половодья система достигала засушливого порога. В ней приведены число переходов (n), медианный лаг перехода, а также доли быстрых переходов – в пределах 30 дней (fast30) и 60 дней (fast60). Это позволяет оценить не только среднюю скорость перехода к засухе, но и ее изменчивость во времени.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-190-206

Таблица 9 – Лаг «весеннее половодье →засуха» по десятилетиям

Десятилетие	Число переходов n	lag_медиана	Доля переходов с лагом ≤30 дней	Доля переходов с лагом ≤60 дней
1960-1969	10	28	0,50	0,70
1970-1979	9	31	0,44	0,78
1980-1989	8	49	0,25	0,62
1990-1999	7	46	0,14	0,71
2000-2009	8	27	0,50	0,88
2010-2018	4	37,5	0,25	0,75

Таблица 9 показывает, что скорость перехода «весеннее половодье →засуха» существенно варьирует по десятилетиям и не демонстрирует монотонного тренда. В 1960–1970-е гг. быстрые переходы были достаточно характерны (медианный лаг 28–31 день; доля fast60 0,70–0,78), тогда как в 1980–1990-е гг. наблюдалось их ослабление, выраженное в увеличении медианного лага до 46–49 дней и снижении доли переходов fast30 до 0,14–0,25. В 2000-е гг. отмечено повторное усиление быстрых переходов: медианный лаг сократился до 27 дней, а доля переходов в пределах 60 дней достигла 0,88. Это указывает на выраженную десятилетнюю изменчивость режима перехода от весеннего увлажнения к засушливым условиям и позволяет предполагать чередование фаз ускоренного и замедленного сезонного иссушения.

Таблица 10 содержит 15 самых быстрых переходов «весеннее половодье →засуха» и показывает, через сколько дней после окончания половодья достигался порог засухи по двум уровням: SPEI30 ≤ −1 и SPEI30 ≤ −1,5. По сути, это выборка наиболее показательных лет, когда переход от весеннего избытка воды к засушливому состоянию происходил особенно быстро.

В ряде случаев порог SPEI30 ≤ −1 достигался практически сразу после окончания половодья (лаг 1 день). Значения лага, равные 1 дню, указывают не на мгновенное формирование засухи после половодья, а на то, что к моменту завершения половодной фазы 30-дневный водный баланс уже был близок или соответствовал засушливому состоянию. Это отражает крайне резкий переход «весеннее половодье →засуха» и свидетельствует о наложении раннего окончания половодья на уже развивающийся влагодефицит Вместе с тем лаг до более жесткого порога SPEI30 ≤ −1,5 варьирует значительно сильнее: в одних годах сильная засуха также наступала почти сразу, в других – лишь спустя десятки и даже сотни дней, а в отдельных случаях не достигалась вовсе. Это показывает, что быстрый переход к умеренному влагодефициту не всегда сопровождается столь же быстрым развитием сильной засухи.

Переход «засуха →дождевой паводок» анализировался как последовательность: засушливая серия (SPEI30 ≤ −1, ≥ 20 суток) → первый экстремальный дождь P ≥ P95 в течение 90 суток. Такой критерий описывает повышение риска дождевых паводков и эрозионных эффектов после засухи.

В работе получены следующие пороги сильных ливней: P95 = 12,1 мм/сут и P99 = 25,0 мм/сут.

Таблица 10 – Топ-15 самых быстрых переходов «весеннее половодье →засуха» (SPEI30 ≤ −1), дней

Год	lag_days_-1	lag_days_-1.5
1960	1	4
1963	1	1
1964	1	1
1979	1	100
1986	1	1
2018	1	1
2007	1	–
1999	1	292
1973	7	205
1970	8	–
1961	12	95
2000	14	128
2006	18	22
2002	20	30
1966	22	119

Таблица 11 сопоставляет характеристики переходов «засуха →дождевой паводок» по двум периодам – до 1991 года и после 1991 года. В таблице приведены число событий, медианный и средний лаг, нижний и верхний процентили распределения лага, а также медианная величина осадков в день события.

После 1991 г. переход от засушливых условий к первому экстремальному дождю уровня P ≥ P95 в целом ускорился. Средний лаг «засуха →дождевой паводок» сократился с 18,8 до 8,8 дня, а верхний процентиль распределения уменьшился с 52,0 до 28,8 дня, что указывает на сокращение числа длинных переходов. При этом медианная величина атмосферных осадков возросла с 14,8 до 19 мм. Следовательно, в современный период переходы «засуха →дождевой паводок» становятся не только более быстрыми, но и более интенсивными по осадкам, что свидетельствует об усилении гидролого-климатической контрастности и повышении вероятности резкой смены засушливых условий экстремальными дождями.

Таблица 12 показывает, как менялись характеристики перехода «засуха →дождевой паводок» по десятилетиям.

Таблица 11 – Переход «засуха →дождевой паводок» по периодам

Период	Число переходов n	lag_медиана	lag_среднее	lag_p10	lag_p90	_P95_медиана
1991+	19	2	8,8	1	28,8	19,0
до 1991	16	1	18,8	1	52,0	14,8

Таблица 12 – Лаг «засуха →дождевой паводок» по десятилетиям

Десятилетие	Число переходов n	lag_медиана	lag_p10	lag_p90
1960–1969	7	16,0	1,0	63,6
1970–1979	5	1,0	1,0	49,6
1980–1989	4	1,0	1,0	1,0
1990–1999	3	4,0	1,6	12,8
2000–2009	4	15,5	1,6	42,0
2010–2019	7	1,0	1,0	14,6
2020–2025	5	1,0	1,0	12,8

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-190-206

Переходы «засуха →дождевой паводок» по десятилетиям характеризуются высокой изменчивостью, однако в большинстве интервалов медианный лаг остается достаточно малым.

Ниже представлен интегральный рисунок 11, построенный по реальным данным наблюдений: окончание половодья; начало засухи по SPEI30≤−1; первый экстремальный дождь P≥P95 в течение 90 суток после засухи. Длины участков на схеме соответствуют медианным лагам по совокупности лет 1960–2025.

Рисунок 11 демонстрирует, что в исследуемом бассейне Припяти типичная последовательность «весеннее половодье → засуха → экстремальный дождь» реализуется в сравнительно короткие сроки. Медианный лаг от окончания половодья до начала засухи составляет около 40 дней, а от начала засухи до первого экстремального дождя – около 18 дней. Это свидетельствует о высокой гидролого-климатической контрастности режима и способности системы к быстрому переходу от избыточного увлажнения к дефициту влаги, а затем к интенсивным осадкам.

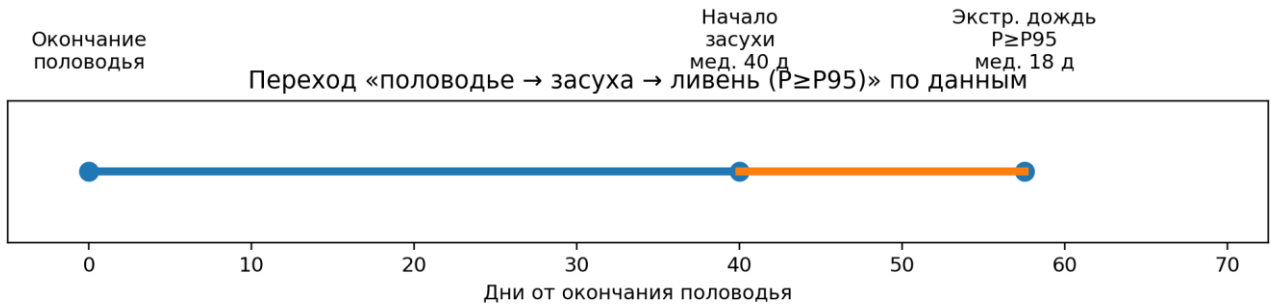


Рисунок 11 – Схема перехода «половодье → засуха → ливень (P ≥ P95)» (медианные лаги)

Заключение

Проведенное исследование подтвердило, что для Белорусского Полесья характерна выраженная тенденция к усилению гидролого-климатической контрастности, проявляющейся в ускорении и усложнении последовательных переходов в системе «весеннее половодье – засуха – дождевой паводок». Установлено, что весеннее половодье в бассейне Припяти смещается на более ранние сроки и завершается быстрее, что связано прежде всего с устойчивым ростом температуры воздуха и перестройкой сезонного теплового режима. При этом увеличение атмосферных осадков не компенсирует влияние потепления, поскольку водный баланс остается неустойчивым, а избыток влаги после половодья довольно часто не аккумулируется в ландшафте, а быстро уменьшается за счет руслового стока, дренированности территории и роста потенциальной испаряемости. В результате после окончания половодья засушливые условия во многих случаях формируются уже в пределах 1–2 месяцев, а после 1991 г. такие переходы становятся в целом более быстрыми и более типичными. Одновременно показано, что переходы от засухи к экстремальным осадкам также ускоряются. В современный период первый дождь уровня P ≥ P95 после засушливой серии наступает в среднем быстрее и характеризуется большей интенсивностью.

Практическая значимость работы состоит в том, что выявленные закономерности позволяют по-новому рассматривать риски опасных гидрометеорологических явлений, не отдельно взятые весенние половодья, засухи или дождевые паводки, а как взаимосвязанные последовательные события. Это особенно важно для управления водным режимом мелиорированных земель, эксплуатации водохозяйственных систем и гидротехнических сооружений, предупреждения сельскохозяйственных рисков, пожароопасных ситуаций, эрозионных процессов и локальных подтоплений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Республики Беларусь и при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Х25КИ-036 от 06.02.2025).

Список цитированных источников

1. Hydroclimate volatility on a warming Earth / D. L. Swain, A. F. Prein, J. T. Abatzoglou [et al.] // Nature Reviews Earth & Environment. – 2025. – Vol. 6, No. 1. – P. 35–50. – DOI: 10.1038/s43017-024-00624-z.
2. World Meteorological Organization. 2023 State of Global Water Resources Report. – Geneva : WMO, 2024. – URL: https://wmo.int/sites/default/files/2024-11/2024_State_of_Global_Water_Resources.pdf (date of access: 22.02.2026).
3. What is a drought-to-flood transition? Pitfalls and recommendations for defining consecutive hydrological extreme events / B. J. Anderson, E. Muñoz-Castro, L. M. Tallaksen [et al.] // Hydrology and Earth System Sciences. – 2025. – Vol. 29. – P. 6069–6092. – DOI: 10.5194/hess-29-6069-2025.
4. Challenges in modeling and predicting floods and droughts: a review / M. I. Brunner, L. Slater, L. M. Tallaksen, M. Clark // WIREs Water. – 2021. – Vol. 8. – Art. e1520. – DOI: 10.1002/wat2.1520.
5. European Environment Agency. European Climate Risk Assessment: Executive summary. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2024. – 36 p. – DOI: 10.2800/204249.
6. Copernicus Climate Change Service. European State of the Climate 2024. – 2025. – URL: https://climate.copernicus.eu/esotc/2024 (date of access: 22.02.2026).
7. World Meteorological Organization. European State of the Climate: extreme events in warmest year on record // WMO Media Centre. – 15 Apr. 2025. – URL: https://wmo.int/news/media-centre/european-state-of-climate-extreme-events-warmest-year-record (date of access: 22.02.2026).
8. Global increases in dry-wet abrupt alternation events under climate change / N. He, J. Yin, P. Liu [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2025. – Vol. 52, No. 18. – DOI: 10.1029/2025GL117322.
9. Bridging rarity of drought-flood abrupt alternation events with reverse distributions or reverse copulas / J. Yan, T. Zheng, J. Zhao, J. Luo // Water Research. – 2025. – Vol. 287, pt. B. – Art. 124433. – DOI: 10.1016/j.watres.2025.124433.
10. Yin, J. Understanding heatwave-drought compound hazards and impacts on socio-ecosystems / J. Yin, L. Slater // The Innovation Geoscience. – 2023. – Vol. 1, No. 3. – Art. 100042. – DOI: 10.59717/j.xinn-geo.2023.100042.
11. Полесья Восточно-Европейской равнины : монография / Ю. А. Мажайский, А. А. Волчек, Д. А. Иванов, О. П. Мешик. – Брест : БрГТУ, 2024. – 216 с.
12. Floods on the territory of Polesie / A. A. Volchak, A. P. Meshyk, M. M. Sheshka, I. V. Bulskaya // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 162. – P. 91–97. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.020.
13. Modern trends in river discharge variability in the Pripyat basin and their forcasted assessments / A. A. Volchak, A. P. Meshyk, S. I. Parfamuk [et al.] // Vestnik of Brest State Technical University. – 2025. – № 3 (138). – P. 141–158. – DOI: 10.36773/1818-1112-2025-138-3-141-158.
14. Environmental Risks of Water Resources in the Belarusian Polesie / I. Kirvel, A. Volchak, S. Parfomuk, P. Kirvel // Limnological Review. – 2023. – Vol. 23, No. 1. – P. 21–32. – DOI: 10.3390/limnolrev23010002.
15. Environmental Risks of the Pripyat River in a Changing Climate / A. Volchak, A. Meshyk, Yu. Mazhayskiy, A. Rokochynskiy, J. Jeznach // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 212. – Art. 01015. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021201015.

16. Landscape fires disproportionally affect high conservation value temperate peatlands, meadows, and deciduous forests, but only under low moisture conditions / M. Kirkland, P. W. Atkinson, J. W. Pearce-Higgins [et al.] // Science of the Total Environment. – 2023. – Vol. 884. – Art. 163849. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163849.
17. World Bank. Strengthening Hydromet and Early Warning Services in Belarus: A Road Map. – Washington, DC : World Bank, 2020. – URL: https://documents1.worldbank.org/curated/en/839291594879784721/pdf/Strengthening-Hydromet-and-Early-Warning-Services-in-Belarus-A-Road-Map.pdf (date of access: 01.03.2026).
18. Kendall, M. G. Rank correlation methods / M. G. Kendall. – 4th ed. – London : Griffin, 1975. – 202 p.
19. Золотокрылин, А. Н. Биоклиматическая субгумиданая зона на равнинах России: засухи, опустынивание/деградация / А. Н. Золотокрылин, Е. А. Черенкова, Т. Б. Титкова // Аридные экосистемы. – 2018. – Т. 24, № 1(74). – С. 13–19.
20. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements / R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. – Rome : FAO, 1998. – (FAO Irrigation and Drainage Paper ; 56).
21. Thornthwaite, C. W. An approach toward a rational classification of climate / C. W. Thornthwaite // Geographical Review. – 1948. – Vol. 38, No. 1. – P. 55–94. – DOI: 10.2307/210739.
22. McKee, T. B. The relationship of drought frequency and duration to time scales / T. B. McKee, N. J. Doesken, J. Kleist // Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. – Anaheim, CA : American Meteorological Society, 1993. – P. 179–184.
23. Vicente-Serrano, S. M. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) / S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J. I. López-Moreno // Journal of Climate. – 2010. – Vol. 23, No. 7. – P. 1696–1718. – DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
24. Мешик, О. П. Методологические подходы к оценке засух и засушливых явлений / О. П. Мешик, М. В. Борушко // Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти члена-корр. РАСХН и НАНКР, академика МАЭП и РАВН Я. В. Бочкарева. – Рязань : РГАТУ, 2024. – С. 59–65.
25. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset / M. G. Donat, L. V. Alexander, H. Yang [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2013. – Vol. 118. – P. 2098–2118. – DOI: 10.1002/jgrd.50150.
26. Westra, S. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall / S. Westra, H. J. Fowler, J. P. Evans [et al.] // Reviews of Geophysics. – 2014. – Vol. 52, No. 3. – P. 522–555. – DOI: 10.1002/2014RG000464.
27. Mann, H. B. Nonparametric tests against trend / H. B. Mann // Econometrica. – 1945. – Vol. 13, No. 3. – P. 245–259. – DOI: 10.2307/1907187.
28. Sen, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau / P. K. Sen // Journal of the American Statistical Association. – 1968. – Vol. 63, No. 324. – P. 1379–1389. – DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
29. Pettitt, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem / A. N. Pettitt // Applied Statistics. – 1979. – Vol. 28, No. 2. – P. 126–135. – DOI: 10.2307/2346729.
30. Атлас опасных метеорологических явлений на территории Беларуси : учеб. пособие / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, В. Е. Валуев [и др.]. – М. : Мещерский филиал ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова, 2016. – 58 с.
31. Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. С. Хомич [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 515–527. – DOI: 10.31857/S2587556621040063.
32. Маккавеев, Н. И. Русло реки и эрозия в её бассейне / Н. И. Маккавеев ; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – Переизд. кн. 1955 г. – М. : Геогр. фак. МГУ, 2003. – 353 с.
33. Beven, K. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / K. J. Beven, M. J. Kirkby // Hydrological Sciences Bulletin. – 1979. – Vol. 24, No. 1. – P. 43–69. – DOI: 10.1080/02626667909491834.
34. McDonnell, J. J. Are all runoff processes the same? / J. J. McDonnell // Hydrological Processes. – 2013. – Vol. 27, No. 26. – P. 4103–4111. – DOI: 10.1002/hyp.10076.
35. Мешик, О. П. Роль снежного покрова в формировании весеннего половодья на реках Беларуси / О. П. Мешик, В. А. Морозова, М. В. Борушко // Мелиорация. – 2020. – № 4(94). – С. 35–40.
36. Anderson, E. A. A point energy and mass balance model of a snow cover / E. A. Anderson. – Silver Spring, MD : National Weather Service, Office of Hydrology, 1976. – 150 p.
37. McCabe, G. J. Rain-on-snow events in the western United States / G. J. McCabe, M. P. Clark, L. E. Hay // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2007. – Vol. 88, No. 3. – P. 319–328. – DOI: 10.1175/BAMS-88-3-319.
38. Palmer, W. C. Meteorological drought / W. C. Palmer. – Washington, DC : U.S. Weather Bureau, 1965. – 58 p.
39. Seneviratne, S. I. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: a review / S. I. Seneviratne, T. Corti, E. L. Davin [et al.] // Earth-Science Reviews. – 2010. – Vol. 99, No. 3–4. – P. 125–161. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
40. Куксина, Л. В. Причины возникновения и география внезапных ливневых паводков / Л. В. Куксина, В. Н. Голосов, Е. В. Промахова // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2020. – № 1. – С. 11–22.
41. Shakesby, R. A. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent / R. A. Shakesby, S. H. Doerr // Earth-Science Reviews. – 2006. – Vol. 74, No. 3–4. – P. 269–307. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2005.10.006.
42. Стохастические факторы формирования внезапных ливневых паводков на Черноморском побережье Западного Кавказа и Крыма / Л. В. Куксина, П. А. Белякова, В. Н. Голосов [и др.] // Известия Русского географического общества. – 2023. – Т. 155, № 2. – С. 3–24. – DOI: 10.31857/S0869607123020064.
43. Barendrecht, M. H. Exploring drought-to-flood interactions and dynamics: A global case review / M. H. Barendrecht, A. Matanó, H. Mendoza [et al.] // WIREs Water. – 2024. – Vol. 11, No. 4. – Art. e1726. – DOI: 10.1002/wat2.1726.
44. The need to integrate flood and drought disaster risk reduction strategies / P. J. Ward, M. C. Ruiter, J. Mård [et al.] // Water Security. – 2020. – Vol. 11. – Art. 100070. – DOI: 10.1016/j.wasec.2020.100070.
45. Pirie, W. Spearman rank correlation: introduction / W. Pirie // Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. – 2014. – URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118445112.stat02773 (date of access: 01.03.2026).

References

1. Hydroclimate volatility on a warming Earth / D. L. Swain, A. F. Prein, J. T. Abatzoglou [et al.] // Nature Reviews Earth & Environment. – 2025. – Vol. 6, No. 1. – P. 35–50. – DOI: 10.1038/s43017-024-00624-z.
2. World Meteorological Organization. 2023 State of Global Water Resources Report. – Geneva : WMO, 2024. – URL: https://wmo.int/sites/default/files/2024-11/2024_State_of_Global_Water_Resources.pdf (date of access: 22.02.2026).
3. What is a drought-to-flood transition? Pitfalls and recommendations for defining consecutive hydrological extreme events / B. J. Anderson, E. Muñoz-Castro, L. M. Tallaksen [et al.] // Hydrology and Earth System Sciences. – 2025. – Vol. 29. – P. 6069–6092. – DOI: 10.5194/hess-29-6069-2025.
4. Challenges in modeling and predicting floods and droughts: a review / M. I. Brunner, L. Slater, L. M. Tallaksen, M. Clark // WIREs Water. – 2021. – Vol. 8. – Art. e1520. – DOI: 10.1002/wat2.1520.
5. European Environment Agency. European Climate Risk Assessment: Executive summary. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2024. – 36 p. – DOI: 10.2800/204249.
6. Copernicus Climate Change Service. European State of the Climate 2024. – 2025. – URL: https://climate.copernicus.eu/esotc/2024 (date of access: 22.02.2026).
7. World Meteorological Organization. European State of the Climate: extreme events in warmest year on record // WMO Media Centre. – 15 Apr. 2025. – URL: https://wmo.int/news/media-centre/european-state-of-climate-extreme-events-warmest-year-record (date of access: 22.02.2026).
8. Global increases in dry-wet abrupt alternation events under climate change / N. He, J. Yin, P. Liu [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2025. – Vol. 52, No. 18. – DOI: 10.1029/2025GL117322.

9. Bridging rarity of drought-flood abrupt alternation events with reverse distributions or reverse copulas / J. Yan, T. Zheng, J. Zhao, J. Luo // Water Research. – 2025. – Vol. 287, pt. B. – Art. 124433. – DOI: 10.1016/j.watres.2025.124433.
10. Yin, J. Understanding heatwave-drought compound hazards and impacts on socio-ecosystems / J. Yin, L. Slater // The Innovation Geoscience. – 2023. – Vol. 1, No. 3. – Art. 100042. – DOI: 10.59717/j.xinn-geo.2023.100042.
11. Poles'ya Vostochno-Evropejskoj ravniny : monografiya / YU. A. Mazhajskij, A. A. Volchek, D. A. Ivanov, O. P. Meshik. – Brest : BrGTU, 2024. – 216 s.
12. Floods on the territory of Polesie / A. A. Volchak, A. P. Meshyk, M. M. Sheshka, I. V. Bulskaya // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 162. – P. 91–97. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.020.
13. Modern trends in river discharge variability in the Pripyat basin and their forcasted assessments / A. A. Volchak, A. P. Meshyk, S. I. Parfamuk [et al.] // Vestnik of Brest State Technical University. – 2025. – № 3 (138). – S. 141–158. – DOI: 10.36773/1818-1112-2025-138-3-141-158.
14. Environmental Risks of Water Resources in the Belarusian Polesie / I. Kirvel, A. Volchak, S. Parfomuk, P. Kirvel // Limnological Review. – 2023. – Vol. 23, No. 1. – P. 21–32. – DOI: 10.3390/limnolrev23010002.
15. Environmental Risks of the Pripyat River in a Changing Climate / A. Volchak, A. Meshyk, Yu. Mazhayskiy, A. Rokochynskiy, J. Jeznach // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 212. – Art. 01015. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021201015.
16. Landscape fires disproportionally affect high conservation value temperate peatlands, meadows, and deciduous forests, but only under low moisture conditions / M. Kirkland, P. W. Atkinson, J. W. Pearce-Higgins [et al.] // Science of the Total Environment. – 2023. – Vol. 884. – Art. 163849. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163849.
17. World Bank. Strengthening Hydromet and Early Warning Services in Belarus: A Road Map. – Washington, DC : World Bank, 2020. – URL: https://documents1.worldbank.org/curated/en/839291594879784721/pdf/Strengthening-Hydromet-and-Early-Warning-Services-in-Belarus-A-Road-Map.pdf (date of access: 01.03.2026).
18. Kendall, M. G. Rank correlation methods / M. G. Kendall. – 4th ed. – London : Griffin, 1975. – 202 p.
19. Zolotokrylin, A. N. Bioklimaticheskaya subgumidanaya zona na ravninah Rossii: zasuhi, opustynivanie/degradaciya / A. N. Zolotokrylin, E. A. CHerenkova, T. B. Titkova // Aridnye ekosistemy. – 2018. – T. 24, № 1(74). – S. 13–19.
20. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements / R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. – Rome : FAO, 1998. – (FAO Irrigation and Drainage Paper ; 56).
21. Thornthwaite, C. W. An approach toward a rational classification of climate / C. W. Thornthwaite // Geographical Review. – 1948. – Vol. 38, No. 1. – P. 55–94. – DOI: 10.2307/210739.
22. McKee, T. B. The relationship of drought frequency and duration to time scales / T. B. McKee, N. J. Doesken, J. Kleist // Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. – Anaheim, CA : American Meteorological Society, 1993. – P. 179–184.
23. Vicente-Serrano, S. M. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) / S. M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J. I. López-Moreno // Journal of Climate. – 2010. – Vol. 23, No. 7. – P. 1696–1718. – DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
24. Meshik, O. P. Metodologicheskie podhody k ocenke zasuh i zasushlivyh yavlenij / O. P. Meshik, M. V. Borushko // Kompleksnyj podhod k nauchno-tekhnicheskomu obespecheniyu sel'skogo hozyajstva : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. pamyati chlena-korr. RASKHN i NANKR, akademika MAEP i RAVN YA. V. Bochkareva. – Ryazan' : RGATU, 2024. – S. 59–65.
25. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset / M. G. Donat, L. V. Alexander, H. Yang [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2013. – Vol. 118. – P. 2098–2118. – DOI: 10.1002/jgrd.50150.
26. Westra, S. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall / S. Westra, H. J. Fowler, J. P. Evans [et al.] // Reviews of Geophysics. – 2014. – Vol. 52, No. 3. – P. 522–555. – DOI: 10.1002/2014RG000464.
27. Mann, H. B. Nonparametric tests against trend / H. B. Mann // Econometrica. – 1945. – Vol. 13, No. 3. – P. 245–259. – DOI: 10.2307/1907187.
28. Sen, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau / P. K. Sen // Journal of the American Statistical Association. – 1968. – Vol. 63, No. 324. – P. 1379–1389. – DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
29. Pettitt, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem / A. N. Pettitt // Applied Statistics. – 1979. – Vol. 28, No. 2. – P. 126–135. – DOI: 10.2307/2346729.
30. Atlas opasnyh meteorologicheskih yavlenij na territorii Belarusi : ucheb. posobie / V. F. Loginov, A. A. Volchek, V. E. Valuev [i dr.]. – M. : Meshcherskij filial VNIIGiM im. A. N. Kostyakova, 2016. – 58 s.
31. Priznaki aridizacii klimata i ih ekosistemnye proyavleniya na territorii Belarusi / V. F. Loginov, S. A. Lysenko, V. S. Homich [i dr.] // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya. – 2021. – T. 85, № 4. – S. 515–527. – DOI: 10.31857/S2587556621040063.
32. Makkaveev, N. I. Ruslo reki i eroziya v eyo bassejne / N. I. Makkaveev ; Mosk. gos. un-t im. M. V. Lomonosova. – Pereizd. kn. 1955 g. – M. : Geogr. fak. MGU, 2003. – 353 s.
33. Beven, K. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / K. J. Beven, M. J. Kirkby // Hydrological Sciences Bulletin. – 1979. – Vol. 24, No. 1. – P. 43–69. – DOI: 10.1080/02626667909491834.
34. McDonnell, J. J. Are all runoff processes the same? / J. J. McDonnell // Hydrological Processes. – 2013. – Vol. 27, No. 26. – P. 4103–4111. – DOI: 10.1002/hyp.10076.
35. Meshik, O. P. Rol' snezhnogo pokrova v formirovanii vesennego polovod'ya na rekah Belarusi / O. P. Meshik, V. A. Morozova, M. V. Borushko // Melioraciya. – 2020. – № 4 (94). – S. 35–40.
36. Anderson, E. A. A point energy and mass balance model of a snow cover / E. A. Anderson. – Silver Spring, MD : National Weather Service, Office of Hydrology, 1976. – 150 p.
37. McCabe, G. J. Rain-on-snow events in the western United States / G. J. McCabe, M. P. Clark, L. E. Hay // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2007. – Vol. 88, No. 3. – P. 319–328. – DOI: 10.1175/BAMS-88-3-319.
38. Palmer, W. C. Meteorological drought / W. C. Palmer. – Washington, DC : U.S. Weather Bureau, 1965. – 58 p.
39. Seneviratne, S. I. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: a review / S. I. Seneviratne, T. Corti, E. L. Davin [et al.] // Earth-Science Reviews. – 2010. – Vol. 99, No. 3–4. – P. 125–161. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
40. Kuksina, L. V. Prichiny vozniknoveniya i geografiya vnezapnyh livnevyh pavodkov / L. V. Kuksina, V. N. Golosov, E. V. Promahova // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. – 2020. – № 1. – S. 11–22.
41. Shakesby, R. A. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent / R. A. Shakesby, S. H. Doerr // Earth-Science Reviews. – 2006. – Vol. 74, No. 3–4. – P. 269–307. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2005.10.006.
42. Stohasticheskie faktory formirovaniya vnezapnyh livnevyh pavodkov na CHernomorskom poberezh'e Zapadnogo Kavkaza i Kryma / L. V. Kuksina, P. A. Belyakova, V. N. Golosov [i dr.] // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva. – 2023. – T. 155, № 2. – S. 3–24. – DOI: 10.31857/S0869607123020064.
43. Barendrecht, M. H. Exploring drought-to-flood interactions and dynamics: A global case review / M. H. Barendrecht, A. Matanó, H. Mendoza [et al.] // WIREs Water. – 2024. – Vol. 11, No. 4. – Art. e1726. – DOI: 10.1002/wat2.1726.
44. The need to integrate flood and drought disaster risk reduction strategies / P. J. Ward, M. C. Ruiter, J. Mård [et al.] // Water Security. – 2020. – Vol. 11. – Art. 100070. – DOI: 10.1016/j.wasec.2020.100070.
45. Pirie, W. Spearman rank correlation: introduction / W. Pirie // Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. – 2014. – URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118445112.stat02773 (date of access: 01.03.2026).

Материал поступил 16.03.2026, одобрен 20.03.2026, принят к публикации 30.03.2026

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-190-206

УДК 628.543

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

В. В. Мороз[1], В. В. Ивашечкин[2], Е. А. Урецкий[3]

[1] К. т. н., доцент, заведующий кафедрой природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vovavall@mail.ru

[2] Д. т. н., профессор кафедры гидротехнического и энергетического строительства, водного транспорта и гидравлики, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: ivashechkin_vlad@mail.ru

[3] Компетентный внештатный представитель Корпорации Hoffland Enwironmental Inc. (USA) 10391 Silver Springs Road Conroe, TX 77303, Environmental technology and equipment, Витебск, Беларусь, e-mail: euretsky@yandex.by

Реферат

Решающим процессом, от которого зависит эффективность очистки сточной воды, обработанной минеральными и органическими реагентами, является процесс хлопьеобразования. В связи с этим были проведены соответствующие теоретические исследования, результаты которых были использованы для проектирования реакторных узлов.

Для выбора оптимальных технологических условий и расчета производительности химических реакторов в зависимости от состава и количества обрабатываемых сточных вод, а также технологических режимов процесса, необходимо применять единую методику.

Перемешивание приводит к неравномерному движению отдельных объемов воды, появлению макро- и микровихрей, на границе которых происходит градиентная коагуляция. Для образования крупных хлопьев необходимо создать условия, способствующие градиентной коагуляции. Наряду с этим, вихревые потоки, создавая неравномерные напряжения, разрывают рыхлые первичные структуры и способствуют образованию более компактных, хорошо сформированных хлопьев. Конечный размер хлопьев зависит от соотношения скорости обоих происходящих при перемешивании процессов. На величину хлопьев влияет интенсивность перемешивания, его продолжительность и величина сил адгезии, удерживающих частицы связанными между собой.

В условиях очистки сточных вод, когда концентрация загрязнений и величина pH среды колеблются в довольно широких пределах, найти универсальный параметр, обеспечивающий стабильный процесс хлопьеобразования, весьма затруднительно. Проведенное исследование выявило, что эффективность осветления сточных вод в широком диапазоне величин pH, оборотов мешалки и состава сточных вод происходит в течение 5–10 минут, в интервалах времени многократно меньших, чем рекомендовано.

В статье приводится формула, которая в значительной мере позволяет избежать ошибок при определении объема и времени пребывания сточных вод в автоматизированных реакторах различных типов. Предложен и реализован в опытной схеме реакторный узел обработки сточных вод содержащих хром и сточные воды содержащие кислоты и щелочи с элементами системы автоматического регулирования (САР). Приведены исследования на производстве, в результате которых разработаны и внедрены зонированные химические аппараты, позволяющие эффективно использовать стандартное оборудование и отработанные технологические растворы уменьшая экологическое воздействие на окружающую среду. Все это позволило сократить до минимума количество технологического оборудования (смесители, реакторы, камеры хлопьеобразования), а также время обработки сточных вод в стандартных химических аппаратах с механическими мешалками не менее чем в три раза. Не менее чем вдвое снизить металло- и энергоёмкость, а также уменьшить потребность в производственных площадях для его размещения.

Ключевые слова: аппарат, условия, pH, реактор, раствор, реагент, зона, смешение, вытеснение, поток, структура, осветлитель, камера, насадка, энергопотребление, металлоемкость.

RESEARCH, DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF EQUIPMENT FOR TREATMENT OF WASTEWATER FROM GALVANIC PRODUCTION

V. V. Moroz, V. V. Ivashechkin, E. A. Uretsky

Abstract

The decisive process on which the efficiency of water purification treated with mineral and organic reagents depends is the flocculation process. In this regard, the corresponding theoretical studies were carried out, the results of which were used to design reactor units.

To select optimal process conditions and calculate the productivity of chemical reactors depending on the composition and amount of treated wastewater, as well as process modes, it is necessary to use a single technique.

Mixing leads to uneven movement of individual volumes of water, the appearance of macro- and microvortices, at the boundary of which gradient coagulation occurs. To form large flocs, it is necessary to create conditions that promote gradient coagulation by mixing the water hydraulically or mechanically. Along with this, vortex flows, creating uneven stresses, break loose primary structures and promote the formation of more compact, well-formed flocs. The final size of the flocs depends on the ratio of the speed of both processes occurring during mixing. The size of the flocs is affected by the intensity of mixing, its duration and the magnitude of the adhesive forces that hold the particles together.

In wastewater treatment, where contaminant concentrations and pH fluctuate widely, finding a universal parameter that ensures stable flocculation is extremely difficult. A study has revealed that wastewater clarification efficiency across a wide range of pH values, mixer speeds, and wastewater composition occurs with in 5–10 minutes, at intervals many times shorter than recommended.

This article presents a formula that significantly reduces errors in determining the volume and residence time of wastewater in various types of automated reactors. A reactor unit for processing wastewater containing chromium and wastewater containing acids and alkalis with elements of an automatic control system (ACS) has been proposed and implemented in a pilot scheme. Industrial research is presented, leading to the development and implementation of zoned chemical apparatuses that enable the efficient use of standard equipment and wastewater solutions, reducing environmental impact. All this has allowed us to minimize the amount of process equipment (mixers, reactors, flocculation chambers), as well as the wastewater treatment time in standard chemical apparatus with mechanical agitators, by at least a factor of three. This has also reduced the metal and energy consumption by at least half, as well as the need for production space.

Keywords: apparatus, conditions, pH, reactor, solution, reagent, zone, mixing, displacement, flow, structure, clarifier, chamber, packing, energy consumption, metal consumption.

Введение

Перемешивание – одна из технологических операций, широко применяемых как в химической промышленности, так и для очистки сточных вод с целью осуществления различных физических процессов, служащая для выравнивания полей концентраций и температур, и зачастую определяющая скорость протекания этих процессов, поскольку в этом случае оказывает влияние не только на скорость процесса, но и на качество очистки.

Для этой цели нашли широкое применение химические аппараты с различными перемешивающими устройствами [1-4].

Основная часть. Исследование реакторного узла обработки сточных вод содержащих хром и сточные воды, содержащие кислоты и щелочи с элементами систем автоматического регулирования

Для выбора оптимальных технологических условий и расчёта производительности химических реакторов в зависимости от состава и количества обрабатываемых сточных вод, а также режимов процесса, необходимо применять разработанный авторами статьи единый подход, основа которого показана на рисунке 1 [5–7; 24, 25].

Использование этой новой методологии позволяет разработать аппаратурное оформление промышленного процесса на основе типового аппарата с механической мешалкой, обеспечивающей интенсивное перемешивание сточных вод с реагентами.

Анализ эффективности химических технологий, проводимых в аппаратах с мешалками, при очистке сточных вод показывает, что технологические возможности таких аппаратов не всегда учитываются и не всегда оптимально используются, что значительно снижает эффективность химического процесса и приводит к необоснованному увеличению числа единиц оборудования в технологической линии. Кроме того, из-за незнания при выборе и расчетах оборудования при реагентной очистке сточных вод часто определяют лишь общий объем химических реакторов, который необходим для обеспечения требуемого времени пребывания потоков химических реагентов и сточных вод заданной производительности [5, 7] (рисунок 1).

Зачастую допускаются ошибки, среди которых можно выделить следующие:

– выбор объема аппарата без учета скорости химических процессов и состояния перемешиваемой среды на микроуровне;

– неэффективное использование гидродинамических условий в стандартном аппарате с мешалкой. Например, в реакторе-вытеснителе предыдущий слой не смешивается с последующим, в то же время в реакторе-смесителе выравнивание концентраций перемешивающихся ингредиентов по объёму происходит практически мгновенно;

– неправильная обвязка химических реакторов технологическими трубопроводами;

– неправильный выбор мест ввода сточных вод и химических реагентов в аппарат;

– размещение чувствительных элементов САР вне активных зон реактора;

– отсутствие учета инерционности САР.

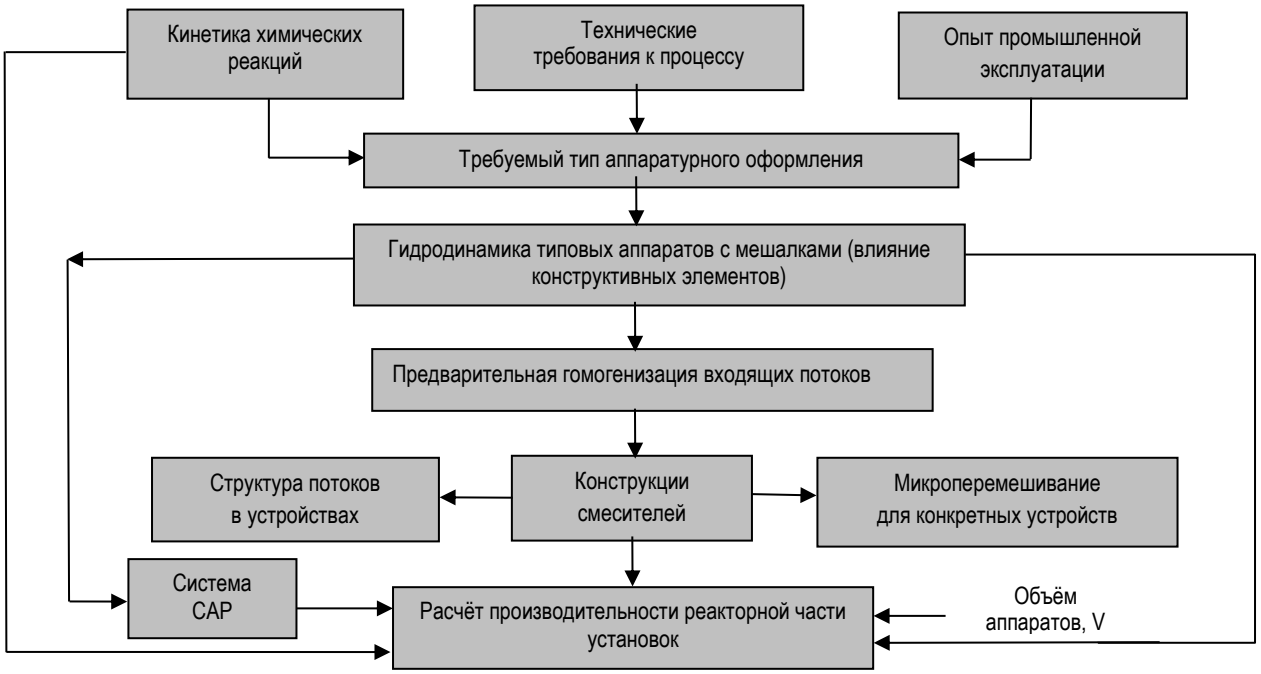


Рисунок 1 – Методология проектирования реакторной части установок очистки сточных вод

Игнорирование перечисленных выше факторов резко снижает эффективность использования стандартных аппаратов с мешалками для проведения химических реакций в промышленном производстве, что приводит к увеличению общего числа аппаратов или к необоснованному увеличению объемов аппаратов в технологической линии. Это, в свою очередь, является причиной высокой металло- и энергоемкости промышленных технологических линий очистки сточных вод [5, 6].

Так как от времени пребывания перерабатываемой среды в аппаратах химической технологии зависят процессы массопереноса и химического превращения, то информация о функциях распределении времени пребывания (РВП) является одним из основных параметров изучаемого объекта [12, 14, 15, 16, 22]. Проведение подобных исследований необходимо для определения реальной гидродинамической обстановки внутри аппарата, выявления в нём застойных и байпасных зон, а значит исключения установки чувствительных элементов систем автоматического регулирования в точках, искажающих реальный ход химических процессов.

О структуре потока в реакторе судят по выходному сигналу или так называемому «отклику» на входное возмущение.

Предварительно, были проведены лабораторные исследования гидродинамических процессов, происходящих в реакторе в лабораторных условиях. Получены данные по структуре потоков. Исследование функции распределения времени пребывания (РВП) без искажений возможно только на реальных промышленных аппаратах [11, 12, 17]. Поэтому исследование этой функции производилось на промышленном аппарате V = 3,2 м^3 с рамной мешалкой на реальных очистных сооружениях предприятия, в котором осуществлялся автоматизированный процесс обработки сточных вод, содержащих ЛКМ, совместно с содержащими хром сточными водами.

Функция РВП изучалась по реакции химического аппарата V = 3,2 м^3 с рамной мешалкой на возмущение, подаваемое на вход в реактор. Так как аппарат «не прозрачен», и информация о движении частиц внутри него отсутствовала, был использован термин «чёрный ящик», применяемый в химической кибернетике [11].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-207-215

О структуре потока в аппарате судили по выходному сигналу или так называемому «отклику» аппарата на входное возмущение [11].

Методики определения, построения кривых РВП, а также обработку результатов экспериментов выполняли согласно [17]. Частицы индикатора, попадая внутрь аппарата, начинают двигаться от входа к выходу в соответствии со структурой потока. Чем больше частиц индикатора одновременно появляется на выходе, тем выше их концентрация.

Эксперимент проводился следующим образом:

– объёмным способом устанавливался расход воды, подаваемой насосом в реактор;

– заполнялась половина объёма реактора водой;

– определялась концентрация трассера в исходной воде (фон);

– включалось перемешивающее устройство;

– вводилось предварительно рассчитанное количество трассера в реактор;

– доводился уровень воды в реакторе до перелива;

– перемешивание содержимого реактора осуществлялось до того момента, пока концентрация трассера не достигала расчётного значения;

– включался насос подачи воды в реактор;

– оттарированный ранее расход поддерживался постоянным в ходе эксперимента;

– через определённые промежутки по времени производился отбор проб на выходе из реактора.

– определялась концентрация трассера в пробах;

– эксперимент повторялся многократно при постоянном и различном расходе.

Картина движения потоков в большинстве непрерывно действующих стандартных химических аппаратов не отвечает ни идеальному вытеснению, ни идеальному смешению. По структуре потоков эти аппараты можно считать аппаратами промежуточного типа.

Проведенные исследования [18] и анализ экспериментов показали, что кривые откликов лабораторного аппарата, снятые при различных расходах жидкости и разных оборотах мешалки, идентичны, т. е. структура потока в аппарате в довольно широких пределах не зависит от скорости вращения мешалки и скорости подачи жидкости. Структура потоков близка к модели идеального перемешивания [12, 18, 19, 20].

Экспериментально определены гидродинамические процессы в химических аппаратах, что позволило правильно разместить измерительные приборы, оборудование и разработать высокоэффективную технологию очистки сточных вод, содержащих ЛКМ, в рамках существующей схемы очистки сточных вод гальванического производства предприятия, и при этом многократно снизить объём и энергоёмкость химического оборудования [21, 22, 23, 25].

Исследования показали, что полное смешение участвующих в химическом процессе веществ достигается при подаче реагентов и сточных вод в зону интенсивного перемешивания (на края лопастей мешалок). Анализ экспериментов показал, что кривые откликов лабораторного аппарата, снятые при различных расходах жидкости в узком интервале (190÷300 об/мин.) мешалки, идентичны [24].

Аппараты с перемешивающими устройствами приближаются по структуре потока к модели идеального перемешивания, когда велика мощность мешалки, мала вязкость жидкой среды и мал расход по сравнению с циркуляцией жидкости внутри аппарата [11, 12, 22].

Все это в итоге позволило правильно произвести обвязку реакторов технологическими трубопроводами и определить места установки чувствительных элементов автоматики для объективного отражения хода технологических процессов.

В значительной мере избежать ошибки при определении объема и времени пребывания сточных вод в автоматизированных реакторах можно устранить правильной их обвязкой и использованием формулы, предложенной Е. А. Урецким [5]:

$$T_P = T_{С.Р.} + T_{И.Д.} + T_{Х.А.} + T_{И.М.} + T_М + T_К, c, \quad (1)$$

где:

– T р. – время пребывания сточных вод в автоматизированных реакторах;

– T с. р. – интервал времени, учитывающий задержки в формировании сигнала - рассогласования (определяется местом установки датчика);

– T и. д. – интервал времени, учитывающий инерционность датчика (берётся по паспорту);

– T х. а. – время перевода реагента в химически активную форму. Время, необходимое для максимального диспергирования реагента в реакционном объеме;

– T и. м. – интервал времени, учитывающий инерционность исполнительного механизма;

– T м. – время массообмена;

– T к. – кинетические постоянные реакции. Для реакторов обработки, содержащих хром сточных вод – 5–10 секунд, для реакторов – нейтрализации всех видов сточных вод – 300–400 секунд.

В случае строгого выполнения всех рекомендаций и пояснений, приведенных в [5], время пребывания сточных вод в реакторах, достаточное для завершения технологических процессов, составит:

– для реакторов, содержащих хром сточные воды – 3–5 минут;

– для реакторов-нейтрализаторов всех видов сточных вод – 6–9 минут.

При подборе реакторов необходимо:

– для непрерывно работающих реакторов (проточных) принимать аппараты с рамной или пропеллерной мешалкой;

– для реакторов периодического действия принимать аппараты с пропеллерной или турбинной мешалкой.

Для проточных реакторов сточных вод реагенты необходимо вводить в нижнюю зону реактора под мешалку, а отвод обработанных сточных вод осуществлять в верхнем уровне.

Устранение этих негативных факторов в достаточной мере возможно при использовании разработанного и апробированного на базовом предприятии реакторного узла, состоящего из двух химических аппаратов (аппарат приближающийся к идеальному смешению и аппарат приближающийся к идеальному вытеснению), показанного на рисунке 2 [5, 22, 25].

Работая с проектными реагентами – серной кислотой (H_2SO_4) и бисульфитом натрия – ($NaHSO_3$), САР, управляющая процессом восстановления хрома (VI) до хрома (III), работала на локальных очистных сооружениях базового предприятия относительно стабильно. Однако при переходе на более экономичный режим использования кислых ОТР производств защитных покрытий (гальваника и покраска), используемых в процессах травления и активации вместо или совместно с покупными реагентами, такая система оказалась неработоспособной.

Это объясняется тем, что эти ОТР содержат высокие концентрации как ионов железа (II), так и ионов железа (III). Вследствие присутствия в реакционной системе ионов железа (III), САР, как и на наличие ионов хрома (VI), даёт сигнал на подачу в реактор-восстановитель кислых ОТР. Несмотря на то, что процесс восстановления хрома (VI) в нём завершён, сигнал на закрытие задвижки от САР не поступает, и в результате этого весь раствор восстановителя $NaHSO_3$ из дозирующей ёмкости выливается в реактор.

Кроме того, проектным решением на базовом предприятии было предусмотрено управление только подщелачиванием общего потока усредненных сточных вод. Такой подход не позволял ограничивать верхний предел величины pH, что периодически приводило к растворению оксигидратного коллектора и адсорбированных на нём ЛКМ. Вследствие этого имел место постоянный вынос взвеси из отстойника в канализацию.

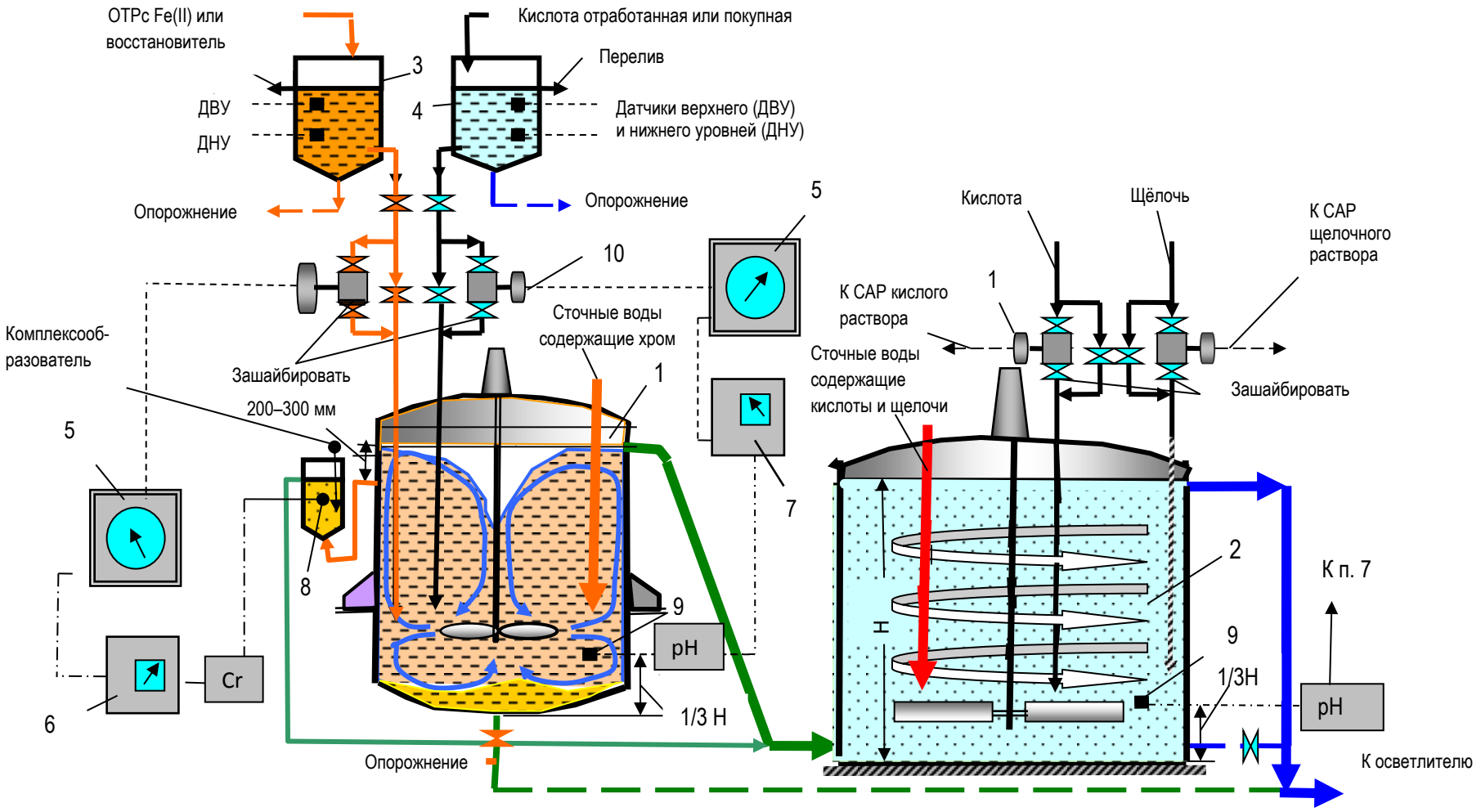
Для использования в процессе очистки сточных вод с использованием ОТР, САР реакторного узла процесса нейтрализации и восстановления хрома необходимо усовершенствование по схеме (рисунок 2), гарантирующей не только работу схемы в целом, но и очистку сточных вод от ЛКМ в частности.

Объясняется это тем, что чувствительный элемент сигнализатора хрома при содержании железа (III) более 5 мг/дм^3 становится неработоспособным.

Для практического использования результатов исследования найдено такое техническое решение, которое исключает воздействие ионов железа (III) на чувствительный элемент сигнализатора хрома и позволяет автоматическое управление по редокс-потенциалу. Для устранения этого «мешающего фона» использована способность ионов железа (III) образовывать устойчивые комплексные ионы с некоторыми соединениями, а именно, с ортофосфорной кислотой (H_3PO_4) или щавелевой кислота ($H_2C_2O_4$). Эти вещества в водных растворах легко реагируют с ионами трехвалентного железа [21, 22].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-207-215

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-207-215



1 – реактор-смеситель сточных вод содержащих хром V = 1 м^3; 2 – реактор-вытеснитель нейтрализации всех видов сточных вод – 2 м^3; 3 – дозатор отработанных технологических растворов (ОТР), содержащих железо (II) или резервный товарный восстановитель; 4 – дозатор кислых ОТР или резервный покупной; 5 – потенциометр КСП –3п; 6 – вторичный прибор Cr –метра; 7 – вторичный прибор pH – метра П-205; 8 – первичный датчик хром-метра Э3-01; 9 – первичный датчик pH-метра ДПГ-4м; 10 – мембранный исполнительный механизм с пневмозадвижкой

Рисунок 2 – Реакторный узел обработки сточных вод содержащих хром и сточных вод содержащие кислоты и щелочи с элементами САР

В результате производственных испытаний сигнализатор наличия шестивалентного хрома, а следовательно, и вся САР, становится работоспособной при введении в реакционную среду ортофосфорной кислоты. При добавлении в раствор восстановителя, необходимого для полного восстановления, происходит резкий скачок потенциала.

В случае применения в качестве комплексообразователя щавелевой кислоты избирательная чувствительность сигнализатора еще больше возрастает, так как величина потенциала в точке перехода становится еще больше.

Комплексообразование, вызывая изменение концентрации свободных ионов окисленной формы, обусловливает изменение редокс-потенциала системы и избирательно убирает влияние «мешающего» фона в работе хром-метра. Эта особенность устраняла возникшие затруднения, однако не решала вопрос о месте ввода в технологическую схему комплексообразующего агента. При введении маскирующего комплексообразующего агента непосредственно в обрабатываемую среду потребовалось бы большое количество ортофосфорной кислоты (15÷20 т в год), а в случае же выбора щавелевой кислоты потребовалось бы еще и дополнительное оборудование по приготовлению рабочего раствора.

Для устранения возникших проблем разработано и использовано «Устройство для регулирования процесса обезвреживания промышленных сточных вод» [14, 22].

При использовании доработанных стандартных САР открылась возможность рационального использования создающих «мешающий фон» отработанных технологических растворов вместо покупных реагентов.

Это в полной мере проявилось в процессе эксплуатации реагентной схемы локальных очистных сооружений на базовом предприятии. Реакторный узел, на котором реализована технология обработки содержащих хром сточных вод и сточных вод содержащих кислоты и щелочи с элементами САР, работает следующим образом: сточные воды во всех реакторах узла подаются в нижнюю зону под мешалку. Сюда же подаются и реагенты.

Чувствительный элемент ЭЗ-01 (поз. 8) сигнализатора наличия хрома (VI) устанавливается на глубине 200÷300 мм от уровня переливного патрубка реактора-смесителя (поз. 1).

При появлении в реакционной системе шестивалентного хрома чувствительный элемент ЭЗ-01 (поз. 8) сигнализатора наличия хрома (VI) подаёт сигнал на вторичный прибор (поз. 6). Усиленный вторичным прибором электрический сигнал воздействует на потенциометр КСП–3п (поз. 5), оборудованный изодромным пропорционально–интегральным (ПИ) регулятором.

В потенциометре КСП–3п (поз. 5) электрический сигнал преобразуется в пропорциональный пневматический и далее воздействует на мембранный исполнительный механизм (МИМ), раствор восстановителя начинает поступать в реактор. При исчезновении в системе хрома (VI) пневмоклапан (поз. 10) закрывается.

Для поддержания оптимальной величины pH = 2,5–3,0 в реакторе–восстановителе (поз. 1) на глубине 1/3H от днища размещается чувствительный элемент pH–метра марки ДПГ-4м (поз. 9).

При повышении pH среды более 3,0 датчик ДПГ-4м (поз. 9) подает сигнал на вторичный прибор pH–метра П–215 (поз. 7). Для его усиления воздействует на потенциометр КСП–3п (поз. 5), оборудованный изодромным пропорционально–интегральным (ПИ) регулятором. В потенциометре КСП–3п (поз. 5) электрический сигнал преобразуется в пропорциональный пневматический и далее воздействует на мембранный исполнительный механизм (МИМ) пневмоклапана (поз.10). Клапан открывается, кислый раствор начинает поступать в реактор (поз. 1). По достижении величины pH = 2,5, установленной на датчике потенциометра КСП–3п, пневмоклапан закрывается. Принцип работы САР подачи щелочного и кислого реагента для поддержания pH = 8–8,5 в реакторе-нейтрализаторе (поз. 2) аналогичен САР поддержания оптимального pH в реакторе-восстановителе поз. 1.

Баки–дозаторы (поз. 3, 4) оборудуются датчиками уровня, которые управляют работой насосов подачи рабочих растворов в эти баки.

Описанные выше изменения САР включены в схемы базового объекта и в схемы предприятий, где производилось внедрение новой технологии.

В дальнейшем проведены исследования зонированных аппаратов, совмещающих в одном объёме процессы идеального смешения и идеального вытеснения на базе аппарата с турбинной мешалкой, секционированного диском [8].

Описание установки. Для проведения экспериментов была собрана конструкция по [8] и изготовлен аппарат на базе стандартного емкостного аппарата, показанного на рисунке 3.

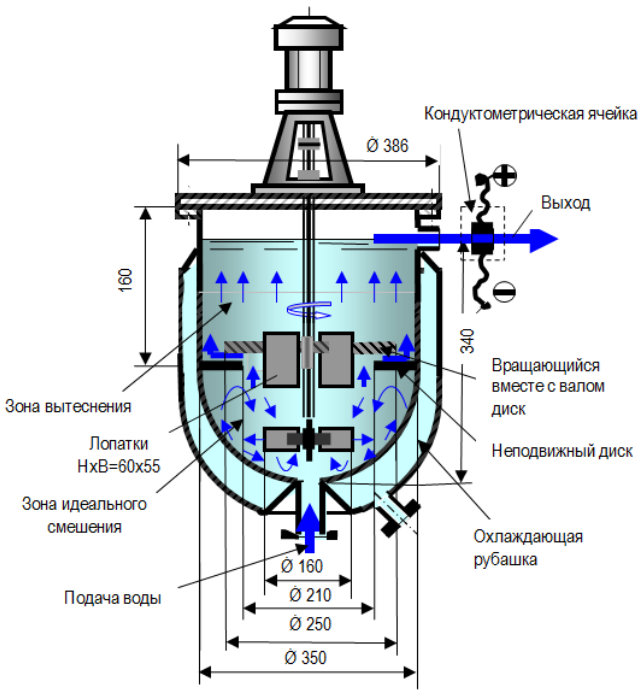


Рисунок 3 – Стандартный химический аппарат с турбинной мешалкой, дооборудованный устройствами согласно [8]

Данный аппарат снабжен четырёхлопастной мешалкой турбинного типа, делающей 48 об/мин, в который согласно [8] добавлены вращающийся вместе с валом диск, неподвижный диск, поднимающиеся верх-вниз относительно вращающегося диск, лопатки $H \times B = 60 \times 55$ мм, обеспечивающие различную степень перемешивания сточных вод в зоне вытеснения.

Методика проведения экспериментов и обработка данных. При изучении структуры потоков ввод жидкости осуществлялся через нижний штуцер аппарата, а кондуктометрическая ячейка для определения концентрации индикатора располагалась на уровне перелива, как показано на схеме лабораторной установки (рисунок 3). Кривые отклика снимались индикаторным методом.

Θ относительное время:

$$\Theta = \frac{t_i}{\tau}, \text{ мин}, \quad (2)$$

где t_i – текущее время пребывания жидкости в аппарате, мин.

$\bar{\tau}$ – среднее значение времени пребывания, мин.

В качестве индикатора был выбран раствор соли KCl, который вводился импульсно перед нижним штуцером аппарата. Полученные кривые отклика показаны на рисунках 4, 5, 6.

F(Θ) – безразмерная величина.

Секционирование аппаратов кардинально улучшило структуру потоков. Так, с одной стороны улучшилось качество смешения входящего потока, что следует из высокого значения, с другой стороны произошло улучшение структуры потоков, с точки зрения приближения её к модели идеального вытеснения.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-207-215

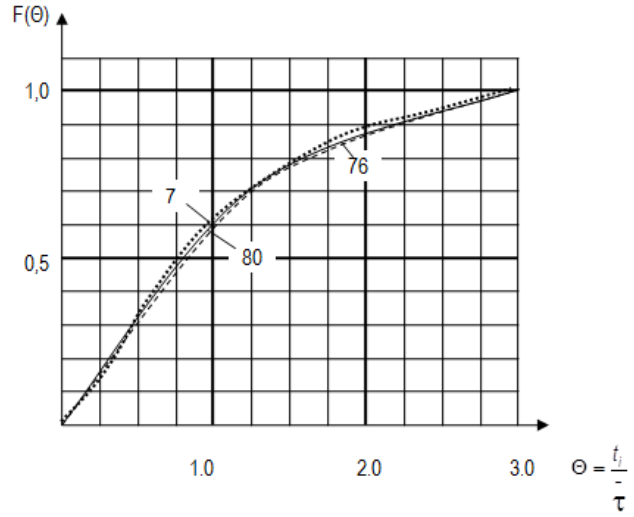


Рисунок 4 – Безразмерная кривая отклика аппарата V = 25 дм^3 с турбинной мешалкой (48 об/мин) при подаче жидкости снизу, а выходе – на переливе, когда ввод индикатора осуществлялся через центробежный смеситель типа «улитки» (75, 76, 80 – номера опытов)

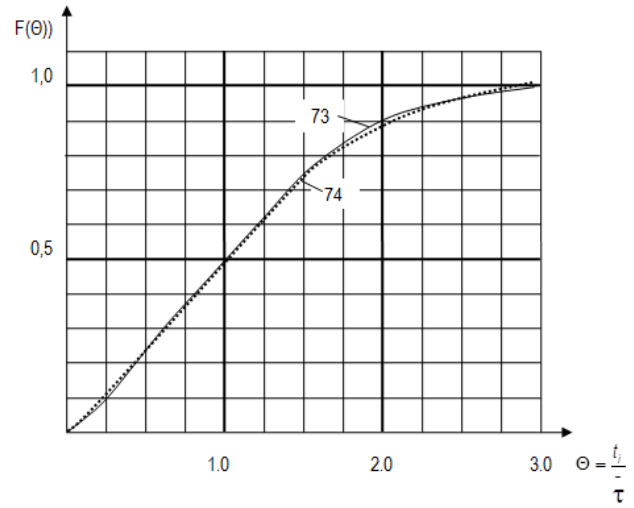


Рисунок 5 – Безразмерная кривая отклика ячеечной модели с неравными ячейками m = τ_1/τ_2 в секционированном аппарате, V = 25 дм^3 с турбинной мешалкой (48 об/мин) при подаче жидкости снизу, а выходе – на переливе (73, 74 – номера опытов)

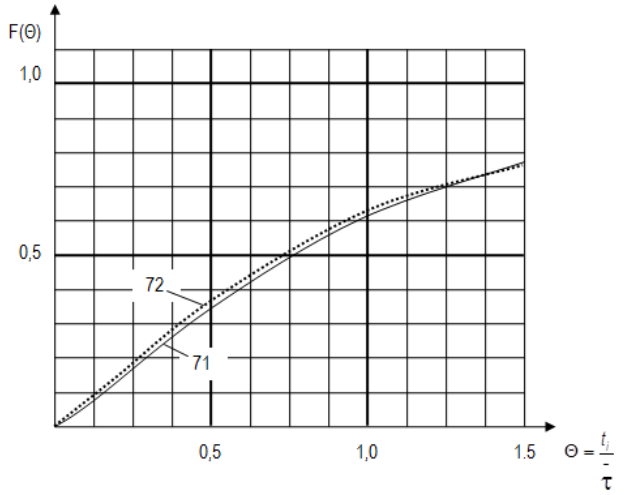
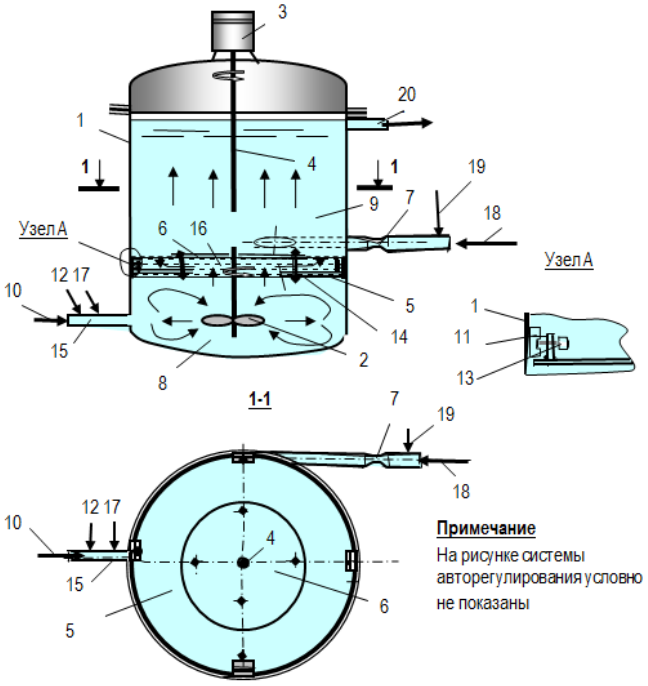


Рисунок 6 – Безразмерная кривая отклика аппарата V = 25 дм^3 с турбинной мешалкой (48 об/мин) при подаче жидкости снизу, а выходе – на переливе (72, 71 – номера опытов)

На базовом предприятии было проведено дальнейшее усовершенствование ранее внедрённого по [8] стандартного химического аппарата емкостью 3,2 м3. Его целью по-прежнему являлось совмещение в одном объёме процессов смешения, реакции и хлопьеобразования (рисунок 7) [9, 10].



1 – корпус; 2 – пропеллерная мешалка; 3 – двигатель с редуктором; 4 – вал; 5 – нижняя кольцевая перегородка; 6 – верхняя кольцевая перегородка; 7 – вихревой смеситель; 8 – нижняя зона (реактор-смеситель); 9 – верхняя зона (реактор-вытеснитель + камера хлопьеобразования); 10 – смесь сточных вод содержащих хром и ЛКМ; 11 – подвижная пластина; 12 – р-р бисульфита натрия; 13 – распорный болт; 14 – крепёжные болты; 15 – подводящий патрубок; 16 – промежуточная зона; 17 – р-р серной кислоты; 18 – подача сточных вод на нейтрализацию; 19 – нейтрализующий реагент; 20 – отводящий патрубок

Рисунок 7 – Аппарат для проведения стадий перемешивания, реакции и хлопьеобразования [10]

Исходя из этого было сконструировано техническое устройство [10] которое, содержит корпус 1, оборудованный пропеллерной мешалкой 2, приводимой во вращение электродвигателем 3 через вал 4 и редуктор. В корпусе аппарата находятся подвижные по высоте нижняя 5 и верхняя 6 горизонтальные кольцевые перегородки. При этом горизонтальные перегородки 5, 6 могут перемещаться по вертикали вверх и вниз и фиксироваться на определённом уровне крепёжным узлом А «в распор». Кольцевые перегородки 5 и 6 разделяют устройство на три зоны.

Нижняя зона 8 представляет собой реактор-смеситель, в который через входной патрубок 15 подается смесь обрабатываемой жидкости 10. В эту зону направляются необходимые для проведения химических реакций реагенты 12, 17. Перемешивание обрабатываемой смеси в этой зоне осуществляется быстроходной пропеллерной мешалкой 2.

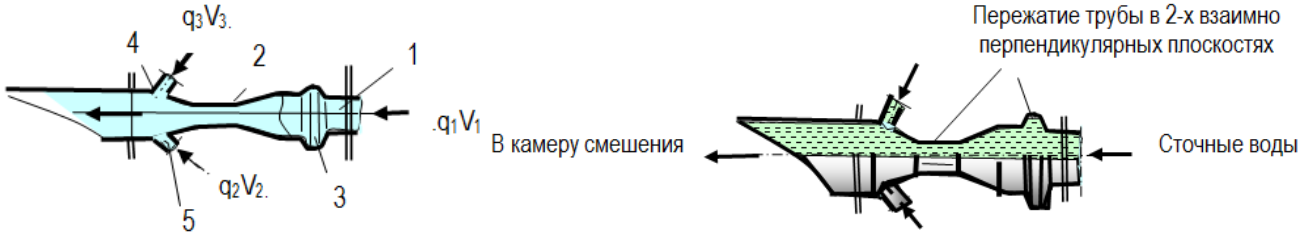
Промежуточная плоскопараллельная зона 16 находится между верхней 6 и нижней 5 горизонтальными кольцевыми перегородками. Здесь же в кислой среде осуществляется восстановление шестивалентного хрома до трёхвалентного и деструкция части органических загрязнений сточных вод 10.

Из нижней части по мере поступления в неё сточной жидкости обработанная смесь передавливается в промежуточную плоскопараллельную зону 16, которая находится между верхней 6 и нижней 5 горизонтальными кольцевыми перегородками. Вращение жидкости

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-207-215

в этой зоне 16 осуществляется жидкостью зоны 8. Далее из зоны 8 кислая смесь жидкости направляется в зону 9 на нейтрализацию и хлопьеобразование.

В верхнюю зону аппарата 9 остальной поток сточных вод подаётся через вихревой смеситель 7 (рисунок 8, 9). Оно представляет собой сплющенный в двух взаимно перпендикулярных направлениях патрубок. Поток воды, проходя в нём через сжатые овальные сечения 6 и 7, ускоряется и приобретает винтовой характер, чем достигается интенсивное смешение в полном объёме жидкости на выходе. Непосредственно перед входом в зону 9 через насадки 4, 5, расположенным под углом к боковым сжатым сечениям, вводятся реагенты.



1 – входной тангенциальный патрубок; 2 и 3 – развёрнутые под углом 90° сжатые овальные сечения; 4, 5 – насадки для ввода реагентов

Рисунок 8 – Вихревой смеситель (фрагмент вихревого аппарата, пат. BY 4810) [9]

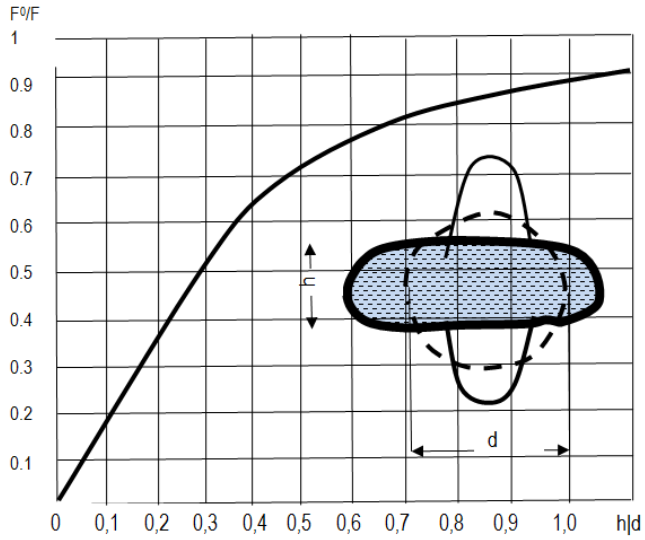


Рисунок 9 – Отношение площадей F_o/F овального сечения к круглому сечению в зависимости от степени пережатия цилиндрического насадка. Геометрические характеристики насадка

Проведенные исследования, показали, что степень сегрегации реагентов и обрабатываемых сточных вод при последовательном прохождении их через входной тангенциальный патрубок 3 и камеру смешения 2 составляет не менее 95 %.

Далее, смесь различных сточных вод и нейтрализующих кислых или щелочных растворов подаётся в зону 9. Эта зона совмещает в себе реактор-вытеснитель и хлопьеобразователь. Смешивание в ней осуществляется за счёт тангенциального ввода обрабатываемой смеси 11 из вихревого смесителя 7 и вращающегося верхнего слоя жидкости зоны 16. Обработанная в зоне 9 сточная вода сформированными хлопьями через отводящий патрубок 20 направляется в осветлитель.

Использование предлагаемой конструкции позволяет сократить до минимума количество технологического оборудования (смесители, реакторы, камеры хлопьеобразования) за счёт объединения их функций в одном объёме без уменьшения эффективности и производительности и не менее чем вдвое снизить металло- и энергоёмкость, а также уменьшить потребность в производственных площадях для его размещения.

В таблице 1 приведены результаты эксплуатации линии доочистки в сопоставлении с качеством технической и водопроводной воды, используемой на этом предприятии. Из полученных данных следует, что по основным показателям фильтрат по качеству соответствует технической воде.

Таблица 1 – Состав общего потока сточных вод на линии доочистки

№ п/п	Наименование ингредиента	Единица измерения	Средний, доверительный интервал концентраций		Наблюдаемый максимум после отстойника	
			До	После	До	После
1	Хром (VI)	мг/дм³	90–110	Отсутствует	120	Отсутствует
2	Хром общ.	мг/дм³	Не определялся	08–1,6	Не определялся	1,7
3	Цинк	мг/дм³	21–28	Следы	32,1	0,2
4	Никель	мг/дм³	2,2–4,9	Отсутствует	5,20	0,1
5	Железо	мг/дм³	41–58	0,2–1,0	63,0	1,5
6	Медь	мг/дм³	12–45	0,1–0,4	64,0	0,5
7	Кислота	мг-экв/дм³	7,9–9,1	Отсутствует	10,8	Отсутствует
8	Щелочь	мг-экв/дм³	3–4,2	Отсутствует	5,25	Отсутствует
9	pH		Не определялся	8,1–8,4	Не определялся	8,6
10	ХПК	мг/дм³	1500–2000	12–18	2500	21,6

В случае необходимости в еще более высокой степени очистки воды вода потока доочищалась на локальных установках в основном производстве в соответствии с требованиями ОСТов. При этом степень возврата воды в производство должна составлять 85–90 %.

Заключение

В результате исследований:

1) разработана методология проектирования реакторной части установок очистки сточных вод, которая позволяет рассчитывать аппаратурное оформление процесса на основе типовых аппаратов с механической мешалкой, обеспечивающих интенсивное перемешивание сточных вод с реагентами;

2) получена формула, которая в значительной мере позволяет избежать ошибок при определении объема и времени пребывания сточных вод в автоматизированных реакторах;

3) предложена конструкция реакторного узла обработки сточных вод содержащих хром и сточных вод содержащих кислоты и щелочи с элементами САР, позволяющая эффективно использовать

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-207-215

стандартное оборудование и отработанные технологические растворы уменьшая экологическое воздействие на окружающую среду;

4) выполнены исследования, которые позволили разработать и внедрить зонированные химические аппараты, совмещающие в одном объёме зоны идеального смешения и идеального вытеснения. Такие аппараты, по сравнению со стандартными, обладают многократно сниженными металлоемкостью и энергопотреблением.

Список цитированных источников

1. Технический справочник по обработке воды : в 2 т. / Л. Андриамирадо [и др.] ; науч. ред.: М. И. Алексеев [и др.]. – СПб. : Водоканал Санкт-Петербурга : Новый журн., 2007. – Т. 2. – С. 777–1696.
2. Хенце, М. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен [и др.]. – М. : Мир, 2004. – 480 с.
3. Справочник по современным методам и технологиям очистки природных и сточных вод и оборудованию / ДАНСЕЕ, отдел по Восточной Европе. – Копенгаген, 2001. – 253 с.
4. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. – СПб. : Профессионал, 2006. – Ч. 2. – 916 с.
5. Урецкий, Е. А. Оптимизация существующих и разработка новых ресурсосберегающих технологий в водном хозяйстве предприятий приборо- и машиностроения : монография / Е. А. Урецкий, Е. С. Гогина, В. В. Мороз. – М. : Изд-во АСВ, 2022. – 624 с.
6. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии промышленного водоснабжения и водоотведения : справочное пособие / Е. С. Гогина, А. Д. Гуринович, Е. А. Урецкий. – М. : Ассоциация строительных вузов, 2012. – 312 с.
7. Урецкий, Е. А. Оптимизация существующих и разработка новых ресурсосберегающих технологий в водном хозяйстве предприятий приборо- и машиностроения : монография / Е. А. Урецкий, Е. С. Гогина, В. В. Мороз. – М. : АСВ, 2023. – 618 с.
8. Авторское свидетельство SU998365A1, МПК C 02F 1/00. Устройство для очистки промышленных сточных вод : заявлено 03.08.1981 / Беличенко Ю. П., Комаровский М. П., Митин Б. А., Урецкий Е. А., Савченко В. А. – 2 с.
9. Патент BY4810U, МПК B01F5/00(2006). Вихревой аппарат : № u 20080317 : заявлено 16.04.2008 : опубл. 04.08.2008 / Урецкий Е. А., Мороз В. В., Дмухайло Е. И. ; заявитель Брестский гос. техн. ун-т. – Гос. реестр полезн. моделей.
10. Патент BY10812U, МПК C02F1/00(2006.01). Устройство для проведения физико-химических процессов : № u 20150099 : заявлено 26.01.2015 : опубл. 19.03.2015 / Урецкий Е. А., Мороз В. В. ; заявитель Брестский гос. техн. ун-т. – Гос. реестр полезн. моделей.
11. Тябин, Н. В. Методы химической кибернетики в реологии и химической технологии : учебное пособие / Н. В Тябин, А. Б. Голованчиков. – Волгоград : Волгоградский политехнический институт, 1983. – 104 с.
12. Мороз, В. В. Изучение реальной гидродинамической обстановки в промышленном аппарате V=3,2м3 с механической мешалкой, используемой для обработки смеси стоков гальванического и окрасочного производства / В. В. Мороз, Е. А. Урецкий // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – 2013. – № 2 (80). – С. 60–62.
13. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии в водном хозяйстве промышленных предприятий : монография / Е. А. Урецкий ; под ред. С. Е. Березина. – Брест : БрГТУ, 2008. – 320 с.
14. Мороз, В. В. Ресурсосберегающая реагентная технология совместной очистки сточных вод лакокрасочных и гальванических производств приборо- и машиностроения / В. В. Мороз, Е. А. Урецкий, А. П. Дарманян // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика и геоэкология. – 2018. – № 2 (110). – С. 134–138.
15. Мороз, В. В. Оптимизация работы вертикальных отстойников путем добавления в них зернистых хлопьеобразователей и полочных модулей / В. В. Мороз, А. Д. Гуринович, Е. А. Урецкий // Проблемы энергетической эффективности в различных отраслях : сб. ст. науч. семинара, Брест, 21 марта 2015 г. / Брестский гос. техн. ун-т ; под ред. М. В. Стрельца [и др.]. – Брест, 2015. – С. 105–111.
16. Опыт повторного использования сточных вод на предприятии приборо- и машиностроения / В. В. Мороз, Е. А. Урецкий, Л. Д. Субботкин, А. П. Дарманян // Строительство и техногенная безопасность : сб. науч. трудов. – Симферополь : НАПКС, 2018. – № 11 (63).– С. 97–103.
17. Технологическая линия по очистке производственных сточных вод гальванического участка дорожно-ремонтного предприятия Белорусской железной дороги, г. Лида, для проекта ИП АЕТЕ (Американские экологические технологии и оборудование) : НИР / рук. Е. А. Урецкий. – ИП АЕТЕ. ОДО «САФАРИ», 1997.
18. Лабораторный практикум по водоотведению и очистке сточных вод : учеб. пособие для вузов / В. И. Калицун, Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронов, Е. В. Алексеев ; под общ. ред. В. И. Калицуна. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 2000. – 272 с.
19. Гордеев, Л. С. Жидкофазные химические реакторы. Процессы и аппараты химической технологии / Л. С. Гордеев // Итоги науки и техники. Сер. ВИНИТИ. – 1976. – Т. 4. – С. 82–164.
20. Дарманян, А. П. Применение статических смесителей для интенсификации процесса перемешивания жидких сред / А. П. Дарманян // Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии : тезисы докладов Всес. совещания. – Сумы : Химтехника, 1986. – С. 185–186.
21. Мороз, В. В. Исследование возможности создания «попутной» технологии обработки сточных вод, загрязнённых лакокрасочными ингредиентами / Е. А. Урецкий, В. В. Мороз // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – 2007. – № 2 (44). – С. 71–74.
22. Мороз, В. В. Совершенствование системы автоматического регулирования (САР) процесса восстановления хрома (VI) в условиях «мешающего» фона / В. В. Мороз, Е. А. Урецкий // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – 2007. – № 2 (44). – С. 75–80.
23. Мороз, В. В. Расчет экономической эффективности внедрения ресурсосберегающей реагентной технологии совместной очистки сточных вод лакокрасочных и гальванических производств приборо- и машиностроения / Е. А. Урецкий, О. П. Белоглазова, В. В. Мороз // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика и геоэкология. – 2018. – № 2 (110). – С. 122–126.
24. Мороз, В. В. Ресурсосберегающая технология очистки сточных вод лакокрасочного производства в приборо- и машиностроении / В. В. Мороз // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – 2014. – № 2 (86). – С. 78–81.
25. Choosing Rational Technologies for the Final Purification of Wastewater from the Production of Protective Coatings and Printed-Circuit Boards / E. A. Uretskii, I. V. Nikolenko, V. V. Moroz [et al.] // Theor Found Chem Eng. – 2024. – Vol. 58. – P. 1327–1333. – DOI: 10.1134/S0040579524601973.

References

1. Tekhnicheskij spravochnik po obrabotke vody : v 2 t. / L. Andriamirado [i dr.] ; nauch. red.: M. I. Alekseev [i dr.]. – SPb. : Vodokanal Sankt-Peterburga : Novyj zhurn., 2007. – T. 2. – S. 777–1696.
2. Hence, M. Ochistka stochnyh vod. Biologicheskie i himicheskie processy / M. Hence, P. Armoes, J. Lya-Kur-YAnsen [i dr.]. – M. : Mir, 2004. – 480 s.
3. Spravochnik po sovremennym metodam i tekhnologiyam ochistki prirodnyh i stochnyh vod i oborudovaniyu / DANSEE, otdel po Vostochnoj Evrope. – Kopengagen, 2001. – 253 s.
4. Novyj spravochnik himika i tekhnologa. Processy i apparaty himicheskih tekhnologij. – SPb. : Professional, 2006. – CH. 2. – 916 s.
5. Ureckij, E. A. Optimizaciya sushchestvuyushchih i razrabotka novyh resursosberegayushchih tekhnologij v vodnom hozyajstve predpriyatij priboro- i mashinostroeniya : monografiya / E. A. Ureckij, E. S. Gogina, V. V. Moroz. – M. : Izd-vo ASV, 2022. – 624 s.
6. Ureckij, E. A. Resursosberegayushchie tekhnologii promyshlennogo vodosnabzheniya i vodootvedeniya : spravochnoe posobie / E. S. Gogina, A. D. Gurinovich, E. A. Ureckij. – M. : Associaciya stroitel'nyh vuzov, 2012. – 312 s.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-207-215

7. Ureckij, E. A. Optimizaciya sushchestvuyushchih i razrabotka novyh resursosberegayushchih tekhnologij v vodnom hozyajstve predpriyatij priboro- i mashinostroeniya : monografiya / E. A. Ureckij, E. S. Gogina, V. V. Moroz. – M. : ASV, 2023. – 618 s.
8. Avtorskoe svidetel'stvo SU998365A1, MPK C 02F 1/00. Ustrojstvo dlya ochistki promyshlennyh stochnyh vod : zayavleno 03.08.1981 / Belichenko YU. P., Komarovskij M. P., Mitin B. A., Ureckij E. A., Savchenko V. A. – 2 s.
9. Patent BY4810U, MPK B01F5/00(2006). Vihrevoj apparat : № u 20080317 : zayavleno 16.04.2008 : opubl. 04.08.2008 / Ureckij E. A., Moroz V. V., Dmuhajlo E. I. ; zayavitel' Brestskij gos. tekhn. un-t. – Gos. reestr polezn. modelej.
10. Patent BY10812U, MPK C02F1/00(2006.01). Ustrojstvo dlya provedeniya fiziko-himicheskih processov : № u 20150099 : zayavleno 26.01.2015 : opubl. 19.03.2015 / Ureckij E. A., Moroz V. V. ; zayavitel' Brestskij gos. tekhn. un-t. – Gos. reestr polezn. modelej.
11. Tyabin, N. V. Metody himicheskoj kibernetiki v reologii i himicheskoj tekhnologii : uchebnoe posobie / N. V Tyabin, A. B. Golovanchikov. – Volgograd : Volgogradskij politekhnicheskij institut, 1983. – 104 s.
12. Moroz, V. V. Izuchenie real'noj gidrodinamicheskoj obstanovki v promyshlennom apparate V=3,2m3 s mekhanicheskoj meshalkoj, ispol'zuemoj dlya obrabotki smesi stokov gal'vanicheskogo i okrasochnogo proizvodstva / V. V. Moroz, E. A. Ureckij // Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika. – 2013. – № 2 (80). – S. 60–62.
13. Ureckij, E. A. Resursosberegayushchie tekhnologii v vodnom hozyajstve promyshlennyh predpriyatij : monografiya / E. A. Ureckij ; pod red. S. E. Berezina. – Brest : BrGTU, 2008. – 320 s.
14. Moroz, V. V. Resursosberegayushchaya reagentnaya tekhnologiya sovmestnoj ochistki stochnyh vod lakokrasochnyh i gal'vanicheskih proizvodstv priboro- i mashinostroeniya / V. V. Moroz, E. A. Ureckij, A. P. Darmanyan // Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika i geoekologiya. – 2018. – № 2 (110). – S. 134–138.
15. Moroz, V. V. Optimizaciya raboty vertikal'nyh otstojnikov putem dobavleniya v nih zernistyh hlop'eobrazovatelej i polochnyh modulej / V. V. Moroz, A. D. Gurinovich, E. A. Ureckij // Problemy energeticheskoj effektivnosti v razlichnyh otraslyah : sb. st. nauch. seminara, Brest, 21 marta 2015 g. / Brestskij gos. tekhn. un-t ; pod red. M. V. Strel'ca [i dr.]. – Brest, 2015. – S. 105–111.
16. Opyt povtornogo ispol'zovaniya stochnyh vod na predpriyatii priboro- i mashinostroeniya / V. V. Moroz, E. A. Ureckij, L. D. Subbotkin, A. P. Darmanyan // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' : sb. nauch. trudov. – Simferopol' : NAPKS, 2018. – № 11 (63).– S. 97–103.
17. Tekhnologicheskaya liniya po ochistke proizvodstvennyh stochnyh vod gal'vanicheskogo uchastka dorozhno-remontnogo predpriyatiya Belorusskoj zheleznoj dorogi, g. Lida, dlya proekta IP AETE (Amerikanskie ekologicheskie tekhnologii i oborudovanie) : NIR / ruk. E. A. Ureckij. – IP AETE. ODO «SAFARI», 1997.
18. Laboratornyj praktikum po vodootvedeniyu i ochistke stochnyh vod : ucheb. posobie dlya vuzov / V. I. Kalicun, YU. M. Laskov, YU. V. Voronov, E. V. Alekseev ; pod obshch. red. V. I. Kalicuna. – 3-e izd., pererab. i dop. – M. : Strojizdat, 2000. – 272 s.
19. Gordeev, L. S. ZHidkofaznye himicheskie reaktory. Processy i apparaty himicheskoj tekhnologii / L. S. Gordeev // Itogi nauki i tekhniki. Ser. VINITI. – 1976. – T. 4. – S. 82–164.
20. Darmanyan, A. P. Primenenie staticheskih smesitelej dlya intensifikacii processa peremeshivaniya zhidkih sred / A. P. Darmanyan // Povyshenie effektivnosti i nadezhnosti mashin i apparatov v osnovnoj himii : tezisy dokladov Vses. soveshchaniya. – Sumy : Himtekhnika, 1986. – S. 185–186.
21. Moroz, V. V. Issledovanie vozmozhnosti sozdaniya «poputnoj» tekhnologii obrabotki stochnyh vod, zagryaznyonnyh lakokrasochnymi ingredientami / E. A. Ureckij, V. V. Moroz // Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika. – 2007. – № 2 (44). – S. 71–74.
22. Moroz, V. V. Sovershenstvovanie sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya (SAR) processa vosstanovleniya hroma (VI) v usloviyah «meshayushchego» fona / V. V. Moroz, E. A. Ureckij // Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika. – 2007. – № 2 (44). – S. 75–80.
23. Moroz, V. V. Raschet ekonomicheskoj effektivnosti vnedreniya resursosberegayushchej reagentnoj tekhnologii sovmestnoj ochistki stochnyh vod lakokrasochnyh i gal'vanicheskih proizvodstv priboro- i mashinostroeniya / E. A. Ureckij, O. P. Beloglazova, V. V. Moroz // Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika i geoekologiya. – 2018. – № 2 (110). – S. 122–126.
24. Moroz, V. V. Resursosberegayushchaya tekhnologiya ochistki stochnyh vod lakokrasochnogo proizvodstva v priboro- i mashinostroenii / V. V. Moroz // Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika. – 2014. – № 2 (86). – S. 78–81.
25. Choosing Rational Technologies for the Final Purification of Wastewater from the Production of Protective Coatings and Printed-Circuit Boards / E. A. Uretskii, I. V. Nikolenko, V. V. Moroz [et al.] // Theor Found Chem Eng. – 2024. – Vol. 58. – P. 1327–1333. – DOI: 10.1134/S0040579524601973.

Материал поступил 16.01.2026, одобрен 16.02.2026, принят к публикации 16.02.2026

УДК 628.543

К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИБОРО- И МАШИНОСТРОЕНИЯ

В. В. Мороз[1], В. В. Ивашечкин[2], Е. А. Урецкий[3]

[1] К. т. н., доцент, заведующий кафедрой природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vovavall@mail.ru

[2] Д. т. н., профессор кафедры гидротехнического и энергетического строительства, водного транспорта и гидравлики, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: ivashechkin_vlad@mail.ru

[3] Компетентный внештатный представитель Корпорации Hoffland Enwironmental Inc. (USA) 10391 Silver Springs Road Conroe, TX 77303, Environmental technology and equipment, Витебск, Беларусь, e-mail: euretsky@yandex.by

Реферат

В статье приведены методы совершенствования стокообразующего оборудования производства защитных покрытий (ПЗП) и производства печатных плат (ППП) в направлении использования малоотходных и малосточных технологических процессов. Предложено также использование оборотных систем непосредственно в основном производстве с целью многократного уменьшения потребления «свежей» воды на технологические нужды и ее обезвреживание с утилизацией отходов, образующихся в процессе ее очистки, обеспечивающих комплексное сокращение загрязнённых сточных вод, сбрасываемых в канализацию. Этот процесс является одним из важнейших направлений рационального использования воды в ПЗП и ППП по снижению загрязнения окружающей среды. Описаны способы рационального формирования потоков сточных вод ПЗП и ППП у мест их образования и методы, позволяющие их обезвреживание «попутными» технологиями в рамках традиционных реагентных очистных сооружений. Важным моментом при создании таких систем, является утилизация ценных компонентов из сточных вод (дорогих металлов, химикатов и пр.) и использование отходов производства для обработки сточных вод, что повысит их рентабельность. Сброс концентрированных отработанных технологических растворов (ОТР) приводят к безвозвратным потерям цветных металлов, а также нарушают нормальную работу очистных сооружений. Разработаны методы использования ОТР вместо или совместно с покупными реагентами, позволяющие снизить потребность в них не менее чем в три раза.

Ключевые слова: pH, технологические растворы, электролиты, промывка, реагенты, печатные платы, защитные покрытия, обезжиривание, отработанные технологические растворы, промывка, водопотребление, поток.

ON THE QUESTION OF IMPROVING THE TECHNOLOGY OF WASTEWATER TREATMENT FOR INSTRUMENT AND MECHANICAL ENGINEERING ENTERPRISES

V. V. Moroz, V. V. Ivashechkin, E. A. Uretsky

Abstract

Methods for improving wastewater treatment equipment in protective coating (PPC) and printed circuit board (PCB) manufacturing are presented, focusing on low-waste and low-discharge processes. The use of recirculating systems directly in the primary production process is also proposed to significantly reduce the consumption of "fresh" water for process needs and to render it harmless, recycling waste generated during its treatment, thereby ensuring a comprehensive reduction in contaminated wastewater discharged into the sewer system.

This process is one of the most important areas of rational use of water in PPC and PCB to reduce environmental pollution. The article describes methods for rational formation of PPC and PCB wastewater flows at the places of their formation and methods that allow their neutralization by "associated" technologies within the framework of traditional reagent treatment facilities. An important point in creating such systems is the utilization of valuable components from wastewater (expensive metals, chemicals, etc.) and the use of production waste for wastewater treatment, which will increase their profitability. Discharge of concentrated wastewater solutions (WTS) leads to irreversible losses of non-ferrous metals and disrupts the normal operation of treatment facilities. Methods have been developed for using WTS instead of or in combination with commercial reagents, reducing the need for them by at least threefold.

Keywords: pH, process solutions, electrolytes, flushing, reagents, printed circuit boards, protective coatings, degreasing, spent process solutions, flushing, water consumption, flow.

Введение

В условиях значительного повышения цен на реактивы однозначно стоит вопрос создания комплекса технологий и оборудования, применение которых в производствах защитных покрытий (ПЗП) и печатных плат (ППП), позволит увеличить срок службы электролитов и растворов в несколько раз и обеспечить регенерацию из них цветных металлов и химикатов. Данные решения позволят предотвратить залповые сбросы загрязненных сточных вод, которые нарушают режим работы очистных сооружений предприятий, выводят их из строя и способствуют попаданию тяжёлых металлов (ТМ), других токсичных веществ в водоёмы. Эти же решения позволят снизить капитальные и эксплуатационные затраты на очистку сточных вод.

Основная часть. Анализ образования сточных вод и предложения по созданию малосточной технологии

Современная технология комплекса регенерации отработанных электролитов и металлов должна обеспечить:

– использование методов регенерации в технологическом процессе ПЗП и ППП (создание участков по регенерации цветных металлов и химикатов);

– максимальное извлечение цветных металлов и химических элементов;

– создание в городах Республики Беларусь, имеющих развитое гальвано-производство, центров по переработке электролитов и гальваношламов.

В производствах защитных покрытий и печатных плат наблюдается большой объём отработанных технологических растворов,

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-216-223

которые не регенерируются [1, 2, 3]. Снижение объёма отработанных жидких отходов должно производиться как на очистных сооружениях, так и в основном производстве. При этом максимального снижения объёма жидких отходов (до 91 %) можно достичь именно на основном производстве.

Мероприятия по снижению количества жидких отходов в основном производстве.

1. Максимальное внедрение способов регенерации используемых растворов возможно непосредственно в технологических циклах. Согласно рекомендациям [1], выпущенным еще в 1992 г., отработанные электролиты должны были регенерироваться и возвращаться обратно в основное производство. Каждый случай сброса растворов электролитов на очистные сооружения должен быть обоснован в технологической части проекта. При этом наличие узла регенерации электролитов на основном производстве и правильная его эксплуатация позволяет электролитам работать годами и только корректироваться по убыли наносимых на покрываемые детали компонентов [2–6].

Примечательно, что площади, занимаемые узлом регенерации электролитов, и стоимость его размещения на основном производстве, несопоставимы с затратами на его обезвреживание на очистных сооружениях.

2. Большие потери материалов происходят из-за так называемых «залповых сбросов», когда в результате небрежного обслуживания гальванических ванн электролиты выходят из строя и сливаются в систему водоотведения [2–6].

Основные причины загрязнений растворов электролитов следующие:

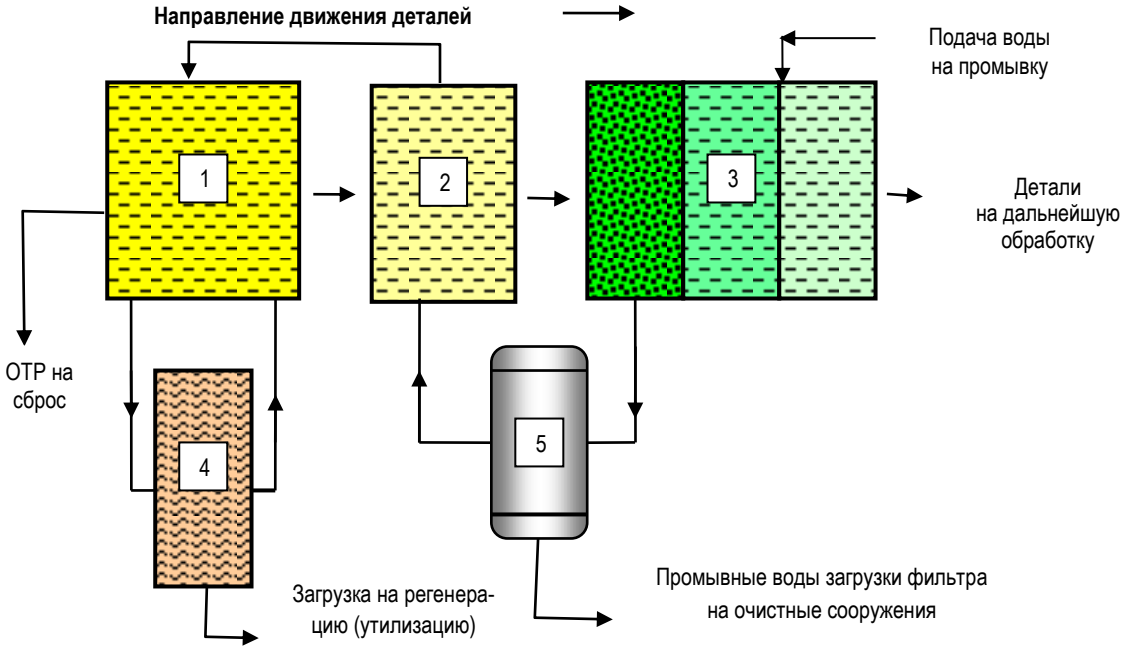
– падение деталей с подвесных приспособлений, которые загрязняют растворы электролитов солями меди, железа, цинка, свинца, олова и пр.;

– отсутствие надлежащего контроля, который приводит к тому, что латунные крючки, к которым крепятся аноды детали, омываются электролитами в случае повышения их уровней в ваннах, и в этом случае происходит их анодное растворение, попадание в электролит меди, цинка и пр.;

– небрежное обезжиривание деталей, которое приводит к загрязнению электролитов органическими веществами;

– попадание в раствор электролитов смазочных масел с монорельсов, тельферных устройств и других узлов механизированных и автоматизированных технологических линий.

Упрощённая схема локальной системы возврата электролита в гальваническую ванну показана на рисунке 1.



1 – гальваническая ванна; 2 – ванна сборник; 3 – ванна трёхкаскадной промывки; 4 – ванна селективной очистки; 5 – фильтр

Рисунок 1 – Упрощённая схема локальной системы возврата электролита в гальваническую ванну

На многих предприятиях используют практику введения нормативов на смену электролитов гальванических ванн через несколько месяцев использования [2–4, 12]. Подобную практику следует признать неправильной, так как электролиты при своевременной их корректировке и соблюдении правил работы на ваннах служат годами и даже десятилетиями без частичной или полной их замены [2–6]. И в случае, если появится необходимость замены раствора электролита на свежий, то весь металл, находящийся в электролите, должен быть извлечён методом электролиза с нерастворимыми анодами или выделен химическим способом [2–5].

Понятие отработанных технологических растворов (ОТР) применимо только к химическим процессам, таким как химическое никелирование или меднение, процессы травления, хроматирования, оксидирования и т. п. [2, 3].

3. Для уменьшения объёма сбрасываемых на очистные сооружения тяжёлых металлов (ТМ) необходимо оборудовать ванны улавливания. А последние ванны каскадных промывок необходимо оборудовать солемерами (концентратомерами) и устройствами внутреннего и внешнего электролиза для извлечения металлов [2–6, 13] (рисунки 2, 3, 4).

Внедрение таких малозатратных технических решений позволит обеспечить в сбрасываемых сточных водах на очистные сооружения концентрации ТМ только в виде следов или практическое их отсутствие.

Использование многоступенчатых схем промывки позволяет многократно сократить расход воды на технологические нужды без ухудшения качества покрытий. При одноступенчатой промывке изделия на промывку 1 м^2 покрытия расходуется примерно 1000 дм^3/м^2 при двухступенчатой 25–30 дм^3/м^2, при трёхступенчатой всего лишь 8–10 дм^3/м^2 [2] .

Установка одной ванны улавливания позволяет уменьшить расход воды при одноступенчатой схеме промывки в четыре раза, при двухступенчатой – в два раза, при трёхступенчатой – на 60 % [2].

При переходе от трёхступенчатой к четырёхступенчатой промывке достигается сокращение водопотребления лишь на 30–50 %. То есть увеличение более двух ступеней промывок значительного сокращения воды не даёт (таблица 1).

Однако в соответствии с [2, 3] считается, что ещё при большем увеличении количества ванн периодически непроточной промывки значительно сокращается расход воды на промывку и резко увеличивается продолжительность непроточного периода (т. е. количество обработанной поверхности деталей, м^2).

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-216-223

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-216-223

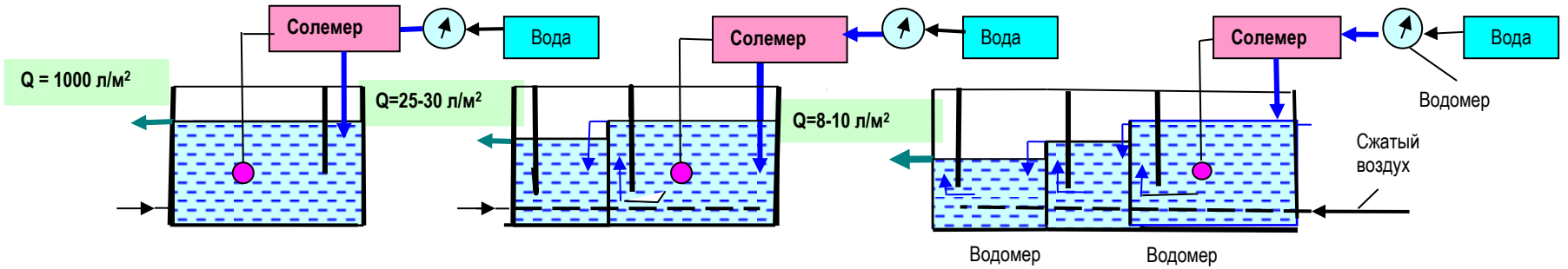


Рисунок 2 – Уменьшение потребности в воде на 1 м² покрытий при внедрении **каскадных промывок**

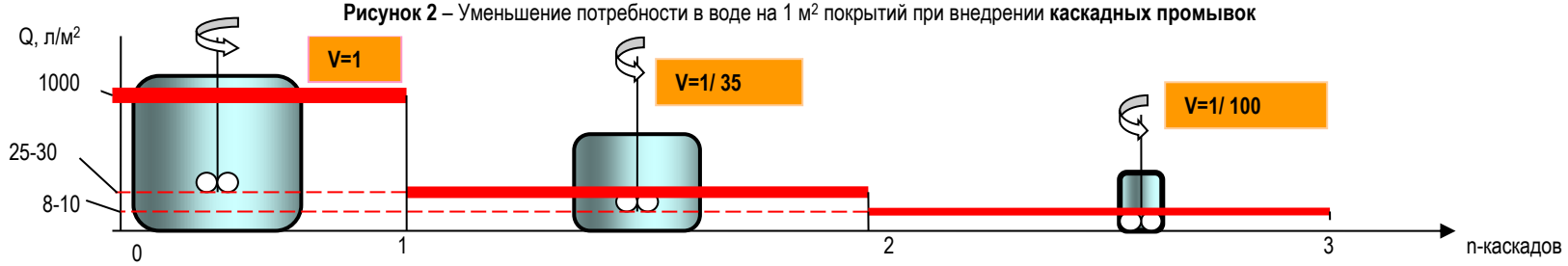
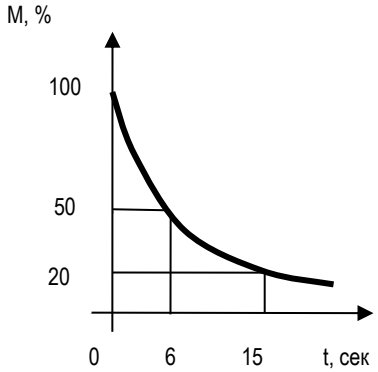
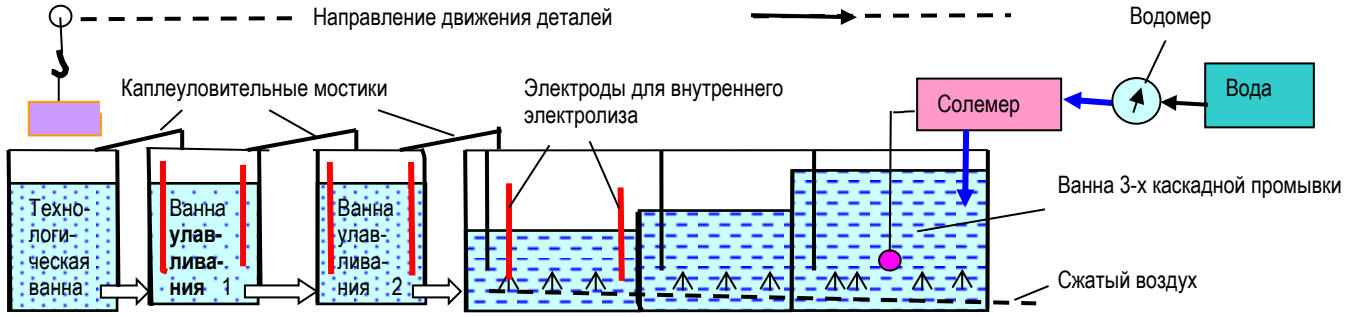


Рисунок 3 – Кратность уменьшения объёма ёмкостной аппаратуры на очистных сооружениях



Количество электролитов, уносимых с деталями в воду, (М)



85 %	**10 %**	**Менее 4,5 %**	**Следы химикатов**	**% задержания химикатов**
Выдержка над ванной	**Установка перво-го уловителя**	**Установка второго уловителя**	**Ванна 3-х каскадной промывки**	**Наименование операций**

Рисунок 4 – Пути уменьшения выноса химикатов со сточными водами гальваники

Таблица 1 – Сравнение расхода воды при многоступенчатой схеме промывки

Количество ванн промывки	Конечная концентрация ионов меди в ваннах промывки по окончании непроточного периода, г/дм^3								Продолжительность непроточного периода, ч/смен
	в 1-й, c_1	в 2-й, c_2	в 3-й, c_3	в 4-й, c_4	в 5-й, c_5	в 6-й, c_6	в 7-й, c_7	в 8-й, c_8	
2	0,3	0,002							70/8
3	1,6	0,07	0,002						429/53
4	4,1	0,46	0,035	0,002					1157/144
5	7,2	1,5	0,21	0,023	0,002				2220/277
6	10,2	3,2	0,7	0,12	0,017	0,002			3566/445
7	12,9	5,5	1,7	0,4	0,08	0,014	0,002		5149/643
8	15,0	8,1	3,3	1,0	0,3	0,06	0,012	0,002	6932/866

Проведённый анализ работы [2, 11] не трёх и четырёх, а семи и восьми ванн промывки, установленных на процессе меднения и работающих в периодически непроточном режиме, показывает, что при незначительной разнице в расходе воды на промывку (0,1–0,2 дм^3/ч) продолжительность непроточного режима отличается значительно (на 1700–2400 ч) и для восьми ванн промывки (объёмом по 1000 дм^3) достигает 11000 ч (что при производительности 1 м^2/ч соответствует обработке 11000 м^2). Даже при условии установки после ванны меднения пяти ванн промывки, работающих в периодически непроточном режиме, они будут работать в односменном режиме без замены воды 2220 ч, 277 смен или более одного года (13-ти месяцев). При восьми периодически непроточных ваннах промывки срок замены воды достигает нескольких лет, а объём загрязнённой промывной воды составляет всего лишь несколько кубических метров. То есть, в течение нескольких лет для промывки используется одна и та же вода.

Для подтверждения выводов по поводу необходимости и полезности увеличения количества ванн промывки для создания малосточных и бессточных технологий [2, 11] приводится пример процесса меднения и работающих ванн в периодически в непроточном режиме (таблица 2).

Это является качественно новым фактом – при односменной работе неавтоматизированных линий 11 000 часов – это более пяти лет работы без подачи воды, а при этом объём загрязнённой промывной воды составляет всего лишь несколько кубических метров. То есть, в течение нескольких лет для промывки используется одна и та же вода определённого объёма, находящаяся в ваннах периодически непроточной промывки без сброса в канализацию [2].

Таблица 2 – Классификация ОТР по свойствам, которые могут найти применение в очистке сточных вод

Технологические свойства	Наименование	Место образования	Область применения
Восстановительные	1) травильные (стальные детали) 2) активации (декапирования) 3) травильные в $FeCl_3$ 4) травильные в $CuCl_2$ 5) подтравливания $(NH_4)_2S_2O_3$ 6) осветления в HCl 7) химического оксидирования	ПЗП ПЗП, ППП* ПЗП, ППП ППП ППП ППП ПЗП	Восстановление Cr(VI) и подкисление сточных вод, содержащих хром
Окислительные	Растворы, содержащие HNO_3 1) осветления 2) травления 3) пассивации 4) хромирования	ПЗП	Подкисление кислотно-щелочных сточных вод
Для создания кислой среды	1) кислого кадмирования 2) никилирования 3) латунирования 4) олово-висмут 5) анодирования 6) меднения 7) эматалирование	ПЗП	Подкисление сточных вод, содержащих хром, и кислотно-щелочных сточных вод
Для создания щелочной среды	1) катодного обезжиривания 2) анодного обезжиривания 3) электрохимического обезжиривания 4) химического обезжиривания 5) цинкования 6) щелочного кадмирования 7) антикоррозионной обработки	ПЗП	Подщелачивание кислотно-щелочных сточных вод

Но как бы долго ни использовались ванны промывки без смены в них воды, говорить о полной бессточности нельзя. Если же промежуток между сменой воды составляет несколько лет, то для обеспечения полной бессточности путём выделения из сточных вод компонентов электролитов и их возврата в производство можно использовать небольшие локальные аппараты, которые хоть и малопроизводительны, но просты в обслуживании и малозатратны. К таким аппаратам можно отнести погружные электрохимические модули (С. С. Кругликов– РХТУ им. Д. И. Менделеева, г. Москва), системы очистки и выпарки воды (ЗАО НПП «Баромембранная технология», г. Владимир), малогабаритные ионообменные модули (В. И. Захаров – ОАО «Авиаприборпроект», г. Москва), установку УЛОС с сорбентом МУС (Б. Н. Нечаев – НТК «Регенератор», г. Москва), мембранную установку и вакуум-выпарные аппараты ЭСВА и ВКР (ЗАО «БМТ», г. Владимир), установку для регенерации промывных вод «Корпорация спецтехнологического оборудования «ВИТРИ», г. Новгород), и простые ТЭНы [11]. Последние в рассматриваемых условиях [2] обладают особой привлекательностью. Как правило, упаривание промывных вод не отличается экономичностью. В рассматриваемых условиях, когда ограниченный объём высококонцентрированной сточной воды образуется один раз в несколько лет, упаривание из-за своей простоты, универсальности и, главное, доступности становится конкурентно

способным по сравнению с другими методами отделения компонентов технологических растворов от промывной воды.

4. Внедрение рациональных методов промывки деталей, позволяющих многократно уменьшить, как объём потребляемой воды на технологические нужды, так и загрязнения её токсичными ингредиентами [2–6].

5. Рациональное формирование потоков сточных вод у мест их образования, позволяющее использование нерегенерированных в основном производстве отработанных технологических растворов (ОТР) в качестве реагентов при очистке сточных вод, а также обезвреживание этих потоков малозатратными «попутными» технологиями [4, 6, 8] (рисунок 5).

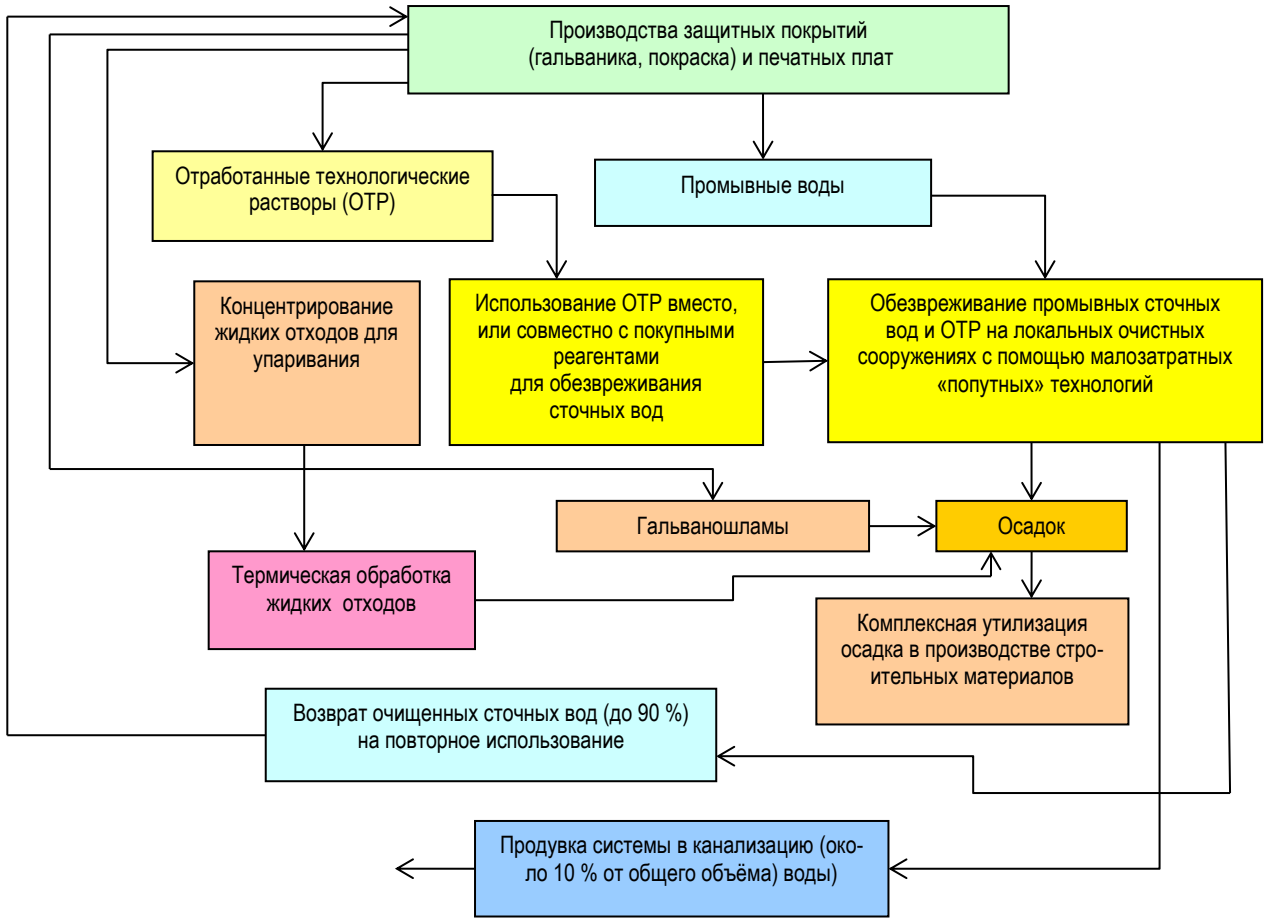


Рисунок 5 – Блок-схема ресурсосберегающей технологии очистки сточных вод и утилизации отходов производств защитных покрытий (гальваника + покраска) и печатных плат, внедрённой на ОАО «БЭМЗ»

Сопоставляя составы растворов, применяемые в основном производстве, и виды товарных реагентов, идущих на обработку сточных вод, установлено, что во многих случаях используются сходные по технологическим свойствам химикаты. В связи с этим выяснилась возможность использования их взамен товарных реагентов, классифицировав эти растворы по видам.

Классификация отработанных растворов не только по величине pH, но и по технологическим свойствам вызвана следующими соображениями.

Отдельные кислые растворы содержат окислители (азотная кислота и т. п.) и другие восстановители (железо (II), олово (II), медь (I) и т. п.). Объединение их в общей сборной емкости нецелесообразно. Такое объединение приводит к окислению восстановителей азотной кислотой. При этом эффективность использования кислой смеси в качестве восстановителя резко снижается. Более того, избыточные количества азотной кислоты, как указывалось ранее, создают ряд нежелательных явлений. Так, например, они окисляют товарные реагенты (сернокислое железо и т. п.), чем увеличивают их потребную дозу. Кроме того, в процессе взаимодействия восстановителей с азотной кислотой выделяются летучие соединения, опасные для обслуживающего персонала [15].

Учитывая выше изложенное, представляется разумным разделение сточных вод не только на промывные и концентрированные с использованием последних взамен или совместно с товарными реагентами, но и разделение отдельных видов кислых растворов с учётом технологических свойств на подвиды. Такое разделение отработанных кислых растворов на растворы, не содержащие восстановители и содержащие их, приведет к резкому увеличению эффективности их использования. Концентрация восстановителей в кислом отработанном растворе, выделенном из общей смеси кислот, многократно возрастет. Это явится следствием отсутствия разбавления другими кислотами и окислителей, присутствующих в них. Исключатся токсичные газообразные выделения. В отдельных случаях отпадет необходимость в товарных реагентах для восстановления шестивалентного хрома. И наконец, будет решена главная технологическая задача – окисление двухвалентного железа в процессе восстановления шестивалентного хрома [16]. Не потребуется защелачивание общего объема сточной воды до pH = 9,5, обусловленного условиями содержания гидроокиси железа (II). Исключится растворение гидроокиси хрома, вызванное высоким значением pH в отстойнике. Улучшится коагуляция взвесей и осаждение их в отстойниках, ранее затрудняемое присутствием железа (II). Многократно уменьшится расход щелочного реагента.

И наконец, снимется проблема выпуска сточных вод с заведомым превышением значением pH.

Количество образующихся жидких отходов напрямую связано со снижением выноса раствора из основных гальванических ванн, а также со стеканием раствора в промывочные ванны не только с изделий, но и приспособлений.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-216-223

Удельный вынос раствора электролита снижается с увеличением продолжительности стекания раствора над технологической ванной, при применении специальных устройств для обдувки или стряхивания раствора с изделий, а также использование для подвесного оборудования высококачественной изоляции с гладкой водоотталкивающей поверхностью и т.п.

Продолжительность стекания жидкости можно увеличить, если обеспечить следующее:

– установить над стационарными ваннами выносные штанги для выдерживания подвесок, поднятых из технологических ванн над зеркалом ванны;

– медленно выносить подвеску из технологической ванны при более быстром переносе её в следующую ванну;

– осуществить выбор оптимальных конструкций подвесок и барабанов, устройство между технологическими и промывными ваннами козырьков, обеспечивающих стекание упавших капель растворов обратно в технологическую ванну;

– выдерживание деталей над поверхностью ванны оптимального промежутка времени (на автоматических линиях должно быть заложено в программе), а также применение обдува, встряхивания и т. п. Только увеличение времени выдержки деталей над ваннами с 4 до 16 с сокращает вынос раствора и расход воды на промывку в три раза [17];

– существенное снижение количества «уносимого» деталями электролита можно достигнуть, если в состав электролитов ввести поверхностно-активные вещества, которые уменьшают величину поверхностного натяжения растворов. Подобным действием обладает, например, хлорамин, введение которого в ванну хромирования снижает величину поверхностного натяжения электролита с 740 до 310 мкН/см. В результате этого количество хромсодержащих соединений, уносимых в промывную воду, снижается на 40–45 % [7–10].

Наряду с указанными мероприятиями для снижения выноса раствора могут применяться и другие мероприятия, не требующие, как правило, значительных затрат. К таким мероприятиям относятся:

– установка между технологическими и промывными ваннами желобов (каплеуловительных мостиков) из антикоррозийного материала с наклоном в сторону технологической ванны, после которой следует промывка;

– правильное подвешивание изделий, обеспечивающих минимальный вынос раствора. Плоские изделия следует по возможности подвешивать вертикально, причем наименьшая сторона их должна располагаться по вертикальной оси. Изделия сложной конфигурации должны подвешиваться так, чтобы обеспечивалось хорошее обтекание. Для этого необходимо сделать дополнительные технологические отверстия в чашеобразных углублениях, вынутые из раствора изделия располагать отверстиями к зеркалу технологической ванны;

– выравнивание водосливов.

Мероприятия предлагаемые для реализации на очистных сооружениях.

1. Внедрение «попутных» технологий очистки сточных вод, содержащих свинец, фтор, комплексные соединении тяжёлых металлов, лакокрасочные загрязнения и др, реализуемые в рамках традиционных методов очистки сточных вод гальванического производства на тех же технологических линиях, теми же реагентами и при тех же параметрах проведения процессов, позволяет многократно уменьшить потребность в покупных реагентах, соответственно, снизить вторичное загрязнение сточных вод и во много раз уменьшить объём образующегося осадка в осветлителях [4, 5, 6, 17, 18].

3. Использование в системах очистки сточных вод высокопроизводительных автоматизированных реакторов с учётом их гидродинамических возможностей, правильной обвязкой их технологическими трубопроводами и с размещением чувствительных элементов систем автоматического регулирования (САР) в активных зонах ведения процессов. При этом САР, должны позволять использовать ОТР вместо покупных реагентов и обеспечивать оптимальную подачу их для ведения процессов очистки сточных вод [4, 5, 6, 21].

4. Применять не регенерируемые в основном производстве, отработанные технологические растворы в соответствии с их технологическими свойствами, вместо или совместно с покупными реагентами, что позволит многократно уменьшить их потребность и, соответственно, предотвратить вторичное загрязнение обрабатываемых сточных вод, а также снизить объём образующегося осадка [4, 6, 18].

5. Уменьшать объём концентрирования отработанных жидких отходов мембранными технологиями и др. перед термической их обработкой [4, 5, 6, 18, 19].

Внедрение даже части перечисленных методов на ОАО «БЭМЗ» позволило практически на порядок уменьшить объём подлежащего утилизации осадка [4, 10, 14, 17, 20], а может свести до его минимума с практическим отсутствием в нём ТМ. Упрощённая схема снижения объёмов жидких и твёрдых отходов в сточных водах, внедрённая на ОАО «БЭМЗ», приведена на рисунке 6.

Выводы

1. В результате исследований предложены технические решения по совершенствованию стокообразующих производств защитных покрытий и печатных плат предприятий приборо- и машиностроения, позволяющие многократно снизить потребность в «свежей» воде на технологические нужды и соответственно уменьшить потребность в покупных реагентах для проведения процессов очистки сточных вод.

2. Разработано оптимальное формирование потоков сточных вод у мест их образования, создающее предпосылки для обезвреживания комплексных соединений тяжёлых металлов, свинца и фтора в рамках традиционных очистных сооружений, т. е. на тех же технологических линиях, теми же реагентами, при тех же параметрах ведения процессов. Создана малосточная, малоотходная ресурсосберегающая технология реагентной очистки сточных вод предприятий приборо- и машиностроения, внедрённая на ОАО «БЭМЗ».

3. Разработана блок–схема и упрощённая схема ресурсосберегающей технологии очистки сточных вод и утилизации жидких и твёрдых отходов производств защитных покрытий и печатных плат внедрённой на ОАО «БЭМЗ».

Список цитированных источников

1. Рекомендации по проектированию водоснабжения и канализации цехов гальванических покрытий. Б3-79 : Госстрой СССР, СантехНИИпроект. – М.,1992. – 170 с.
2. Виноградов, С. С. Организация бессточных циклов нанесения покрытий / С. С. Виноградов // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2005. – Т. 13, № 4. – С. 37–54.
3. Виноградов, С. С. Организация гальванического производства. Оборудование, расчёт производства, нормирование / С. С. Виноградов ; под ред. проф. В. Н. Кудрявцева. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Глобус, 2005. – 240 с.
4. Урецкий, Е. А. Оптимизация существующих и разработка новых ресурсосберегающих технологий в водном хозяйстве предприятий приборо- и машиностроения : монография / Е. А. Урецкий, Е. С. Гогина, В. В. Мороз. – М. : Изд-во АСВ, 2022. – 624 с.
5. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии в водном хозяйстве промышленных предприятий : монография // Е. А. Урецкий ; под науч. ред. А. Д. Гуриновича ; под общ. ред. С. Е. Березина. – Брест : БрГТУ, 2007. – 396 с.
6. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии в водном хозяйстве промышленных предприятий : монография / Е. А. Урецкий. – Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 360 с.
7. Урецкий, Е. А. Опыт повторного использования сточных вод на предприятии приборо- и машиностроения / Е. А. Урецкий, Л. Д. Субботкин, В. В. Мороз // Строительство и техногенная безопасность : сб. науч. трудов. – Симферополь : НАПКС, 2018. – № 11 (63). – С. 98–103.
8. Урецкий, Е. А. Разработка и внедрение ресурсосберегающей технологии совместной очистки сточных вод гальванического и покрасочного производств / Е. А. Урецкий, В. В. Мороз, Л. Д. Субботкин // Строительство и техногенная безопасность : сб. науч. трудов. – Симферополь : НАПКС, 2017. – № 7 (60). – С. 87–92.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-216-223

I – кислотно-щелочные промывные сточные воды; II – промывные сточные воды, содержащие комплексные соединения ТМ; III – промывные содержащие хром сточные воды; IV –содержащие фтор промывные сточные воды; V – содержащие краску сточные воды; VI – растворы, содержащие товарный восстановитель; VII – кислый раствор, содержащий восстановитель; VIII – кислые растворы без окислителей; IX – кислые растворы с окислителями; X – Щелочные ОТР + раствор CaO; 1 – реактор нейтрализации всех видов стоков; 2 – реактор восстановления хрома; 3 – узел осветления сточных вод; 4 – узел глубокого осветления стоков на механических 4 и сорбционных фильтрах 4*; 5 – узел деминерализации стоков методом электродиализа; 6 – узел обессоливания ионообменом; 7 – узел обезвоживания осадка; 8 – узел термической обработки рассолов; 9 – объект утилизации осадков ПЗП и ППП; Потоки сточных вод: П1 – на собственные нужды; П2 – на неответственные промывки деталей в ПЗП и ППП; П3 – приготовление растворов

Рисунок 6 – Упрощённая схема снижения объёмов жидких и твёрдых отходов в сточных водах, внедрённой на ОАО «БЭМЗ»

9. Субботкин, Л. Д. Исследования процессов совместной физико-химической очистки сточных вод гальванического и покрасочного производства / Л. Д. Субботкин, Е. А. Урецкий, В. В. Мороз // Строительство и техногенная безопасность : сб. науч. трудов. – Симферополь : НАПКС, 2017. – № 9 (61). – С. 133–138.
10. Урецкий, Е. А. Оптимизация существующих и разработка новых ресурсосберегающих технологий в водном хозяйстве предприятий приборо- и машиностроения : монография / Е. А. Урецкий, Е. С. Гогина, В. В. Мороз. – М. : АСВ, 2023. – 618 с.
11. Проблемы и перспективы технических наук : сборник статей Международной научно-практической конференции, г. Уфа, 8 мая 2015 г. – Уфа : АЭТЕРНА, 2015. – 231 с.
12. Нормирование отходов производства : учебно-методическое пособие для студентов инженерных специальностей и слушателей Института повышения квалификации / В. М. Овчинников, А. В. Сторовойтов, В. А. Халиманчик, Т. В. Теслюк. – Гомель : БелГУТ, 2006. – 208 с.
13. Губанов, Л. Н. Ресурсосберегающие технологии в гальваническом производстве / Л. Н. Губанов // Вода и экология: проблемы и решения. – 2000. – № 2. – С. 27–31.
14. Новикова, О. К. Обработка осадков сточных вод : учеб.-метод. пособие / О. К. Новикова ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 96 с.
15. Окислительно-восстановительное титрование : учеб.-метод. пособие / сост.: А. Л. Подкорытов, Л. К. Неудачина, С. А. Штин ; М-во образования и науки Рос. Федерации ; Урал. Федер. ун-т. – Екатеринбург : Урал. ун-т, 2015. – 64 с.
16. Жилинский, В. В. Электрохимическая очистка сточных вод и водоподготовка : учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-48 01 04 Технология электрохимических производств / В. В. Жилинский, О. А. Слесаренко. – Минск : БГТУ, 2014. – 85 с.
17. Использование реагентов-осадителей в процессах очистки сточных вод гальванических производств : монография / С. Ю. Андреев, А. С. Кочергин, Т. В. Малютина, Т. В. Алексеева. – Пенза : ПГУАС, 2016. – 116 с.
18. Реагентная очистка сточных вод и утилизация отработанных растворов и осадков гальванических производств : учеб. пособие / Ю. П. Перелыгин, О. В. Зорькина, И. В. Рашевская, С. Н. Николаева. – Пенза : ПГУ, 2013. – 80 с.
19. Виноградов, С. С. Создание бессточных операций с помощью ванн улавливания / С. С. Виноградов // Пути и средства повышения экологической безопасности гальванических производств : тезисы докладов 7 Всероссийского научно-технического семинара, Москва, 21–24 мая, 2002. – М. : ВИМИ. 2002. – С. 3–5.
20. Васильева, Н. В. Водоотведение и очистка сточных вод : учебно-методическое пособие / Н. В. Васильева. – Горки : БГСХА, 2023. – 165 с.
21. Новикова, О. К. Водоснабжение промышленных предприятий : учеб. пособие / О. К. Новикова, А. М. Ратникова ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь ; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 223 с.

References

1. Rekomendacii po proektirovaniyu vodosnabzheniya i kanalizacii cekhov gal'vanicheskih pokrytij. BZ-79 : Gosstroj SSSR, SantekhNIIproekt. – M.,1992. – 170 s.
2. Vinogradov, S. S. Organizaciya besstochnyh ciklov naneseniya pokrytij / S. S. Vinogradov // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti. – 2005. – T. 13, № 4. – S. 37–54.
3. Vinogradov, S. S. Organizaciya gal'vanicheskogo proizvodstva. Oborudovanie, raschyot proizvodstva, normirovanie / S. S. Vinogradov ; pod red. prof. V. N. Kudryavceva. – Izd. 2-e, pererab. i dop. – M. : Globus, 2005. – 240 s.
4. Ureckij, E. A. Optimizaciya sushchestvuyushchih i razrabotka novyh resursosberegayushchih tekhnologij v vodnom hozyajstve predpriyatij priboro- i mashinostroeniya : monografiya / E. A. Ureckij, E. S. Gogina, V. V. Moroz. – M. : Izd-vo ASV, 2022. – 624 s.
5. Ureckij, E. A. Resursosberegayushchie tekhnologii v vodnom hozyajstve promyshlennyh predpriyatij : monografiya // E. A. Ureckij ; pod nauch. red. A. D. Gurinovicha ; pod obshch. red. S. E. Berezina. – Brest : BrGTU, 2007. – 396 s.
6. Ureckij, E. A. Resursosberegayushchie tekhnologii v vodnom hozyajstve promyshlennyh predpriyatij : monografiya / E. A. Ureckij. – Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 360 s.
7. Ureckij, E. A. Opyt povtornogo ispol'zovaniya stochnyh vod na predpriyatii priboro- i mashinostroeniya / E. A. Ureckij, L. D. Subbotkin, V. V. Moroz // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' : sb. nauch. trudov. – Simferopol' : NAPKS, 2018. – № 11 (63). – S. 98–103.
8. Ureckij, E. A. Razrabotka i vnedrenie resursosberegayushchej tekhnologii sovmestnoj ochistki stochnyh vod gal'vanicheskogo i pokrasochnogo proizvodstv / E. A. Ureckij, V. V. Moroz, L. D. Subbotkin // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' : sb. nauch. trudov. – Simferopol' : NAPKS, 2017. – № 7 (60). – S. 87–92.
9. Subbotkin, L. D. Issledovaniya processov sovmestnoj fiziko-himicheskoj ochistki stochnyh vod gal'vanicheskogo i pokrasochnogo proizvodstva / L. D. Subbotkin, E. A. Ureckij, V. V. Moroz // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' : sb. nauch. trudov. – Simferopol' : NAPKS, 2017. – № 9 (61). – S. 133–138.
10. Ureckij, E. A. Optimizaciya sushchestvuyushchih i razrabotka novyh resursosberegayushchih tekhnologij v vodnom hozyajstve predpriyatij priboro- i mashinostroeniya : monografiya / E. A. Ureckij, E. S. Gogina, V. V. Moroz. – M. : ASV, 2023. – 618 s.
11. Problemy i perspektivy tekhnicheskih nauk : sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, g. Ufa, 8 maya 2015 g. – Ufa : AETERNA, 2015. – 231 s.
12. Normirovanie othodov proizvodstva : uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov inzhenernyh special'nostej i slushatelej Instituta povysheniya kvalifikacii / V. M. Ovchinnikov, A. V. Storovojtov, V. A. Halimanchik, T. V. Teslyuk. – Gomel' : BelGUT, 2006. – 208 s.
13. Gubanov, L. N. Resursosberegayushchie tekhnologii v gal'vanicheskom proizvodstve / L. N. Gubanov // Voda i ekologiya: problemy i resheniya. – 2000. – № 2. – S. 27–31.
14. Novikova, O. K. Obrabotka osadkov stochnyh vod : ucheb.-metod. posobie / O. K. Novikova ; M-vo transp. i kommunikacij Resp. Belarus', Belorus. gos. un-t transp. – Gomel' : BelGUT, 2015. – 96 s.
15. Okislitel'no-vosstanovitel'noe titrovanie : ucheb.-metod. posobie / sost.: A. L. Podkorytov, L. K. Neudachina, S. A. SHtin ; M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii ; Ural. Feder. un-t. – Ekaterinburg : Ural. un-t, 2015. – 64 s.
16. ZHilinskij, V. V. Elektrohimicheskaya ochistka stochnyh vod i vodopodgotovka : ucheb.-metod. posobie dlya studentov special'nosti 1-48 01 04 Tekhnologiya elektrohimicheskih proizvodstv / V. V. ZHilinskij, O. A. Slesarenko. – Minsk : BGTU, 2014. – 85 s.
17. Ispol'zovanie reagentov-osaditelej v processah ochistki stochnyh vod gal'vanicheskih proizvodstv : monografiya / S. YU. Andreev, A. S. Kochergin, T. V. Malyutina, T. V. Alekseeva. – Penza : PGUAS, 2016. – 116 s.
18. Reagentnaya ochistka stochnyh vod i utilizaciya otrabotannyh rastvorov i osadkov gal'vanicheskih proizvodstv : ucheb. posobie / YU. P. Perelygin, O. V. Zor'kina, I. V. Rashevskaya, S. N. Nikolaeva. – Penza : PGU, 2013. – 80 s.
19. Vinogradov, S. S. Sozdanie besstochnyh operacij s pomoshch'yu vann ulavlivaniya / S. S. Vinogradov // Puti i sredstva povysheniya ekologicheskoj bezopasnosti gal'vanicheskih proizvodstv : tezisy dokladov 7 Vserossijskogo nauchno-tekhnicheskogo seminara, Moskva, 21–24 maya, 2002. – M. : VIMI. 2002. – S. 3–5.
20. Vasil'eva, N. V. Vodootvedenie i ochistka stochnyh vod : uchebno-metodicheskoe posobie / N. V. Vasil'eva. – Gorki : BGSKHA, 2023. – 165 s.
21. Novikova, O. K. Vodosnabzhenie promyshlennyh predpriyatij : ucheb. posobie / O. K. Novikova, A. M. Ratnikova ; M-vo transp. i kommunikacij Resp. Belarus' ; Belorus. gos. un-t transp. – Gomel' : BelGUT, 2021. – 223 s.

Материал поступил 03.02.2026, одобрен 25.02.2026, принят к публикации 03.03.2026

УДК 628.381.1:631.87:635.928

ВЛИЯНИЕ ПОЧВОГРУНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД И ОРГАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА КАЧЕСТВО ГАЗОНОВ

Н. Ф. Терлецкая[1], А. С. Антонюк[2], А. Н. Гапонюк[3]

[1] К. б. н., старший научный сотрудник, ГНУ «Полесский аграрно-экологический институт Национальной академии наук Беларуси», Брест, Беларусь, e-mail: klmvntsh@rambler.ru

[2] Научный сотрудник, ГНУ «Полесский аграрно-экологический институт Национальной академии наук Беларуси», Брест, Беларусь, e-mail: ant_sash@rambler.ru

[3] Научный сотрудник, ГНУ «Полесский аграрно-экологический институт Национальной академии наук Беларуси», Брест, Беларусь, e-mail: andnik2017@yandex.ru

Реферат

Одним из перспективных решений проблемы накопления осадков сточных вод является их совместное компостирование с органической частью твердых коммунальных отходов и использование в составе почвогрунтов, применяемых при озеленении.

В статье представлена сравнительная оценка качества газонов по показателям продуктивности побегообразования многолетних трав и декоративности травостоев на почвогрунте с использованием осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов и грунте насыпном, применяемом при благоустройстве городских территорий.

Установлено, что в год посева плотность газонного травостоя в опытном варианте (96,9–132,5 шт/100 см^2) была существенно выше, чем в контроле (81,8–98,3 шт/100 см^2). На почвогрунте с использованием осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов наблюдался сомкнуто-мозаичный характер сложения газонного травостоя, на грунте насыпном, применяемом для благоустройства городских территорий – мозаично-групповой и сомкнуто-мозаичный. В течение вегетационного периода качество газона на разработанном почвогрунте оценивалось как удовлетворительное и хорошее, на грунте насыпном – посредственное и удовлетворительное.

На второй год после посева качество газонного травостоя на разработанном почвогрунте было выше, чем в контроле, даже в периоды с повышенным температурным режимом и значительным дефицитом осадков. Продуктивность побегообразования многолетних трав в опытном варианте составила 90,7–131,9 шт/100 см^2, в контроле – 76,2–106,7 шт/100 см^2.

Результаты исследований показали перспективность применения почвогрунта с использованием осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов для повышения качества газонов при благоустройстве городских территорий.

Ключевые слова: почвогрунт, компост, осадки сточных вод, органическая часть твердых коммунальных отходов, продуктивность побегообразования газонных трав, декоративность газонных травостоев, качество газона.

INFLUENCE OF SOIL WITH THE USE OF SEWAGE SLUDGE AND ORGANIC PART OF MUNICIPAL SOLID WASTE ON THE QUALITY OF LAWNS

N. F. Tsiarletskaya, A. S. Antoniuk, A. N. Gaponiuk

Abstract

One of the promising solutions to the problem of accumulation of sewage sludge is its joint composting with the organic part of municipal solid waste and its use in the composition of soil used in landscaping.

The article presents a comparative assessment of the quality of lawns based on indicators of the productivity of shoot formation of perennial grasses and the decorativeness of grass stands on soil using sewage sludge and the organic part of municipal solid waste and bulk soil used in the improvement of urban areas.

It was found that in the year of sowing, the density of lawn grass in the experimental variant (96,9–132,5 pcs/100 cm^2) was significantly higher than in the control (81,8–98,3 pcs/100 cm^2). On the soil with sewage sludge and the organic part of municipal solid waste, a serried-tessellated nature of the formation of lawn grass was observed, on the bulk soil used for the improvement of urban areas – a tessellated-group and serried-tessellated nature. During the growing season, the quality of the lawn on the developed soil was assessed as satisfactory and good, on the bulk soil – mediocre and satisfactory.

In the second year after sowing, the quality of the lawn on the developed soil was higher than in the control, even in periods with an increased temperature regime and a significant deficit of precipitation. The productivity of shoot formation of perennial grasses in the experimental variant was 90,7–131,9 pcs/100 cm^2, in the control – 76,2–106,7 pcs/100 cm^2.

The research results demonstrated the potential of using soil containing sewage sludge and the organic portion of municipal solid waste to improve the quality of lawns in urban areas.

Keywords: soil, compost, sewage sludge, organic part of municipal solid waste, productivity of lawn grass shoots, ornamental properties of lawn grass stands, lawn quality.

Введение

В настоящее время при благоустройстве городских территорий актуальна проблема недостатка плодородных грунтов. Для выращивания высококачественных газонов требуются рыхлые, нейтральные, с оптимальным содержанием питательных веществ почвы [1]. Согласно [2], при озеленении на малоплодородных урбанизированных почвах необходимо добавление насыпного растительного грунта от 25 % до 75 % объема.

В то же время основная часть осадков сточных вод (ОСВ) коммунальных очистных сооружений, имеющих ресурсный потенциал для повышения плодородия почв, обусловленный наличием в их составе органического вещества и биогенных элементов, не используется и размещается на объектах хранения. В большинстве случаев это связано с тем, что в ОСВ содержится ряд поллютантов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. Тяжелые металлы, попадая в биогеохимический круговорот, вызывают

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-224-230

нарушение природных экосистем, снижают качество получаемой растениеводческой продукции, через пищевые цепи оказывают неблагоприятное воздействие на человека и животных [3].

Еще одной проблемой воздействия ОСВ на окружающую среду является загрязнение почвенного профиля присутствующими в них патогенными микроорганизмами [4]. Согласно [5], в ОСВ содержатся вирусы (гепатита, бациллы столбняка, бациллы брюшного тифа и др.), бактерии (сальмонеллы, бактерии рода *Shigella*, кишечная палочка, клостридиум и др.), дрожжевые и плесневые грибы, простейшие, нематоды и цестоды, яйца гельминтов, цисты патогенных кишечных простейших. Патогены могут относительно длительное время находиться в окружающей среде. Устойчивость вирусов зависит от температуры, влажности воздуха и интенсивности солнечной радиации. В теплое время года вирусы могут обнаруживаться в почве в течение 25 суток после внесения ОСВ. Сальмонеллы могут сохранять жизнеспособность в ОСВ в течение двух лет. Наиболее высокой устойчивостью отличаются яйца гельминтов и цисты простейших. Согласно литературным данным, личинки гельминтов могут сохранять жизнеспособность до пяти лет [5].

Негативное воздействие ОСВ на окружающую среду требует поиска рациональных путей их утилизации. Одним из наиболее оптимальных и перспективных решений проблемы накопления ОСВ является компостирование, осуществляемое с целью обеззараживания, стабилизации и подготовки их к применению в удобрительных целях. В качестве наполнителей могут использоваться различные субстраты, в частности, органическая часть твердых коммунальных отходов (ОТКО). Благодаря высокой адсорбционной способности большинства наполнителей снижается влажность ОСВ и улучшаются их физические свойства. В термофильной фазе компостирования происходит саморазогрев перерабатываемого материала до температуры выше 60 °С. В результате термического воздействия погибает большинство патогенных микроорганизмов, а также снижается всхожесть семян сорных растений [6–8]. Одним из основных факторов, лимитирующих применение ОСВ и компостов на их основе в качестве удобрений или компонентов плодородного грунта при озеленении, является наличие в них тяжелых металлов. Накопление в готовом компосте гумусовых веществ, обладающих высокой емкостью поглощения, а также использование сорбентов способствуют снижению подвижности тяжелых металлов [9, 10], однако они практически не подвергаются биологическому разложению и аккумулируются в компостах, в связи с чем при использовании данных отходов, обязательна оценка полученной продукции на соответствие требованиям безопасности [11].

К компостам на основе ОСВ и ОТКО добавляют торф, песок (минеральный грунт) и другие компоненты для получения почвогрунтов, сбалансированных по элементам минерального питания и гранулометрическому составу. Процентное содержание компонентов в почвогрунтах определяется их составом и биологическими особенностями растений. Технологический процесс производства почвогрунтов включает в себя заготовку компонентов и их смешивание с использованием фронтальных ковшовых погрузчиков, дробильных и смешивающих агрегатов, барабанных просеивателей-грохотов и др.

Согласно литературным данным [12–18], применение почвогрунтов с использованием ОСВ и ОТКО рекомендуется при благоустройстве городских территорий для улучшения качества газонов: отмечается более интенсивный рост растений, газонный покров приобретает насыщенно-зеленый цвет, увеличивается плотность травостоев и срок их эксплуатации.

Целью наших исследований являлась оценка качества газонов на почвогрунте с использованием ОСВ и ОТКО.

Материалы и методика исследования

В опыте применялся почвогрунт, полученный при смешивании компоста с использованием ОСВ и ОТКО (20 %) и грунта насыпного, применяемого при благоустройстве городских территорий (80 %) [19]. Компост, используемый для производства почвогрунта, соответствовал требованиям для органических удобрений группы II по СТБ 2668–2024 «Органические удобрения, почвогрунты и субстраты для рекультивации с использованием осадков сточных вод» [20, 21]. Разработанный почвогрунт соответствовал требованиям ТУ BY 290061754.010–2025 для почвогрунта марки «Универсальный» [19]. В качестве контроля выбран грунт насыпной, применяемый при благоустройстве городских территорий.

Определение общего азота осуществлялось по ГОСТ 26107–84 [22], подвижных соединений фосфора и калия – по ГОСТ 26207–91 [23], валового содержания химических элементов – по ГОСТ ISO 22036 [24].

В применяемом почвогрунте содержание общего азота составило 0,36 %, подвижных соединений фосфора – 1149,55 мг/кг, калия – 429,64 мг/кг, в насыпном грунте – 0,07 %, 124 мг/кг и 45 мг/кг соответственно.

В таблице 1 приведены данные по содержанию химических элементов в насыпном грунте, применяемом при благоустройстве городских территорий, и разработанном почвогрунте.

Таблица 1 – Содержание валовых форм химических элементов в насыпном грунте и разработанном почвогрунте, мг/кг сухого вещества

Наименование образца	Pb	Cd	As	Hg	Cu	Zn	Mn	Ni	Co	Cr	Mo	Sb
Грунт насыпной	5,29	0,01	1,05	н/о	3,34	17,76	137,70	3,75	1,75	9,66	0,01	н/о
Разработанный почвогрунт	7,00	0,08	1,37	н/о	7,25	33,40	103,00	4,90	1,98	9,67	0,15	н/о

Примечание – н/о – ниже предела обнаружения. Нижняя граница диапазона измерений для Hg составляет 0,07 мг/кг, для Sb – 0,13 мг/кг.

При создании газона проводилось предварительное вспахивание основания участка на глубину 10–15 см. На основание насыпался почвогрунт с использованием ОСВ и ОТКО слоем толщиной 15–20 см. Затем проводилось тщательное выравнивание поверхности участка для дальнейшего посева газонных трав.

В опыте использовалась травосмесь, состоящая из райграса пастбищного Юбилей ЕГ (20 %), райграса пастбищного Торфгольд (25 %), овсяницы красной Диппер (30 %), овсяницы тростниковой Маниту (15 %) и мятлика лугового Маркус (10 %).

Проводился весенний посев газонных трав перекрестным способом вручную в сухую безветренную погоду. После заделки семян поверхность участка прикатывалась катком для лучшего их контакта с почвой. После посева осуществлялся полив газона из расчета 10 л воды на 1 м^2, не допуская размыва поверхности.

Оценка качества газонов проводилась в 2023–2024 гг. по показателям продуктивности побегообразования и декоративности травостоев по методике А. А. Лаптева (1983) [25]. Статистическая обработка данных осуществлялась в программе Microsoft Excel.

Качество газонных травостоев

В год создания газона сложились относительно благоприятные погодные условия [26] для роста и развития многолетних злаковых трав. Через два месяца после посева плотность газонного травостоя на почвогрунте с использованием ОСВ и ОТКО составила 96,9 шт/100 см^2. Полученная продуктивность побегообразования газонных трав оценивается четырьмя баллами по шестибалльной шкале. На грунте насыпном, используемом при благоустройстве городских территорий, густота побегов многолетних трав была существенно ниже – 81,8 шт/100 см^2 ($НСР_{05}$ = 5,27 шт/100 см^2), что соответствует трем баллам. В контроле отмечался мозаично-групповой характер сложения газонных травостоев (3 балла по пятибалльной шкале для оценки декоративности газона), в опытном варианте – сомкнуто-мозаичный (4 балла). В результате комплексной оценки установлено, что газонный травостой на почвогрунте с использованием ОСВ и ОТКО имеет удовлетворительное качество (16 баллов по тридцатибалльной шкале), на грунте насыпном, применяемом при благоустройстве городских территорий, – посредственное (9 баллов) (рисунок 1).

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-224-230



а) б)

а) газон в опытном варианте; б) газон в контрольном варианте
Рисунок 1 – Качество газонных травостоев (июнь 2023 г.)

В августе диапазон различий по количеству побегов на единицу площади в опытном (132,5 шт/100 см^2) и контрольном (98,3 шт/100 см^2, $НСР_{05}$ = 7,92 шт/100 см^2) вариантах еще более увеличился. Для полесской природной зоны продуктивность побегообразования газонных трав на почвогрунте с использованием ОСВ и ОТКО являлась отличной, на грунте насыпном, применяемом при благоустройстве городских территорий, – хорошей. Декоративность газонных травостоев в опытном и контрольном вариантах по пятибалльной шкале оценивалась четырьмя баллами. Согласно результатам комплексной оценки газонных травостоев, в августе качество газона на почвогрунте с использованием ОСВ и ОТКО было хорошим (20 баллов), в контроле на грунте насыпном – удовлетворительным (16 баллов) (рисунок 2).

Таким образом, на почвогрунте с использованием ОСВ и ОТКО уже в год посева был сформирован достаточно густой, хорошего качества газонный травостой.



а) б)

а) газон в опытном варианте; б) газон в контрольном варианте
Рисунок 2 – Качество газонных травостоев (август 2023 г.)

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-224-230

Важным показателем при оценке газонных трав является устойчивость к повреждениям в зимний период и восстанавливаемость весной. При этом учитывается способность многолетних трав к побегообразованию [27]. Согласно литературным данным [28], увеличение плотности на второй год жизни отмечается у травостоев овсяницы красной, мятлика лугового и овсяницы тростниковой.

Овсяница красная обладает хорошей холодостойкостью и зимостойкостью. В травостое преобладают многочисленные прикорневые вегетативные побеги, формирующие плотный долголетний газон [29]. Мятлик луговой во второй и третий годы жизни также формирует травостои хорошего и отличного качества [28]. Исследования показали [30], что если в травостое газона холодостойких злаков менее 50 %, то газон плохо зимует и отрастание трав весной задерживается.

По сравнению с мятликом луговым и овсяницей красной, райграс пастбищный быстрее развивается в год посева, образуя к осени густой травостой из вегетативных побегов и прикорневых листьев [31, 32]. Данная культура характеризуется невысокой зимостойкостью. Одной из причин является неглубокое залегание узла кущения от поверхности почвы: в первый год жизни – 13 мм, во второй – 11 мм, в третий – 8 мм [31, 33]. Райграс пастбищный хорошо приспособлен к условиям умеренного влажного климата с мягкими зимами. При благоприятных условиях райграс пастбищный на второй год жизни формирует травостой газонного типа отличного качества [28]. Также отмечается, что травостои райграса пастбищного, которые имели после зимы низкую декоративность из-за изреженности растений, к середине вегетации, как правило, восстанавливаются и характеризуются равномерным покрытием [33].

Погодные условия зимнего периода 2023–2024 гг. в районе проведения исследований были достаточно благоприятными для перезимовки многолетних злаковых трав. В первых двух декадах апреля средняя температура воздуха была выше климатической нормы, в третьей декаде наблюдался устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через 10 °С в сторону повышения. На протяжении всего месяца отмечалось хорошее увлажнение верхнего десятисантиметрового слоя почвы [34]. Такие погодные условия положительно отразились на весеннем отрастании газонного травостоя, состоящего из овсяницы красной, мятлика лугового, райграса пастбищного и овсяницы тростниковой. В апреле качество газона на почвогрунте с использованием ОСВ и ОТКО было хорошим, в контроле – удовлетворительным (таблица 2).

Таблица 2 – Качество газонов на второй год после посева

Вариант опыта	Оценка продуктивности побегообразования газонных трав		Оценка декоративности газонных травостоев		Комплексная оценка качества газонных травостоев	
	Количество побегов на 100 см^2, шт.	Балл	Характер сложения (смыкаемости) травостоя (размещения побегов)	Балл	Балл	Качество
Апрель						
Грунт насыпной	91,6	4	Сомкнуто-мозаичный	4	16	Удовлетворительное
Почвогрунт с ОСВ и ОТКО	118,6	5	Сомкнуто-мозаичный	4	20	Хорошее
$НСР_{05}$	8,15					
Май						
Грунт насыпной	77,5	3	Мозаично-групповой	3	9	Посредственное
Почвогрунт с ОСВ и ОТКО	94,6	4	Сомкнуто-мозаичный	4	16	Удовлетворительное
$НСР_{05}$	8,50					
Июнь						
Грунт насыпной	96,0	4	Сомкнуто-мозаичный	4	16	Удовлетворительное
Почвогрунт с ОСВ и ОТКО	123,6	5	Сомкнуто-мозаичный	4	20	Хорошее
$НСР_{05}$	9,00					
Июль						
Грунт насыпной	106,7	5	Сомкнуто-мозаичный	4	20	Хорошее
Почвогрунт с ОСВ и ОТКО	131,9	5	Сомкнуто-мозаичный	4	20	Хорошее
$НСР_{05}$	8,08					
Август						
Грунт насыпной	91,4	4	Сомкнуто-мозаичный	4	16	Удовлетворительное
Почвогрунт с ОСВ и ОТКО	109,5	5	Сомкнуто-мозаичный	4	20	Хорошее
$НСР_{05}$	8,59					
Сентябрь						
Грунт насыпной	76,2	3	Мозаично-групповой	3	9	Посредственное
Почвогрунт с ОСВ и ОТКО	90,7	4	Сомкнуто-мозаичный	4	16	Удовлетворительное
$НСР_{05}$	5,57					

В мае средняя температура воздуха была выше климатической нормы, а также отмечался значительный дефицит осадков [34]. Поскольку исследования проводились в условиях естественного увлажнения, неблагоприятные погодные условия способствовали ухудшению качества газона как на грунте насыпном, применяемом при благоустройстве городских территорий, так и на почвогрунте с использованием ОСВ и ОТКО (таблица 2).

В следующие два месяца влагообеспеченность растений существенно улучшилась [34], что способствовало кущению многолетних трав и, соответственно, увеличению плотности газонных травостоев в опытном и контрольном вариантах (рисунок 3). На почвогрунте с использованием ОСВ и ОТКО продуктивность побегообразования газонных трав в июне составила 123,6 шт/100 см^2, в июле – 131,9 шт/100 см^2. Для условий полесской природной зоны такая плотность травостоев оценивается как отличная. На грунте насыпном, применяемом при благоустройстве городских территорий, густота травостоя составила, соответственно, 96,0 шт/100 см^2 (4 балла) и 106,7 шт/100 см^2 (5 баллов).

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-224-230



а) б)

а) газон в опытном варианте; б) газон в контрольном варианте
Рисунок 3 – Качество газонных травостоев (июнь 2024 г.)

В августе недостаток почвенной влаги и повышенный температурный режим [34] способствовали замедлению роста газонных трав и уменьшению продуктивности побегообразования. Однако, на почвогрунте с использованием ОСВ и ОТКО, несмотря на снижение плотности побегов, качество газона оставалось хорошим (таблица 2).

В сентябре сохраняющаяся сухая погода в сочетании с повышенным температурным режимом [34] способствовали значительному уменьшению плотности газонных травостоев и появлению признаков усыхания растений. В условиях длительного периода дефицита осадков продуктивность побегообразования многолетних злаковых трав на почвогрунте с использованием ОСВ и ОТКО снизилась до 90,7 шт/100 см^2, на грунте насыпном, применяемом при благоустройстве городских территорий, – до 76,2 шт/100 см^2. Таким образом, качество газона в опыте оценено как удовлетворительное, в контроле – посредственное.

Заключение

На почвогрунте с использованием ОСВ и ОТКО уже в год посева получен газон хорошего качества (20 баллов по тридцатибалльной шкале) с высокой продуктивностью побегообразования многолетних злаковых трав. На грунте насыпном, применяемом при благоустройстве городских территорий, отмечалась более низкая плотность травостоя, что отразилось на оценке качества газона (16 баллов).

На второй год после посева качество газонного травостоя на почвогрунте с использованием ОСВ и ОТКО было неизменно выше, чем в контроле на насыпном грунте, несмотря на неблагоприятные погодные условия, сложившиеся в начале и в конце вегетационного периода. Плотность травостоя на разработанном почвогрунте составила 90,7–131,9 шт/100 см^2, характер сложения – сомкнуто-мозаичный. На грунте насыпном, применяемом при благоустройстве городских территорий, количество побегов многолетних трав составило 76,2–106,7 шт. на 100 см^2, характер сложения газонного травостоя – мозаично-групповой и сомкнуто-мозаичный.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории гидроэкологии и экотехнологий, лаборатории биогеохимии Полесского аграрно-экологического института НАН Беларуси за проведение аналитических исследований по оценке агрохимического состава и содержания химических элементов в почвогрунтах.

Список цитированных источников

1. Утилизация органических отходов при создании и выращивании газонов / А. Д. Средин, Д. И. Мухортов, Е. М. Романов, К. А. Копылов // Экология урбанизированных территорий. – 2010. – № 2. – С. 78–83.
2. Шершнева, Е. С. Влияние почвенных грунтов на основе осадков сточных вод кожевенного производства на агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы / Е. С. Шершнева, С. Д. Карякина // Вестник РГАТУ. – 2020. – № 2 (46). – С. 130–137. – DOI: 10.36508/rsatu.2020.78.76.021.
3. Головатый, С. Е. Тяжелые металлы в агроэкосистемах / С. Е. Головатый. – Минск : Институт почвоведения и агрохимии, 2002. – 240 с.
4. Дрегуло, А. М. Иловые площадки как специфические объекты прошлого экологического ущерба (в частном бассейне Финского залива) / А. М. Дрегуло, В. В. Кулибаба, И. М. Гильдеева // Общество. Среда. Развитие. – 2016. – № 3. – С. 115–119.
5. Янин, Е. П. Осадки городских сточных вод как источник биологического загрязнения окружающей среды / Е. П. Янин // Экологическая экспертиза. – 2009. – № 2. – С. 48–77.
6. Обезвреживание отходов методом экологической биотехнологии / Ю. В. Корчевская, А. А. Кадысева, Г. А. Горелкина [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – № 3 (137). – С. 170–173.
7. Комплексная утилизация осадков городских сточных вод с получением техногенного почвогрунта / М. В. Быкова, Д. М. Малюхин, Д. О. Нагорнов, А. А. Дука // Записки горного института. – 2024. – Т. 267. – С. 453–465.
8. Технологические направления по переработке органических отходов / С. Ю. Миронов, М. В. Протасова, Е. П. Проценко [и др.] // AUDITORIUM. Электронный научный журнал Курского государственного университета. – 2017. – № 1 (13). – С. 30–42.
9. Шибаева, М. Е. Регулирование содержания тяжелых металлов в растениях с помощью инокулированных компостов / М. Е. Шибаева, И. А. Архипченко // Экология и промышленность России. – 2006. – № 8. – С. 33–35.
10. Лучицкая, О. А. Использование компоста на основе осадка сточных вод в цветоводстве / О. А. Лучицкая, С. М. Севостьянов // Агрохимический вестник. – 2010. – № 2. – С. 36–38.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-224-230

11. Малюхин, Д. М. Экологические аспекты использования органогенных субстратов при рекультивации полигонов твердых коммунальных отходов : дис. … канд. геогр. наук : 25.00.36 / Малюхин Дмитрий Михайлович ; Российский гос. гидрометеорологический ун-т. – СПб., 2020. – 165 л.
12. Романов, Е. М. Утилизация органических отходов при выращивании дернины для газонов / Е. М. Романов, Д. И. Мухортов, А. Д. Средин // Вестник Марийского государственного технического университета. – 2010. – № 1 (8). – С. 69–74.
13. Получение почвогрунтов на основе компоста из ТБО / О. В. Орлова, Е. Д. Гущина, В. А. Арсентьев [и др.] // Экология и промышленность России. – 2007. – № 12. – С. 14–16.
14. Варламова, Л. Д. Эколого-агрохимическая оценка и оптимизация применения в качестве удобрений органосодержащих отходов производства : автореф. дис. … д-ра с.-х. наук : 06.01.04 / Варламова Лариса Дмитриевна ; Морд. гос. ун-т им. Н. П. Огарева. – Саранск, 2007. – 42 с.
15. Перспективные безотходные технологии обработки осадка сточных вод для Московских очистных сооружений / М. Н. Козлов, О. В. Мойжес, Ю. А. Николаев [и др.] // Вода. – 2010. – № 10. – С. 19–22.
16. Опыт применения осадков водоподготовки в производстве почвогрунтов / К. Е. Хренов, Е. В. Шушкевич, М. Н. Козлов [и др.] // Вода. – 2011. – № 12. – С. 20–24.
17. Приемы улучшения качества органосодержащих отходов, используемых для удобрения / Л. Д. Варламова, В. Г. Бусоргин, И. Д. Короленко, Н. А. Сонина // Агрохимический вестник. – 2011. – № 2. – С. 16–18.
18. Вавилова, Л. В. Оценка микробиологического и физико-химического качества почвогрунта на основе осадка сточных вод / Л. В. Вавилова, Е. В. Савенко // Актуальные вопросы науки и образования. – 2022. – № 2. – С. 29–33.
19. Почвогрунты с использованием осадков сточных вод коммунальных очистных сооружений и органической части твердых коммунальных отходов : ТУ BY 290061754.010–2025. – URL: https://gskp.by/produkcija/item/pochvogrunt-universalny-209042 (дата обращения: 17.11.2025).
20. Удобрения органические, почвогрунты и субстраты для рекультивации с использованием осадков сточных вод. Общие технические условия : СТБ 2668-2024. – Введ. 01.04.2025. – Минск : Госстандарт, 2024. – 14 с.
21. Компостирование осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов / Н. Ф Терлецкая, А. С. Антонюк, А. Н. Гапонюк, А. И. Чухольский // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 100–109.
22. Почвы. Методы определения общего азота : ГОСТ 26107–84. – Введ. 01.01.1985. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 12 с.
23. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО : ГОСТ 26207–91. – Введ. 01.07.1993. – М. : Изд-во стандартов, 1992. – 6 с.
24. Качество почвы. Определение микроэлементов в экстрактах почвы с использованием атомно-эмиссионной спектрометрии индуктивно связанной плазмы (ИСП-АЭС) : ГОСТ ISO 22036–2014. – Введ. 01.07.2015. – М. : Стандартинформ, 2015. – 27 с.
25. Лаптев, А. А. Газоны / А. А. Лаптев. – Киев : Наук. думка, 1983. – 176 с.
26. Погода и климат. – URL: http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php (дата обращения: 04.10.2023).
27. Восстанавливаемость газонного травостоя в зависимости от видового состава / Т. Б. Тодорхоева, О. Ю. Давыдова, Е. А. Батоева, Л. С. Мункуев // Научное обеспечение развития АПК и сельских территорий Байкальского региона : материалы науч.-практ. конф., посвящ. Дню Российской науки, г. Улан-Удэ, 05–09 фев. 2018 г. / Бурятская гос. с.-х. акад. им. В. Р. Филиппова. – Улан-Удэ, 2018. – С. 65–68.
28. Тодорхоева, Т. Б. Комплексная оценка разных видов и сортов многолетних трав и их травосмесей при пастбищном, укосном и газонном использовании в условиях Центрального региона Российской Федерации : автореф. дис. … канд. с.-х. наук : 06.01.12 / Тодорхоева Туяна Борисовна ; Рос. гос. аграрн. ун-т – Моск. с.-х. акад. им. К. А. Тимирязева. – М., 2006. – 18 с.
29. Субботина, Я. В. Влияние агротехнических приемов ухода на качество газонных покрытий из травосмесей с овсяницей красной / Я. В. Субботина // Агротехнологии XXI века : материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Пермь, 16–18 окт. 2018 г. / Пермский гос. агр.-технол. ун-т им. акад. Д. Н. Прянишникова ; ред.: Ю. Н. Зубарев [и др.]. – Пермь, 2018. – С. 88–93.
30. Видовой состав и соотношение компонентов газонных травосмесей для детских игровых площадок Предбайкалья / И. С. Шеметова, Ш. К. Хуснидинов, И. И. Шеметов, Т. Г. Кудрявцева // Вестник ИрГСХА. – 2011. – № 44-1. – С. 152–157.
31. Эколого-биологические и технологические основы возделывания райграса / В. Н. Золотарев, А. А. Зотов, Б. М. Кошен [и др.]. – Астана : Типография ИП Жанадилова С. Т., 2008. – 739 с.
32. Тодорхоева, Т. Б. Формирование декоративных покрытий разными видами низовых мятликовых трав / Т. Б. Тодорхоева // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова. – 2009. – № 4 (17). – С. 73–75.
33. Уразова, Л. Д. Изучение образцов райграса пастбищного (Lolium perenne L.) в таежной зоне Западной Сибири / Л. Д. Уразова, О. В. Литвинчук, А. Б. Сайнакова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – № 7 (225). – С. 24–28. – DOI: 10.53083/1996-4277-2023-225-7-24-28.
34. Агрометеорология. – URL: https://pogoda.by/observation/agro (даты обращения: 18.04.2024; 20.06.2024; 28.08.2024; 07.10.2024).

References

1. Utilizaciya organicheskih othodov pri sozdanii i vyrashchivanii gazonov / A. D. Sredin, D. I. Muhortov, E. M. Romanov, K. A. Kopylov // Ekologiya urbanizirovannyh territorij. – 2010. – № 2. – S. 78–83.
2. SHershneva, E. S. Vliyanie pochvennyh gruntov na osnove osadkov stochnyh vod kozhevennogo proizvodstva na agrohimicheskie pokazateli dernovo-podzolistoj pochvy / E. S. SHershneva, S. D. Karyakina // Vestnik RGATU. – 2020. – № 2 (46). – S. 130–137. – DOI: 10.36508/rsatu.2020.78.76.021.
3. Golovatyj, S. E. Tyazhelye metally v agroekosistemah / S. E. Golovatyj. – Minsk : Institut pochvovedeniya i agrohimii, 2002. – 240 s.
4. Dregulo, A. M. Ilovye ploshchadki kak specificheskie ob"ekty proshlogo ekologicheskogo ushcherba (v chastnom bassejne Finskogo zaliva) / A. M. Dregulo, V. V. Kulibaba, I. M. Gil'deeva // Obshchestvo. Sreda. Razvitie. – 2016. – № 3. – S. 115–119.
5. YAnin, E. P. Osadki gorodskih stochnyh vod kak istochnik biologicheskogo zagryazneniya okruzhayushchej sredy / E. P. YAnin // Ekologicheskaya ekspertiza. – 2009. – № 2. – S. 48–77.
6. Obezvrezhivanie othodov metodom ekologicheskoj biotekhnologii / YU. V. Korchevskaya, A. A. Kadyseva, G. A. Gorelkina [i dr.] // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2016. – № 3 (137). – S. 170–173.
7. Kompleksnaya utilizaciya osadkov gorodskih stochnyh vod s polucheniem tekhnogennogo pochvogrunta / M. V. Bykova, D. M. Malyuhin, D. O. Nagornov, A. A. Duka // Zapiski gornogo instituta. – 2024. – T. 267. – S. 453–465.
8. Tekhnologicheskie napravleniya po pererabotke organicheskih othodov / S. YU. Mironov, M. V. Protasova, E. P. Procenko [i dr.] // AUDITORIUM. Elektronnyj nauchnyj zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2017. – № 1 (13). – S. 30–42.
9. SHibaeva, M. E. Regulirovanie soderzhaniya tyazhelyh metallov v rasteniyah s pomoshch'yu inokulirovannyh kompostov / M. E. SHibaeva, I. A. Arhipchenko // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. – 2006. – № 8. – S. 33–35.
10. Luchickaya, O. A. Ispol'zovanie komposta na osnove osadka stochnyh vod v cvetovodstve / O. A. Luchickaya, S. M. Sevost'yanov // Agrohimicheskij vestnik. – 2010. – № 2. – S. 36–38.
11. Malyuhin, D. M. Ekologicheskie aspekty ispol'zovaniya organogennyh substratov pri rekul'tivacii poligonov tverdyh kommunal'nyh othodov : dis. … kand. geogr. nauk : 25.00.36 / Malyuhin Dmitrij Mihajlovich ; Rossijskij gos. gidrometeorologicheskij un-t. – SPb., 2020. – 165 l.
12. Romanov, E. M. Utilizaciya organicheskih othodov pri vyrashchivanii

deminy dlya gazonov / E. M. Romanov, D. I. Muhortov, A. D. Sredin // Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2010. – № 1 (8). – S. 69–74.
13. Poluchenie pochvogruntov na osnove komposta iz TBO / O. V. Orlova, E. D. Gushchina, V. A. Arsent'ev [i dr.] // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. – 2007. – № 12. – S. 14–16.
14. Varlamova, L. D. Ekologo-agrohimicheskaya ocenka i optimizaciya primeneniya v kachestve udobrenij organosoderzhashchih othodov proizvodstva : avtoref. dis. … d-ra s.-h. nauk : 06.01.04 / Varlamova Larisa Dmitrievna ; Mord. gos. un-t im. N. P. Ogareva. – Saransk, 2007. – 42 s.
15. Perspektivnye bezothodnye tekhnologii obrabotki osadka stochnyh vod dlya Moskovskih ochistnyh sooruzhenij / M. N. Kozlov, O. V. Mojzhes, YU. A. Nikolaev [i dr.] // Voda. – 2010. – № 10. – S. 19–22.
16. Opyt primeneniya osadkov vodopodgotovki v proizvodstve pochvogruntov / K. E. Hrenov, E. V. SHushkevich, M. N. Kozlov [i dr.] // Voda. – 2011. – № 12. – S. 20–24.
17. Priemy uluchsheniya kachestva organosoderzhashchih othodov, ispol'zuemyh dlya udobreniya / L. D. Varlamova, V. G. Busorgin, I. D. Korolenko, N. A. Sonina // Agrohimicheskij vestnik. – 2011. – № 2. – S. 16–18.
18. Vavilova, L. V. Ocenka mikrobiologicheskogo i fiziko-himicheskogo kachestva pochvogrunta na osnove osadka stochnyh vod / L. V. Vavilova, E. V. Savenko // Aktual'nye voprosy nauki i obrazovaniya. – 2022. – № 2. – S. 29–33.
19. Pochvogrunty s ispol'zovaniem osadkov stochnyh vod kommunal'nyh ochistnyh sooruzhenij i organicheskoj chasti tverdyh kommunal'nyh othodov : TU BY 290061754.010–2025. – URL: https://gskp.by/produkcija/item/pochvogrunt-universalny-209042 (data obrashcheniya: 17.11.2025).
20. Udobreniya organicheskie, pochvogrunty i substraty dlya rekul'tivacii s ispol'zovaniem osadkov stochnyh vod. Obshchie tekhnicheskie usloviya : STB 2668-2024. – Vved. 01.04.2025. – Minsk : Gosstandart, 2024. – 14 s.
21. Kompostirovanie osadkov stochnyh vod i organicheskoj chasti tverdyh kommunal'nyh othodov / N. F Terleckaya, A. S. Antonyuk, A. N. Gaponyuk, A. I. CHuhol'skij // Prirodopol'zovanie. – 2025. – № 1. – S. 100–109.
22. Pochvy. Metody opredeleniya obshchego azota : GOST 26107–84. – Vved. 01.01.1985. – M. : Izd-vo standartov, 1984. – 12 s.
23. Pochvy. Opredelenie podvizhnyh soedinenij fosfora i kaliya po metodu Kirsanova v modifikacii CINAO : GOST 26207–91. – Vved. 01.07.1993. – M. : Izd-vo standartov, 1992. – 6 s.
24. Kachestvo pochvy. Opredelenie mikroelementov v ekstraktah pochvy s ispol'zovaniem atomno-emissionnoj spektrometrii induktivno svyazannoj plazmy (ISP-AES) : GOST ISO 22036–2014. – Vved. 01.07.2015. – M. : Standartinform, 2015. – 27 s.
25. Laptev, A. A. Gazony / A. A. Laptev. – Kiev : Nauk. dumka, 1983. – 176 s.
26. Pogoda i klimat. – URL: http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php (data obrashcheniya: 04.10.2023).
27. Vosstanavlivaemost' gazonnogo travostoya v zavisimosti ot vidovogo sostava / T. B. Todorhoeva, O. YU. Davydova, E. A. Batoeva, L. S. Munkuev // Nauchnoe obespechenie razvitiya APK i sel'skih territorij Bajkal'skogo regiona : materialy nauch.-prakt. konf., posvyashch. Dnyu Rossijskoj nauki, g. Ulan-Ude, 05–09 fev. 2018 g. / Buryatskaya gos. s.-h. akad. im. V. R. Filippova. – Ulan-Ude, 2018. – S. 65–68.
28. Todorhoeva, T. B. Kompleksnaya ocenka raznyh vidov i sortov mnogoletnih trav i ih travosmesej pri pastbishchnom, ukosnom i gazonnom ispol'zovanii v usloviyah Central'nogo regiona Rossijskoj Federacii : avtoref. dis. … kand. s.-h. nauk : 06.01.12 / Todorhoeva Tuyana Borisovna ; Ros. gos. agrarn. un-t – Mosk. s.-h. akad. im. K. A. Timiryazeva. – M., 2006. – 18 s.
29. Subbotina, YA. V. Vliyanie agrotekhnicheskih priemov uhoda na kachestvo gazonnyh pokrytij iz travosmesej s ovsyanicej krasnoj / YA. V. Subbotina // Agrotekhnologii XXI veka : materialy Mezhdanar. nauch.-prakt. konf., g. Perm', 16–18 okt. 2018 g. / Permskij gos. agr.-tekhnol. un-t im. akad. D. N. Pryanishnikova ; red.: YU. N. Zubarev [i dr.]. – Perm', 2018. – S. 88–93.
30. Vidovoj sostav i sootnoshenie komponentov gazonnyh travosmesej dlya detskih igrovyh ploshchadok Predbajkal'ya / I. S. SHemetova, SH. K. Husnidinov, I. I. SHemetov, T. G. Kudryavceva // Vestnik IrGSKHA. – 2011. – № 44-1. – S. 152–157.
31. Ekologo-biologicheskie i tekhnologicheskie osnovy vozdelyvaniya rajgrasa / V. N. Zolotarev, A. A. Zotov, B. M. Koshen [i dr.]. – Astana : Tipografiya IP ZHanadilova S. T., 2008. – 739 s.
32. Todorhoeva, T. B. Formirovanie dekorativnyh pokrytij raznymi vidami nizovyh myatlikovyh trav / T. B. Todorhoeva // Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii im. V. R. Filippova. – 2009. – № 4 (17). – S. 73–75.
33. Urazova, L. D. Izuchenie obrazcov rajgrasa pastbishchnogo (Lolium perenne L.) v taezhnoj zone Zapadnoj Sibiri / L. D. Urazova, O. V. Litvinchuk, A. B. Sajnakova // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – № 7 (225). – S. 24–28. – DOI: 10.53083/1996-4277-2023-225-7-24-28.
34. Agrometeorologiya. – URL: https://pogoda.by/observation/agro (daty obrashcheniya: 18.04.2024; 20.06.2024; 28.08.2024; 07.10.2024).

Материал поступил 13.02.2026, одобрен 23.02.2026, принят к публикации 23.02.2026

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-224-230

ЭКОНОМИКА

UDC 330.34

INNOVATION, ENTREPRENEURSHIP, AND ECONOMIC GROWTH – A THEORY OF SYNERGISM AND DYNAMISM IN THE CASE OF BELARUS

N. P. Chetyrbock

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, First Vice-Rector, State Educational Establishment "Brest Regional Institute for Education Development", Brest, Belarus, e-mail: natabrest@hotmail.com

Abstract

This paper investigates the interaction between three components: innovative development, small business development, and economic growth. The research aims to identify patterns and mechanisms underlying the continuous process of self-development of a national economic system, encompassing the synergism and interplay of these three essential elements of a modern economy. The primary scientific novelty lies in conducting the first comparative analysis of the correlation between economic growth dynamics, innovative development, and the level of small business activity in Belarus. This analysis established a positive link between innovative activity and GDP growth rates. Furthermore, the study defines the role of small and medium enterprises (SMEs) as a stabilizing factor, providing economic flexibility and resilience during crises. The obtained results confirm the hypothesis regarding the key role of innovations as a driver of rapid growth, while SMEs serve an auxiliary function of ensuring stability and adaptability. The practical significance of the research includes developing recommendations for formulating effective state policy aimed at enhancing innovation capacity and supporting entrepreneurial activity, thereby ensuring balanced and sustainable economic growth in Belarus. Small business development plays a key role in shaping national economies due to its ability to stimulate innovation and enhance company competitiveness. Small businesses are flexible and adaptable, allowing them to respond more quickly to market changes and implement new technologies and management methods. Innovative development facilitates the creation of new products and services, increases productivity, and improves product quality, leading to increased competitiveness for enterprises and the entire national economy.

Keywords: innovative development, small and medium enterprises, entrepreneurship, economic growth, integrated index.

ИННОВАЦИИ, ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВО И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РОСТ – ТЕОРИЯ СИНЕРГИЗМА И ДИНАМИЗМА НА ПРИМЕРЕ БЕЛАРУСИ

Н. П. Четырбок

Реферат

Работа посвящена исследованию взаимодействия между тремя составляющими, характеризующими степень развития экономической системы страны: инновационным развитием, развитием малого предпринимательства и оценкой экономического роста. Работа направлена на выявление закономерностей и механизмов, лежащих в основе непрерывного процесса саморазвития экономической системы и включающего синергизм и взаимодействие трех важнейших составляющих современной экономики. Основная научная новизна работы состоит во впервые проведенном сравнительном анализе взаимосвязи динамики экономического роста, инновационного развития и уровня малого бизнеса в Беларуси, в ходе которого установлена положительная связь между инновационной активностью и темпами роста ВВП; в определении роли малого и среднего бизнеса в аспекте стабилизирующего фактора, обеспечивающего гибкость и устойчивость экономики в условиях кризиса; в получении результатов подтверждающих гипотезу о ключевой роли инноваций как драйвера быстрого роста, тогда как МСБ выполняет вспомогательную функцию устойчивости и адаптации. Практическая значимость исследования включает разработку рекомендаций по формированию эффективной государственной политики, нацеленной на усиление инновационного потенциала и поддержку предпринимательской активности, что обеспечит сбалансированный и устойчивый экономический рост Беларуси. Развитие малого бизнеса играет ключевую роль в формировании экономики стран благодаря своей способности стимулировать инновационные процессы и повышать конкурентоспособность компаний. Малый бизнес отличается гибкостью и адаптивностью, позволяющей быстрее реагировать на изменения рынка и внедрять новые технологии и методы управления. Инновационное развитие способствует созданию новых продуктов и услуг, повышению производительности труда и улучшению качества продукции, что ведет к росту конкурентоспособности предприятий и всей национальной экономики.

Ключевые слова: инновационное развитие, развитие малого и среднего бизнеса, предпринимательство, оценка экономического роста.

Introduction

The problem of the interrelation between innovative development, entrepreneurship, and economic growth is becoming particularly relevant under modern conditions, as most states strive to enhance their competitiveness on the global stage. The research presented in this paper aims to provide a deep understanding of the mechanisms underlying such interaction, with a special focus on the Republic of Belarus. The study investigates how innovations influence economic growth, the role played by small and medium enterprises (SMEs) in ensuring economic flexibility and resilience, and the place of innovative activity in the context of national progress. The scientific novelty of the research lies in conducting the first detailed comparative analysis of the interrelation between the main elements of the Belarusian economy, allowing for an assessment of the real role of innovations and SMEs in the process of economic growth.

Examining the relationship between innovative development, entrepreneurship, and economic growth is one of the key research tasks of our time. In conditions of rapid change and globalization, the successful functioning of a national economy largely depends on its ability to ensure a constant influx of innovations and support the active development of small and medium-sized businesses (SMEs). Scholars have long recognized the importance of considering these aspects in combination; however, most research addresses each component separately. Belarusian scholar V. Y. Shutilin conducted a comprehensive study of the concept of "innovation potential," defined typical approaches to its interpretation and measurement procedures, revealed the advantages and limitations of existing methodologies, and proposed an original methodology for its assessment. This methodology allows for a complete analysis of a company's current position using a broad set of criteria, determining an enterprise's readiness to implement an innovation project and the probability of its successful implementation, and analyzing indicator dynamics to identify prospects and build development trajectories for the organization [1], which systematizes and scientifically substantiates

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-231-237

the relevance and specifics of innovative development. Belarusian scholar A. A. Bykov, in his work "Economic Growth and Development," emphasizes the importance of the innovative development factor but does not consider it the sole determinant of economic growth. He identifies the following determinants of economic growth: people's needs satisfied through increased welfare; competition between firms and states; uneven distribution of income; innovations and scientific-technical progress [2, p. 7–11]. Competition between firms, in turn, implies the active development of small and medium-sized businesses. Let us consider the correlation between innovative development, small and medium business activity, and their joint influence on economic growth.

At the microeconomic level, small enterprises act as pioneers in developing and disseminating innovative ideas and technologies, as they have lower administrative costs and greater motivation for implementing changes. These innovations increase productivity, reduce costs, and raise revenues [3]. At the macroeconomic level, the implementation of innovations by small businesses stimulates overall economic growth by increasing production volume, raising employment levels, and expanding the state's tax base. Highly competitive firms attract more investment, create jobs, and contribute to the sustainable development of a region [4].

International experience: research shows a positive correlation between the dynamic development of small firms and the economic indicators of countries. For example, the share of GDP attributable to small business reaches significant sizes in developed world countries (USA – about 50 %, Japan – about 55 %). The development of entrepreneurship contributes to economic diversification and reduces the risks of economic crises [5].

The synergism of innovative development and the activity of small and medium entrepreneurship is a global condition for the dynamism of economic growth. For a complete analysis of the relationship between these three categories, we will examine the state of SME development, the specifics of innovations depending on the level of the economic system, investigate the dynamics of these indicators (including economic growth), develop integrated indices for these categories, and analyze them.

Analysis of Small and Medium Enterprise Development

To better understand the influence of small business factors, innovative development, and competition on the Belarusian economy, let us consider some key indicators: the dynamics of the number of small and medium-sized business (SMB) entities, small business revenue volume and contribution to the country's GDP, as well as their profit and profitability (Table 1) [6].

Table 1 – Dynamics of Main Indicators of Small Business in the Republic of Belarus from 2019 to 2024

Indicator	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Number of micro, small and medium organizations – legal entities at year-end[1]), units	110 777	111 405	111 908	113 355	115 924	128 865
of which: medium organizations	2 235	2 219	2 165	2 150	2 088	2 093
of which: micro and small organizations	108 542	109 186	109 743	111 205	113 836	126 772*
Average number of employees of organizations[2]), persons	1 192 905	1 146 183	1 121 759	1 092 611	1 094 379	1 174 425
of which: medium organizations	362 413	360 246	347 708	341 781	335 118	341 981
of which: micro and small organizations	830 492	785 937	774 051	750 830	759 261	832 444
Nominal accrued average monthly wage, rubles	1 078,1	1 268,9	1 479,4	1 673,5	1 969,7	2 373,5
of which: medium organizations	1 145,1*	1 355,4*	1 558,5	1 815,9	2 111,7	2 534,1
of which: micro and small organizations	1 044,2	1 223,5	1 438,6	1 599,8	1 898,5	2 297,2
Revenue from sales of products, goods, works, services, million rubles	142 953,0	145 986,8	175 063,6	189 882,7	237 483,2	295 627,6
of which: medium organizations	31 500,5	35 332,9	44 431,1	52 671,2	59 061,9	70 106,6
of which: micro and small organizations	111 452,6	110 653,9	130 632,5	137 211,5	178 421,3	225 521,1
Net profit, loss (-), million rubles	7 420,7	5 294,9	9 133,8	9 822,4	11 990,7	17 652,0
of which: medium organizations	1 722,1	1 897,7	2 980,5	3 734,1	3 616,9	4 095,5
of which: micro and small organizations	5 698,5	3 397,3	6 153,2	6 088,3	8 373,8	13 556,4
Return on sales, %	6,9	8,2	8,4	9,2	8,0	8,4
of which: medium organizations	6,9	7,9	8,5	9,4	8,2	7,5
of which: micro and small organizations	6,9	8,3	8,3	9,2	7,9	8,6
Share of loss-making organizations, %	20,1	22,3	19,1	19,1	18,6	18,0
of which: medium organizations	14,5	14,4	12,1	11,1	10,7	11,1
of which: micro and small organizations	20,2	22,8	19,6	19,7	19,1	18,2
Exports of goods, million US dollars	15 607,3	12 271,1	17 039,9	15 359,8	18 431,2	17 569,6
of which: medium organizations	2 201,2	2 367,9	3 176,6	3 343,6	3 167,4	3 469,6
of which: micro and small organizations	13 406,1	9 903,2	13 863,3	12 016,2	15 263,8	14 100,0
Imports of goods, million US dollars	16 989,9	14 596,9	17 825,3	17 731,3	20 581,9	22 134,9
of which: medium organizations	3 187,1	3 409,9	3 484,4	2 972,1	3 118,6	3 506,0
of which: micro and small organizations	13 802,8	11 187,0	14 340,9	14 759,2	17 463,3	18 628,9
Balance of foreign trade in goods, million US dollars	–1 382,6	–2 325,8	–785,4	–2 371,5	–2 150,7	–4 565,3
of which: medium organizations	–985,9	–1 042,0	–307,8	371,5	48,8	–36,4
of which: micro and small organizations	–396,7	–1 283,8	–477,6	–2 743,0	–2 199,5	–4 528,9
Volume of industrial production, including tolling raw materials, million rubles	21 077,7	23 272,4	29 642,9	32 948,7	37 396,0	44 549,2
of which: medium organizations	8 505,8	9 123,3	12 118,0	14 123,1	16 038,9	18 785,7
of which: micro and small organizations	12 571,9	14 149,1	17 524,8	18 825,5	21 357,1	25 763,5
Retail trade turnover, million rubles	14 876,2	15 177,3	16 301,2	17 090,1	19 245,8	24 222,3
of which: medium organizations	4 015,3	3 897,5	4 439,3	4 871,6	5 394,0	6 918,1
of which: micro and small organizations	10 860,9	11 279,8	11 861,8	12 218,5	13 851,8	17 304,2
Public catering turnover, million rubles	1 458,6	1 202,4	1 622,9	2 014,4	2 602,4	3 237,5

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-231-237

Continuation of Table 1

Indicator	2019	2020	2021	2022	2023	2024
of which: medium organizations	311,9	213,2	264,2	349,8	410,6	443,3
of which: micro and small organizations	1 146,7	989,2	1 358,8	1 664,6	2 191,8	2 794,2
Investments in fixed capital, million rubles	11 230,0	11 872,8	11 051,1	10 352,6	14 617,1	18 689,6
of which: medium organizations	3 239,3	3 586,7	3 358,1	3 036,4	4 331,9	6 063,1
of which: micro and small organizations	7 990,7	8 286,0	7 692,9	7 316,1	10 285,3	12 626,5

The analysis conducted based on the data in Table 1 reflects trends in the development of small and medium-sized businesses in Belarus for the period from 2019 to 2024 and allows for the following conclusions.

The number of SMEs demonstrates steady growth from 110,777 units in 2019 to 128,865 in 2024 (an increase of 16,3 %). The growth is provided mainly by micro and small organizations, whose number increased by 16,8 % (from 108,542 to 126,772). The number of medium-sized organizations decreased by 6,4 % (from 2,235 to 2,093), indicating possible consolidation or the transition of some medium-sized enterprises into the small category. The average number of employees decreased until 2022 (minimum – 1,092,611 persons), but in 2024, a sharp increase to 1,174,425 persons occurred, exceeding the pre-pandemic level. Medium-sized organizations consistently reduced employment (by 5,6 % over the period), while micro and small enterprises in 2024 reached the level of 2020 (832,444 persons).

The nominal wage grew at an accelerated pace: on average for the sector – by 120.2 % (from 1,078.1 to 2,373.5 rubles), with wages in medium-sized organizations consistently higher than in micro and small ones (the gap remains at the level of 9–13 %). The sector's revenue increased by 106,8 % (from 142,953.0 to 295,627.6 million rubles), with noticeable acceleration in growth after 2021. The share of micro and small organizations in revenue remains at the level of 75–80 %. Net profit increased 2,4 times (from 7,420.7 to 17,652.0 million rubles); however, a decline was observed in 2020 (5,294.9 million rubles), likely due to pandemic restrictions. The profit of micro and small organizations grew faster than that of medium-sized ones (2,4 times vs. 2,4 times) but with greater volatility. Return on sales fluctuated in the range of 6,9–9,2 %, reaching a peak in 2022 (9,2 %). Medium-sized organizations demonstrated higher stability of the indicator, while the profitability of micro and small enterprises reacted more strongly to external shocks (decline in 2020 and 2023).

The share of loss-making organizations decreased from 20,1 % in 2019 to 18,0 % in 2024. At the same time, medium-sized organizations have a significantly lower level of loss (10,7–14,5 %) than micro and small ones (18,2–22,8 %). Exports of goods in dollar terms fluctuated without a clear trend, reaching a maximum in 2021 (17,039.9 million dollars). Imports grew steadily (from 16,989.9 to 22,134.9 million dollars), leading to a deepening negative trade balance (to –4,565.3 million dollars in 2024). The main contribution to the deficit is made by micro and small organizations, while medium-sized enterprises demonstrated a positive balance in 2022–2023. The volume of industrial production increased by 111,4 % (from 21,077.7 to 44,549.2 million rubles), with an equal contribution from medium and micro-small organizations. Retail trade turnover increased by 62,8 %, public catering turnover — by 122,0 % (recovery after the 2020 decline). Investments in fixed capital grew moderately until 2023, then sharply increased by 27,9 % in 2024 (to 18,689.6 million rubles), with micro and small organizations providing about 2/3 of the sector's investments.

Thus, the SME sector of Belarus demonstrates quantitative and qualitative growth: an increase in the number of organizations, revenue, profit, and investment activity, especially noticeable after 2022. At the same time, it is worth noting that medium-sized organizations are more stable in terms of profitability and loss indicators, but their share is decreasing, which may indicate structural shifts in the sector. Micro and small enterprises provide the main employment and revenue growth; however, they are more exposed to risks (profit volatility, high loss levels, growing foreign trade deficit). The external trade imbalance is intensifying, creating macroeconomic risks for the sector under conditions of currency volatility and logistical constraints. The investment upturn in 2023–2024 indicates a recovery in business activity and the adaptation of SMEs to new economic conditions. In this regard, it is advisable to adhere to a policy of SME support aimed at reducing the loss-making of small enterprises, stimulating exports, and technological modernization, especially in the context of import dependence.

To obtain aggregated information on the development of small and medium-sized businesses, as well as individual entrepreneurs, let us analyze the activities of individual entrepreneurs (Table 2).

Table 2 – Dynamics of Main Indicators of Individual Entrepreneur Activity in the Republic of Belarus from 2019 to 2024 [6]

Indicator	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Number of individual entrepreneurs at year-end, persons	257 000	269 501	273 120	262 798	252 113	237 326
Number of individuals engaged by individual entrepreneurs under employment and/or civil law contracts, persons	69 613	70 818	74 563	64 949	64 416	62 367
Revenue from sales of products, goods, works, services, million rubles	12 901,2	12 114,9	14 817,4	14 796,8	15 118,1	13 754,1
Exports of goods, million US dollars	150,9	154,9	220,8	195,5	179,8	29,8
Imports of goods, million US dollars	345,3	302,7	359,2	423,6	398,7	154,9
Balance of foreign trade in goods, million US dollars	–194,4	–147,8	–138,4	–228,1	–218,9	–125,1
Retail trade turnover, million rubles	4 667,8	4 292,9	4 348,3	4 535,6	4 545,5	4 606,8

The analyzed data on the development of individual entrepreneurship in Belarus for the period from 2019 to 2024 include the following indicators: the number of entrepreneurs, revenue volumes, exports and imports, foreign trade balance, and retail trade turnover. Based on the provided data, the following conclusions can be drawn. There is a decrease in the number of individual entrepreneurs. Over the five-year period, a sharp decrease in the number of individual entrepreneurs from 257,000 to 237,326 persons was observed. Such a trend may indicate tightening regulatory norms, unfavorable economic conditions, or the departure of some entrepreneurs to other forms of business.

There is a sharp decline in the use of hired labor. Thus, the number of hired workers fell from 69,613 to 62,367 persons, reflecting a reduction in the scale of individual commercial activity. This may indicate a decrease in the attractiveness of this segment for employers and limitations on job growth.

One can speak of unstable revenue dynamics. Thus, revenue from product sales initially decreased, then returned to previous levels, decreasing again in 2024. Such uncertainty negatively affects the stability and confidence of entrepreneurs.

A negative aspect is the negative foreign trade balance. Thus, a constant trade deficit in the range of 138,4 to 228,1 million US dollars indicates a strong dependence of individual entrepreneurs on imports. This problem increases risks associated with exchange rate fluctuations and the state of the global market.

Another unfavorable aspect is the low retail trade turnover. Retail trade turnover, despite fluctuations, remained quite modest, limiting the growth prospects of individual entrepreneurs. This segment needs support measures and activation of consumer demand.

Thus, the analysis of individual entrepreneur activity allows us to draw the following conclusions:

- individual entrepreneurs face serious problems, such as demographic decline, low demand, and regulatory rigidity;
- it is necessary to adopt a set of measures to support individual entrepreneurship, including simplifying tax procedures, supporting credit

accessibility, and creating favorable conditions for entering international markets;

- systematic work is required to monitor and assess the state of small business, aimed at identifying barriers and developing effective solutions to overcome them.

Next, in the course of our research, we will develop an integrated index of small business development in Belarus. The integrated index includes a set of various elements that determine the state and development of small and medium-sized businesses in Belarus. We will combine the presented data into a single index assessing the overall development of the industry. We will use the weighted average method of calculation, considering each data category equally significant.

Formula for calculating the integrated index

$$I_{SME} = (Sorg + Ssalary + Sprofit + Sexport + Sretail) / N$$

where

- Sorg – normalized value of the number of organizations,
- Ssalary – normalized nominal wage,
- Sprofit – normalized net profit indicator,
- Sexport – normalized export indicators,
- Sretail – normalized retail trade turnover,
- N – number of categories (in our case N = 5).

Data normalization:

We will normalize using the formula

Si = (Xi - Xmin) / (Xmax - Xmin),

where Xi is the indicator value;

Xmin is the minimum value for the entire period;

Xmax is the maximum value for the entire period.

Table 3 – Integrated Index of Small Business Development in Belarus

Year	Value of the Integrated Index of SME Development in Belarus
2019	0,62
2020	0,61
2021	0,65
2022	0,66
2023	0,68
2024	0,71

Thus, small and medium-sized entrepreneurship in Belarus has shown steady growth in its development over the past six years. Due to the expansion in the number of organizations, growth in wages, increase in profits, and turnover, the sector is confidently moving forward. Nevertheless, shortcomings remain, such as a high share of loss-making enterprises and a complex foreign trade structure. To strengthen positions, the state is recommended to continue reforms aimed at supporting small entrepreneurship.

Innovative Development of the Country

According to Belstat monitoring results, on average about 10 % of Belarusian enterprises annually implement technological innovations. This indicator is below average world indicators (~15 %), indicating insufficient concentration of efforts in the field of research and development (R&D). Support for state innovation financing programs is important, as implemented in Germany and Finland [7]. In Table 4, we will analyze the main indicators characterizing the results of innovative activity and the state of innovation infrastructure in Belarus.

Table 4 – Dynamics of Main Indicators of Innovative Activity of Enterprises in the Republic of Belarus from 2019 to 2024 [6]

Indicator	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Number of organizations that incurred innovation costs, units	501	528	521	521	525	565
including:						
organizations in industry	422	447	448	449	457	500
organizations in information technology and activities in telecommunications and information services	79	81	73	72	68	65
Share of organizations that incurred innovation costs, %	21,1	20,6	19,7	20	20,4	21,5
including:						
in the total number of surveyed industrial organizations	25,5	27,1	27,5	27,8	28,3	30,1
in the total number of surveyed IT and telecom organizations	10,9	8,8	7,2	7,2	7,1	6,7
Volume of shipped products (works, services) of own production by industrial organizations in actual selling prices minus taxes and fees calculated from revenue, million rubles	91 915,20	93 184,80	123 874,80	134 354,10	149 126,80	163 651,60
of which volume of shipped innovative products (works, services)	15 288,70	16 696,30	24 532,10	23 779,00	33 093,10	36 512,30
Share of shipped innovative products (works, services) in the total volume of shipped products (works, services) of industrial organizations, %	16,6	17,9	19,8	17,7	22,2	22,3
Share of shipped innovative products (works, services) new to the domestic market in the total volume of shipped innovative products (works, services) of industrial organizations, %	45,2	48,2	52,8	49	55,8	64,2
Share of shipped innovative products (works, services) new to the global market in the total volume of shipped innovative products (works, services) of industrial organizations, %	1,6	0,5	0,6	0,6	0,8	3,9
Share of organizations that incurred innovation costs, %	32,2	34,2	35	35,1	34,8	36

The presented data on Belarus's innovative development for the period from 2019 to 2024 allow for the following conclusions. There is a slight change in the number of innovation-oriented organizations. Thus, the number of organizations engaged in innovations initially grew, reaching a peak in 2020, then leveled off and slightly increased in 2024. Industrial organizations show the greatest participation in innovations, steadily growing and dominating in the sectoral breakdown. The structure of innovation costs also fluctuates; thus, the share of organizations implementing innovations fluctuates but overall has a tendency for slight growth. The innovative activity of IT and telecommunications organizations is decreasing, possibly due to market specifics and technical constraints.

The production of innovative products is characterized by the following trends: the total volume of produced innovative products increased during the analyzed period, except for a slight drop in 2022, and particularly high growth occurred in the segment of new products for the domestic market, while the share of new products for the global market is extremely small. At the same time, the share of innovative products in the total volume of industrial products increased, reaching 22,3 % in 2024. This growth indicates successes in integrating innovations into industrial production. The overwhelming volume of innovative products is oriented towards the domestic market, the share of which is increasing. Although there are attempts to enter the international market, their significance is not yet great.

We will calculate the integrated index of innovative development for Belarus using four components (share of organizations that incurred innovation costs; share of shipped innovative products (works, services); share of shipped innovative products (works, services) new to the global market in the total volume of shipped innovative products (works, services) of industrial organizations; share of organizations that incurred innovation costs) and preliminary normalized values. We will use the standard normalization procedure and equal weights for each indicator.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-231-237

Iinnov = (Scost.inn + Sshare.inn.prod + Sshare.new.inn.prod + Sshare.org) / N,

where:

- Iinnov – integrated index of innovative development;
- Scost.inn – share of organizations that incurred innovation costs;
- Sshare.inn.prod – share of shipped innovative products (works, services);
- Sshare.new.inn.prod – share of shipped innovative products (works, services) new to the global market in the total volume of shipped innovative products (works, services) of industrial organizations;
- Sshare.org – share of organizations that incurred innovation costs.

The obtained values are summarized in Table 5.

Table 5 – Final Table of the Integrated Index of Innovative Development of Belarus

Year	Normalized share of org. with innovation costs, Scost.inn	Normalized share of innovative products, Sshare.inn.prod	Normalized share of new products for global market, Sshare.new.inn.prod	Normalized share of organizations, Sshare.org	Integrated index of innovative development, Iinnov
2019	0,78	0	0,32	0	0,275
2020	0,56	0,11	0	0,18	0,2125
2021	0,00	0,33	0,03	0,35	0,175
2022	0,17	0,09	0,03	0,39	0,17
2023	0,39	0,57	0,09	0,32	0,345
2024	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

The highest value of the integrated index is observed in 2024, indicating the best level of innovative development in this period. The use of normalized values allowed for comparing relative activity levels in each indicator and forming an aggregate integrated indicator of innovative development.

Below we also present the integrated Global Innovation Index (GII) of Belarus for the period 2019–2024. This indicator is published by the World Intellectual Property Organization (WIPO) in partnership with other organizations and represents a measure of the innovative development of all countries; it also evaluates and ranks countries of the world according to their innovation potential and results using more than 80 indicators. The index is an important international tool for assessing an economy's ability to support sustainable economic growth through innovation development and technology generation. The report data allow countries to identify strengths and weaknesses of their innovation system and develop strategies to improve their position in the international ranking [7]. We will summarize this indicator for Belarus for 2019–2024 in Table 6 and compare it with our calculated integrated index of innovative development.

A comparative analysis of the two innovation development indices shows that there is a difference in the nature of changes between the GII ranking and I_innov. Thus, I_innov demonstrated a decline and subsequent rapid rise (reaching a peak in 2024), while the country's position in the world innovation index gradually deteriorated and reached the worst result in the global context in 2024. This may indicate either a local success of innovations in Belarus against the backdrop of a rapidly developing world.

Given similar trends, it is necessary:

- Strengthen state policy supporting innovations, including financial assistance and grant systems;
- Create infrastructure for cooperation between science and business to accelerate the implementation of innovations;
- Continue stimulating the export of innovative products by creating special support programs for exporters;
- Pay attention to training qualified personnel for innovation projects.

Analysis of Belarus's Economic Growth

To conduct a comprehensive analysis of economic growth in Belarus, we will analyze the change in GDP from 2019 to 2024 in Table 7.

Table 6 – Innovation Development Index of Belarus for 2019–2024

Year	GII Rank	GII (score)	Iinnov
2019	72	32,07	0,275
2020	64	31,27	0,2125
2021	62	32,6	0,175
2022	77	27,5	0,17
2023	80	26,8	0,345
2024	85	24,2	1,00

Table 7 – Gross Domestic Product and Its Dynamics in Belarus for 2019-2024 [6]

Indicator	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Gross Domestic Product						
in current prices, million rubles	134732	149721	176879	193741	217969	246586
in constant prices, % of previous year	101,4	99,3	102,4	95,3	104,1	104
Gross Domestic Product per capita						
in current prices, rubles	14303	15962	19014	20995	23748	6931

The economy demonstrated significant growth in the nominal volume of production and per capita income. Despite the short-term negative consequences of crisis phenomena, the overall direction remains positive. It is important to note the need for sustainable development and minimizing the risks of future shocks to maintain high growth rates. From the presented data, it is evident that the economy demonstrates a stable positive trend in nominal production volume, especially noticeable in recent years; thus, the nominal GDP volume in constant prices grew from 134.732 trillion rubles in 2019 to 246.586 trillion rubles in 2024. The same applies to GDP per capita, which increased from 14.303 thousand rubles to 26.931 thousand rubles over the same period. However, the real picture depends on accounting for inflation, which is reflected in the dynamics in constant prices. Thus, real growth rates ("in constant prices") indicate some instability: in 2020, a decrease in real production volume (–0,7 %) was observed, which is associated with possible negative economic phenomena, such as the COVID-19 pandemic, followed by gradual recovery with moderate growth in subsequent years, with significant growth observed in 2021 (+2,4 %), and a slight slowdown in 2022 (–4.7 %) replaced by a new acceleration in 2023 and 2024. Similar trends are observed for GDP per capita; thus, a real decline is recorded in 2020 (–0,3 %), and relatively high growth rates were recorded in 2021 and 2023–2024, positively affecting citizen welfare.

Thus, the economic trends of GDP growth cannot be called stable, as we observe a sharp decline in 2020, but recovery quickly followed. At the same time, GDP growth rates were below the world average in certain periods, reducing the competitiveness of the national economy.

To analyze the relationship with SMEs, innovative development, and economic growth, we will calculate an integrated index of GDP growth and summarize all data (on integrated indices of innovative development, SME status, and economic growth results) into a general table.

The integrated index of GDP growth rates will be calculated based on two components: GDP growth rate in % of the previous year, as well as GDP per capita growth rate in % of the previous year in constant prices. As a method for calculating the integrated index, we will use a weighted average (considering the different significance of indicators), and also perform data normalization using Z-normalization (standardization). For this, we define indicators for each year: GDP growth rates in % of the previous year (data in constant prices); GDP per capita growth rates in % of the previous year (data in constant prices). And normalize the values using the formula

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-231-237

$$I_{GDP} = (S_{GDP} + SGDPper\ capita) / N,$$

where:

- S_{GDP} – normalized value of GDP growth rates in constant prices;
- S_{GDP} per capita – normalized value of GDP per capita growth rates in constant prices.

Table 8 – Normalized and Integrated Index of GDP Growth Rates in Belarus from 2019 to 2024

Year	GDP Growth Rate (% to prev. year)	GDP per capita Growth Rate (% to prev. year)	Normalized GDP Growth (S_GDP)	Normalized GDP per capita Growth (S_GDP per capita)	Integrated Index of GDP Growth Rates (I_GDP)
2019	101,4	101,6	0,693	0,573	0,645
2020	99,3	99,7	0,455	0,385	0,426
2021	102,4	103,2	0,807	0,740	0,776
2022	95,3	96,1	0	0	0
2023	104,1	104,7	1	0,906	0,963
2024	104	105,7	0,989	1	0,993

Table 9 – Summary Table of Innovative Development, Level of Small Entrepreneurship, and Competitiveness of Belarus from 2019 to 2024

Year	Integrated Index of SME Development	Integrated Index of Innovative Development	Integrated Index of GDP Growth Rates (I_{GDP})
2019	0,62	0,275	0,645
2020	0,61	0,2125	0,426
2021	0,65	0,175	0,776
2022	0,66	0,17	0
2023	0,68	0,345	0,963
2024	0,71	1,00	0,993

Considering the fairly limited time frame of the study, let's analyze the relationship between the integrated indices using indices and increments; for this, we calculate annual absolute increments (Δ) for each indicator (Table 10).

Table 10 – Summary Table of Increments in Innovative Development, Level of Small Entrepreneurship, and Economic Growth of Belarus from 2019 to 2024

Year	ΔX_1 (SME)	ΔX_2 (Innov.)	ΔY (GDP)
2020	–0,01	–0,0625	–0,219
2021	+0,04	–0,0375	+0,350
2022	+0,01	–0,005	–0,776
2023	+0,02	+0,175	+0,963
2024	+0,03	+0,655	+0,030

A correlation between the increments is observed:

- $Corr(\Delta X_2, \Delta Y) \approx 0,73$ – Strong positive relationship. Acceleration of innovative activity clearly coincides with acceleration of GDP growth (especially visible by the jump in 2023);
- $Corr(\Delta X_1, \Delta Y) \approx 0,25$ – Weak positive relationship. The increment in the SME indicator poorly predicts the increment in GDP in the short term;
- $Corr(\Delta X_1, \Delta X_2) \approx 0,12$ – Weak relationship. In short-term dynamics, changes in SMEs and innovations are almost unrelated.

Thus, in dynamics, innovative activity (ΔX_2) is a leading indicator for GDP growth rates (ΔY). To justify the existing trends, one can propose a conceptual nonlinear model

Y (GDP Growth) = f*(Resilience * Innovation Breakthrough),

where:

- Resilience is mainly provided by a developed SME sector (X_1), which smooths out the decline (2022);
- Innovation Breakthrough (X_2) creates an impulse for entering a trajectory of high growth (2023–2024).

Strong GDP growth (Y > 0,95) was observed only when two conditions were simultaneously met: X_1 (SME) > 0,68 (high level of development) and X_2 (Innov.) > 0,34 (high level of innovation). This is evident from the points for 2023 and 2024.

Conclusion

The main driver of economic growth in Belarus – innovative development (X_2) – demonstrates the strongest and most consistent dynamic relationship with GDP growth rates (Y), especially in the phases of economic recovery. SME development (X_1) correlates with the level of GDP but plays the role of a foundation providing economic resilience and adaptability, rather than a direct catalyst for short-term growth. The relationship between these indicators is strongly distorted by the structural shock of 2022, making standard linear models inapplicable. Thus, the relationship between the three indicators exists, is complex, nonlinear, and mediated by time lags. Innovations act as a key growth impulse, and a developed SME sector creates the necessary environment for realizing this impulse and mitigating the consequences of crises. To ensure sustainable economic growth, it is important to create conditions for the active participation of small and medium-sized enterprises in scientific and technical developments, ensure access to financing and infrastructure, and develop programs to support entrepreneurship. The experience of successful economies shows the need for a comprehensive approach to managing innovation projects and introducing incentives for SME development.

References

1. SHutilin, V. YU. Principy i determinanty upravleniya innovacionnym razvitiem promyshlennoj organizacii / V. YU. SHutilin, M. V. Apanasevich // Belorusskij ekonomicheskij zhurnal. – 2023. – № 2. – S. 121–138.
2. Bykov, A. A. Ekonomicheskij rost i razvitie / A. A. Bykov. – Minsk : Vyshejshaya shkola, 2021. – 303 s. – URL: https://ibooks.ru/bookshelf/386662/reading (data obrashcheniya: 22.12.2025).
3. Acs, Z. J. Innovation and Small Firms / Z. J. Acs, D. B. Audretsch // MIT Press, Cambridge MA, USA, 1990. – URL: https://resolve.cambridge.org/core/journals/business-history-review/article/abs/innovation-and-small-firms-byzoltan-j-acs-and-david-b-audretsch-cambridge-mass-mit-press-1990-x-212-pp-charts-tables-appendixes-notes-references-and-index-2995/EC9BA0F42DA219B98CE274BE97BDD3FE (data obrashcheniya: 15.12.2025).
4. Audretsch, D. B. Size and Growth of Firms in the Knowledge Economy / D. B. Audretsch, A. R. Thurik // Oxford Economic Papers. – 2002. – Vol. 54, No. 3, July. – URL: https://www.researchgate.net/profile/Roy-Thu-rik/publication/5143798_Small_Firms_and_Economic_Growth_in_Europe/links/587e10ec08aed3826af418c4/Small-Firms-and-Economic-Growth-in-Europe.pdf (data obrashcheniya: 15.12.2025).
5. OECD Entrepreneurship at a Glance 2019 Report. – URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/05/oecd-sme-and-entrepreneurship-outlook-2019_7083aa23/34907e9c-en.pdf (data obrashcheniya: 15.12.2025).
6. Statisticheskij ezhegodnik. – URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/strukturnaja_statistika/osnovnye-pokazateli-deyatelnosti-mikroorganizatsiy-i-malykh-organizatsiy (data obrashcheniya: 15.12.2025).
7. Evropejskaya komissiya, Direktiva ES po statistike innovacij. – URL: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/statistics_en (data obrashcheniya: 15.12.2025).
8. Vsemirnyj Bank, otchet Doing Business 2023. – URL: https://www.wipo.int/ru/web/global-innovation-index (data obrashcheniya: 15.12.2025).
9. SHumpeter, J. Istoriya ekonomicheskogo analiza : v 3 t. / J. SHumpeter. – SPb. : Ekonomicheskaya shkola, 2004. – T. 2. – 496 s.
10. Porter, M. E. Konkurenciya : monografiya : per. s angl. / M. E. Porter. – M. : Izdatel'skij dom «Vil'yams», 2005. – 608 s.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-231-237

11. Mokir, B. Dzh. Rychag bogatstva. Tekhnologicheskaya kreativnost' i ekonomicheskij progress / B. Dzh. Mokir ; per. s angl. N. Edel'mana ; pod nauch. red. T. Drobyshevskoj, A. Smirnova. – M. : Izd-vo Instituta Gajdara, 2014. – 504 s.
12. SHutilin, V. YU. Tekhnologicheskoe liderstvo i marketingovye vozmozhnosti innovacionno-aktivnyh kompanij po formirovaniyu novoj struktury rynkov / V. YU. SHutilin // Nauchnye trudy Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta : yubil. sb. – Minsk, 2013. – Vyp. 6.
13. Nekhorosheva, L. H. Innovacii i problemy ekonomicheskogo razvitiya / L. H. Nekhorosheva // Nauchnye trudy Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta : yubilejnyj vypusk : v 2 t. / Belorusskij gosudarstvennyj ekonomicheskij universitet ; redkol.: V. N. SHimov (pred.) [i dr.] ; M-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Belorus. gos. ekon. un-t. – Minsk : BGEU, 2003. – T. 1. – S. 270–290.
14. SHutilin, V. YU. Innovacii, formiruemye potrebitelyami: fenomen Web H. 0 / V. YU. SHutilin // Nauka i innovacii. – 2014. – № 142. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsii-formiruemye-potrebitelyami-fenomen-web-h-0 (data obrashcheniya: 15.12.2025).
15. Bykov, A. A. Sovremennye formy organizacii biznesa: mezhdunarodnyj opyt i perspektivy razvitiya v Belarusi / A. A. Bykov ; Sovet po razvitiyu predprinimatel'stva. – Minsk, 2017. – 188 s.
16. Nekhorosheva, L. N. Innovacionnaya aktivnost' malyh predpriyatij i ee ocenka / L. N. Nekhorosheva, S. A. Egorov // Ekonomicheskij rost Respubliki Belarus': globalizaciya, innovacionnost', ustojchivost': materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 19–20 maya 2009 g. : v 2 t. / redkol.: V.N. SHimov (otv. red.) [i dr.] ; M-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Belorusskij gos. ekon. un-t. – Minsk : BGEU, 2009. – T. 1. – C. 208-210.
17. Abidokov, M. M. Vliyanie innovacionnoj aktivnosti na ekonomicheskij rost regiona / M. M. Abidokov // Vestnik Adygejskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 5: Ekonomika. – 2018. – № 4 (230). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-innovatsionnoy-aktivnosti-na-ekonomicheskiy-rost-regiona (data obrashcheniya: 13.12.2025).
18. Regiony Respubliki Belarus', 2025 : Statisticheskij ezhegodnik (tom 1, 2). – URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_compilation/index_152632 (data obrashcheniya: 13.12.2025).
19. CHetyrbok, N. P. Innovacionnoe razvitie Belarusi kak faktor konkurentnogo preimushchestva / N. P. CHetyrbok // Aktual'nye problemy sovremennyh ekonomicheskih sistem – 2024 : sbornik nauchnyh trudov / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet; redkol.: A. G. Prorovskij [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2024. – S. 251–257.
20. CHetyrbok, N. P. Konkurentnyj ekonomicheskij rost skvoz' prizmu trialekticheskogo podhoda / N. P. CHetyrbok // Aktual'nye problemy sovremennyh ekonomicheskih sistem – 2025 : sbornik nauchnyh trudov / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet ; redkol.: A. G. Prorovskij, E. I. Kisel', N. G. Nadeina [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2025. – S. 47–50.

Список цитированных источников

1. Шутилин, В. Ю. Принципы и детерминанты управления инновационным развитием промышленной организации / В. Ю. Шутилин, М. В. Апанасевич // Белорусский экономический журнал. – 2023. – № 2. – С. 121–138.
2. Быков, А. А. Экономический рост и развитие / А. А. Быков. – Минск : Вышэйшая школа, 2021. – 303 с. – URL: https://ibooks.ru/bookshelf/386662/reading (дата обращения: 22.12.2025).
3. Acs, Z. J. Innovation and Small Firms / Z. J. Acs, D. B. Audretsch // MIT Press, Cambridge MA, USA, 1990. – URL: https://resolve.cambridge.org/core/journals/business-history-review/ article/abs/innovation-and-small-firms-byzoltan-j-acs-and-david-b-audretsch-cambridge-mass-mit-press-1990-x-212-pp-charts-tables-appendixes-notes-references-and-index-2995/EC9BA0F42DA219B 98CE274BE97BDD3FE (дата обращения: 15.12.2025).
4. Audretsch, D. B. Size and Growth of Firms in the Knowledge Economy / D. B. Audretsch, A. R. Thurik // Oxford Economic Papers. – 2002. – Vol. 54, No. 3, July. – URL: https://www.researchgate.net/profile/Roy-Thurik/publication/5143798_Small_Firms_and_Economic_Growth_in_Europe/links/587e10ec08aed3826af418c4/Small-Firms-and-Economic-Growth-in-Europe.pdf (дата обращения: 15.12.2025).
5. OECD Entrepreneurship at a Glance 2019 Report. – URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/05/oecd-sme-and-entrepreneurship-outlook-2019_7083aa23/34907e9c-en.pdf (дата обращения: 15.12.2025).
6. Статистический ежегодник. – URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/strukturnaja_statistika/osnovnye-pokazateli-deyatelnosti-mikroorganizatsiy-i-malykh-organizatsiy (дата обращения: 15.12.2025).
7. Европейская комиссия, Директива ЕС по статистике инноваций. – URL: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/statistics_en (дата обращения: 15.12.2025).
8. Всемирный Банк, отчет Doing Business 2023. – URL: https://www.wipo.int/ru/web/global-innovation-index (дата обращения: 15.12.2025).
9. Шумпетер, Й. История экономического анализа : в 3 т. / Й. Шумпетер. – СПб. : Экономическая школа, 2004. – Т. 2. – 496 с.
10. Портер, М. Е. Конкуренция : монография : пер. с англ. / М. Е. Портер. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2005. – 608 с.
11. Мокир, Б. Дж. Рычаг богатства. Технологическая креативность и экономический прогресс / Б. Дж. Мокир ; пер. с англ. Н. Эдельмана ; под науч. ред. Т. Дробышевской, А. Смирнова. – М. : Изд-во Института Гайдара, 2014. – 504 с.
12. Шутилин, В. Ю. Технологическое лидерство и маркетинговые возможности инновационно-активных компаний по формированию новой структуры рынков / В. Ю. Шутилин // Научные труды Белорусского государственного экономического университета : юбил. сб. – Минск, 2013. – Вып. 6.
13. Нехорошева, Л. Н. Инновации и проблемы экономического развития / Л. Н. Нехорошева // Научные труды Белорусского государственного экономического университета : юбилейный выпуск : в 2 т. / Белорусский государственный экономический университет ; редкол.: В. Н. Шимов (пред.) [и др.] ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. экон. ун-т. – Минск : БГЭУ, 2003. – Т. 1. – С. 270–290.
14. Шутилин, В. Ю. Инновации, формируемые потребителями: феномен Web X. 0 / В. Ю. Шутилин // Наука и инновации. – 2014. – № 142. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsii-formiruemye-potrebitelyami-fenomen-web-h-0 (дата обращения: 15.12.2025).
15. Быков, А. А. Современные формы организации бизнеса: международный опыт и перспективы развития в Беларуси / А. А. Быков ; Совет по развитию предпринимательства. – Минск, 2017. – 188 с.
16. Нехорошева, Л. Н. Инновационная активность малых предприятий и ее оценка / Л. Н. Нехорошева, С. А. Егоров // Экономический рост Республики Беларусь: глобализация, инновационность, устойчивость: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19–20 мая 2009 г. : в 2 т. / редкол.: В.Н. Шимов (отв. ред.) [и др.] ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорусский гос. экон. ун-т. – Минск : БГЭУ, 2009. – Т. 1. – С. 208-210.
17. Абидоков, М. М. Влияние инновационной активности на экономический рост региона / М. М. Абидоков // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 5: Экономика. – 2018. – № 4 (230). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-innovatsionnoy-aktivnosti-na-ekonomicheskiy-rost-regiona (дата обращения: 13.12.2025).
18. Регионы Республики Беларусь, 2025 : Статистический ежегодник (том 1, 2). – URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_compilation/index_152632 (дата обращения: 13.12.2025).
19. Четырбок, Н. П. Инновационное развитие Беларуси как фактор конкурентного преимущества / Н. П. Четырбок // Актуальные проблемы современных экономических систем – 2024 : сборник научных трудов / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет; редкол.: А. Г. Проровский [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2024. – С. 251–257.
20. Четырбок, Н. П. Конкурентный экономический рост сквозь призму триалектического подхода / Н. П. Четырбок // Актуальные проблемы современных экономических систем – 2025 : сборник научных трудов / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет ; редкол.: А. Г. Проровский, Е. И. Кисель, Н. Г. Надеина [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2025. – С. 47–50.

Материал поступил 22.12.2025, одобрен 17.02.2026, принят к публикации 18.02.2026

УДК 338.1 (476)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ЦИФРОВИЗАЦИИ В КОНТЕКСТЕ ИНДУСТРИИ 4.0 КАК НАПРАВЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Ю. Г. Вайлунова[1], О. М. Шерстнева[2]

[1] К. э. н., доцент, доцент кафедры маркетинга и финансов, УО «Витебский государственный технологический университет», Витебск, Беларусь, e-mail: Yulia_KG@tut.by

[2] Старший преподаватель кафедры маркетинга и финансов, УО «Витебский государственный технологический университет», Витебск, Беларусь, e-mail: olga_sherstneva@mail.ru

Реферат

В статье рассмотрена горизонтальная цифровизация экономики на основе smart-кооперации стейкходеров в создании и продвижении инновационных продуктов с применением цифровых технологий как направление экономического развития Республики Беларусь. Целью работы является разработка теоретических основ горизонтальной цифровизации.

В Республике Беларусь цифровизация становится важным направлением стимулирования инновационного развития и повышения конкурентоспособности экономики. Вместе с тем, процессы цифровой трансформации недостаточно активны по сравнению с зарубежными странами. Обоснована концепция, на которой базируется горизонтальная цифровизация. Выявлены предпосылки горизонтальной цифровизации. Разработан понятийный аппарат горизонтальной цифровизации. Определены отличительные признаки горизонтальной цифровизации. Обоснованы преимущества горизонтальной цифровизации. Для перехода к цифровому предприятию необходимо провести общую цифровизацию и интеграцию производственных и прочих процессов по вертикали, начиная от разработки продуктов и заканчивая производством, логистикой и обслуживанием в процессе эксплуатации. Однако существует и необходимость проведения горизонтальной интеграции, которая выходит далеко за пределы одной организации и охватывает как саму фирму, так и ее партнеров, поставщиков и клиентов. Горизонтальная цифровизация строится на кластерном подходе, она охватывает по цепочке ценностей всех субъектов и способствует формированию кластера.

Индустрия 4.0 позволит отечественным предприятиям не только увеличить собственную прибыль за счет снижения себестоимости и роста производительности труда, но и выйти на новый технологический уровень развития и найти новые рыночные ниши, встраиваться в глобальные цепочки добавленной стоимости. Это возможно в формате горизонтальной интеграции и цифровизации.

Таким образом, горизонтальная цифровизация заключается в использовании инструментов Индустрии 4.0. для формирования «умной кооперации» (smart-кооперации) стейкходеров в генерации востребованных инновационных продуктов и развитии smart-индустрии и общества. Smart-кооперация представляет собой совместное выполнение действий субъектами для достижения общих целей на основе цифровых технологий. В отличие от обычных процессов кластеризации, горизонтальная цифровизация базируется на цифровых платформах.

Ключевые слова: неокластерная концепция, вертикальная цифровизация, горизонтальная цифровизация, Индустрия 4.0, экономическое развитие.

THEORETICAL FOUNDATIONS OF HORIZONTAL DIGITALIZATION IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0 AS A DIRECTION OF ECONOMIC DEVELOPMENT IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Y. G. Vailunova, O. M. Sherstneva

Abstract

The article discusses horizontal digitalization of the economy based on smart cooperation between stakeholders in creating and promoting innovative products using digital technologies as a direction for the economic development of the Republic of Belarus. The purpose of this work is to develop the theoretical foundations of horizontal digitalization.

In the Republic of Belarus, digitalization is becoming an important area for stimulating innovative development and enhancing the competitiveness of the economy. However, digital transformation processes are not as active as in other countries. The concept underlying horizontal digitalization is substantiated. The prerequisites for horizontal digitalization are identified. A conceptual framework for horizontal digitalization is developed. The distinctive features of horizontal digitalization are defined. The advantages of horizontal digitalization are substantiated. Transitioning to a digital enterprise requires overall digitalization and vertical integration of production and other processes, from product development to production, logistics, and service. However, horizontal integration is also necessary, extending far beyond the boundaries of a single organization and encompassing the firm itself, its partners, suppliers, and customers. Horizontal digitalization is based on a cluster approach; it encompasses all entities along the value chain and facilitates cluster formation.

Industry 4.0 will enable domestic enterprises not only to increase their profits by reducing costs and increasing productivity, but also to reach a new level of technological development, find new market niches, and integrate into global value chains. This is possible through horizontal integration and digitalization.

Horizontal digitalization, therefore, involves using Industry 4.0 tools to form «smart cooperation» among stakeholders in generating sought-after innovative products and developing smart industry and society. Smart cooperation involves the joint implementation of actions by actors to achieve common goals using digital technologies. Unlike traditional clustering processes, horizontal digitalization is based on digital platforms.

Keywords: neo-cluster concept, vertical digitalization, horizontal digitalization, Industry 4.0, economic development.

Введение

Стратегическими приоритетами экономического развития в Республике Беларусь, определенными в ряде Государственных программ и концепций (Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 года, Программы социально-экономического развития на 2026–2030 годы, Стратегия цифрового развития страны на 2026–2030 годы и на период до 2035 года) является последовательная цифровая трансформация экономической деятельности и государственного

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-238-243

управления, а также обеспечения цифрового лидерства; технологический рывок – обеспечение суверенитета в критически важных производствах на базе «Индустрия 4.0» и искусственного интеллекта.

В государственных программах, указах и законах Республики Беларусь отражены вопросы развития:

– кластеризации: Государственная программа инновационного развития на 2026–2030 годы (Указ Президента Республики Беларусь № 448 от 21 декабря 2025 г.); концепции Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 года; концепции формирования и развития инновационно-промышленных кластеров в Республике Беларусь и мероприятий по ее реализации (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 16.01.2014 г. № 27); Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на 2026–2030 годы (решение Всебелорусского народного собрания от 19 декабря 2025 г. № 1);

– цифровизации: Закон Республики Беларусь «Об информации, информатизации и защите информации» (от 10 ноября 2008 г. № 455-З); Указ Президента Республики Беларусь «О некоторых вопросах информатизации» (от 2 декабря 2013 г. № 531); Декрет Президента Республики Беларусь «О развитии цифровой экономики» (от 21 декабря 2017 г. № 8); постановление Совета Министров о мерах по реализации Указа Президента Республики Беларусь «Об органе государственного управления в сфере цифрового развития и вопросах информатизации» (от 21 апреля 2023 г. № 280); Государственная программа инновационного развития на 2026–2030 годы (Указ Президента Республики Беларусь № 448 от 21 декабря 2025 г.); Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на 2026–2030 годы (решение Всебелорусского народного собрания от 19 декабря 2025 г. № 1).

Для перехода к цифровому предприятию, необходимо провести общую цифровизацию и интеграцию производственных и прочих процессов по вертикали, начиная от разработки продуктов и заканчивая производством, логистикой и обслуживанием в процессе эксплуатации. Однако существует и необходимость проведения горизонтальной интеграции, которая выходит далеко за пределы одной организации и охватывает как саму фирму, так и ее партнеров, поставщиков и клиентов.

Значение и роль кластеров в экономике и активизации инновационной деятельности отмечалась многими исследователями: зарубежными (М. Бест [1], Роланд и Ден Хертхог [2], Де Брессон [3], Сакари Луукэнен [4], М. Портер [5–7], М. Энрайт [8], Х. Шмиц [9], С. Розенфельд [10] и др.), российскими (А. Праздничных, С. Лозинский [11], А. А. Мигранян [12], Л. С. Марков [13], Т. В. Цихан [14] и др.), белорусскими (Л. А. Истомина, Д. М. Крупский [15], Л. Н. Нехорошева, Н. И. Богдан [16], В. П. Третьяк [17], В. В. Валетко [18, 19], Н. Г. Синяк [19], С. Ф. Пятинкин [20], Г. А. Яшева [21, 22] и др.

Вопросы цифровизации, цифровой трансформации предприятий рассматривались в работах таких ученых, как П. Г. Рябчук, Е. С. Омельченко [23], Л. В. Ватлина, В. А. Плотников [24], Г. Г. Головенчик [25], С. Д. Бодрунов [26], М. Ачаповская [27], Е. Н. Быковская, Г. П. Харчилава, Ю. Н. Кафиятуллина [28], И. Н. Калиновская [29], Е. В. Попов, В. Л. Симонова, А. С. Зырянов [30] и др.

Рассмотрение в качестве направления экономического развития Республики Беларусь – горизонтальной цифровизации экономики на основе smart-кооперации стейкходеров в создании и продвижении инновационных продуктов с применением цифровых технологий является новым направлением исследования. Все это обусловливает актуальность темы исследования.

Целью работы является разработка теоретических основ горизонтальной цифровизации.

Задачи:

– обосновать концепцию, на которой базируется горизонтальная цифровизация;

– выявить предпосылки горизонтальной цифровизации;

– разработать понятийный аппарат горизонтальной цифровизации;

– определить отличительные признаки горизонтальной цифровизации;

– обосновать преимущества горизонтальной цифровизации.

Концептуальная основа горизонтальной цифровизации

Теоретико-методологической базой горизонтальной цифровизации явились следующие теории:

– кластерная концепция;

– концепция цифровизации;

– неокластерная концепция.

Эволюция теоретических концепций о пространственно-экономических системах под влиянием Индустрии 4.0 представлена на рисунке 1.

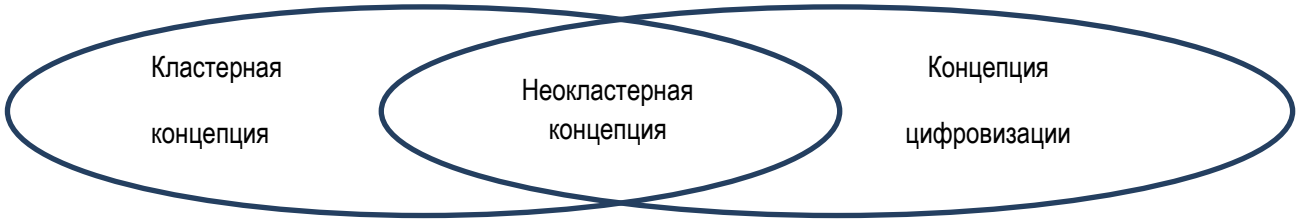


Рисунок 1 – Эволюция теоретических концепций о пространственно-экономических системах под влиянием Индустрии 4.0

Источник: составлено авторами.

Кластерная концепция (подход) – это методология повышения конкурентоспособности экономики, регионов и отраслей через формирование кластеров – объединений взаимосвязанных предприятий, поставщиков, научных и образовательных учреждений. Она рассматривается как инновационная управленческая технология, основанная на сотрудничестве и синергии участников [31]. Суть кластерной концепции заключается в повышении конкурентоспособности за счет сочетания конкуренции и сотрудничества, инновационного потенциала, совместного опыта и общих ресурсов [32].

Концепция цифровизации **–** это масштабный процесс внедрения цифровых технологий (AI, IoT, Big Data) во все сферы жизни и бизнеса для изменения процессов, повышения их скорости, качества, снижения затрат и создания новой ценности. Она базируется на переходе от автоматизации к созданию цифровых экосистем, обеспечивающих повышение эффективности экономики и качества жизни.

Белорусский подход к цифровому развитию сегодня базируется на Концепции цифрового суверенитета Республики Беларусь до 2030 г., принятой Советом Министров 31 декабря 2024 г. Этот документ определяет стратегические меры по обеспечению независимости страны в сфере цифровых технологий [33].

Неокластерная концепция – это современная модель экономического развития, эволюционировавшая из классических кластеров. Она базируется на межотраслевой интеграции, активном внедрении инновационных технологий, формировании новых ниш и создании высокотехнологичных конкурентных преимуществ. Неокластеры стимулируют динамичный рост и инновационную активность.

Неокластеризация заключается в использовании инструментов Индустрии 4.0. для формирования «умной кооперации» (smart-кооперации) стейкхолдеров в генерации востребованных инновационных продуктов и развитии smart-индустрии и общества. Smart-кооперация представляет собой совместное выполнение действий субъектами для достижения общих целей на основе цифровых технологий. В отличие от обычных процессов кластеризации, неокластеризация базируется на цифровых платформах. В инновационных кластерах взаимодействие стейкхолдеров переносится в онлайн-среду,

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-238-243

что обеспечивает страхование от возможных рисков (эпидемии, закрытие границ и другое) [34].

Основные характеристики неокластерной концепции следующие:

– межотраслевая интеграция: объединение не только смежных отраслей, но и принципиально разных секторов для создания синергии;

– инновационная ориентированность: фокус на внедрении передовых технологий, цифровизации и научно-исследовательских разработках;

– гибкость и адаптивность: быстрая реакция на изменения рынка за счет сетевой структуры;

– создание новых ниш: ориентация на формирование принципиально новых рынков, а не только укрепление существующих;

– устойчивое развитие: внимание к экологическим и социальным аспектам бизнеса.

Концепция часто применяется в рамках региональной политики для модернизации экономики и повышения международной конкурентоспособности.

Предпосылки горизонтальной цифровизации

Важным фактором, повлиявшим на трансформацию кластерной концепции, является Четвертая промышленная революция (Индустрия 4.0), которая меняет экономику и общество. Она быстро перестраивает бизнес-среду. В этом контексте основной особенностью успешных экономик будет их способность быть гибкими, адаптироваться к изменениям и обладать новыми факторами, соответствующими Индустрии 4.0, такими как Интернет вещей; искусственный интеллект, машинное обучение и робототехника; облачные вычисления; Big Data; аддитивное производство; кибербезопасность; интеграционная система; моделирование; дополненная реальность.

Основные направления Индустрии 4.0 представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Основные направления Индустрии 4.0

Источник: на основе [35].

Индустрия 4.0 позволит отечественным предприятиям не только увеличить собственную прибыль за счет снижения себестоимости и роста производительности труда, но и выйти на новый технологический уровень развития и найти новые рыночные ниши, встраиваться в глобальные цепочки добавленной стоимости. Это возможно в формате горизонтальной интеграции и цифровизации.

Понятийный аппарат горизонтальной цифровизации

Горизонтальная цифровизация строится на кластерном подходе, концепции цифровизации и неокластерной концепции. Она охватывает по цепочке ценностей всех субъектов и способствует формированию неокластера.

Обоснованный выше концептуальный подход позволил идентифицировать горизонтальную и вертикальную цифровизацию (рисунок 3).



Рисунок 3 – Модель цифровизации по цепочке ценностей

Источник: собственная разработка на основе [36].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-238-243

Горизонтальная цифровизация заключается в использовании инструментов Индустрии 4.0. для формирования «умной кооперации» (smart-кооперации) стейкходеров в генерации востребованных инновационных продуктов и развитии smart-индустрии и общества. Smart-кооперация представляет собой совместное выполнение действий субъектами для достижения общих целей на основе цифровых технологий. В отличие от обычных процессов кластеризации, горизонтальная цифровизация базируется на цифровых платформах.

Вертикальная цифровизация – это процесс комплексного внедрения цифровых технологий на всех уровнях производственной или управленческой иерархии: от разработки продуктов и заканчивая производством, логистикой и обслуживанием в процессе эксплуатации. Она связывает этапы создания продукта (разработка, производство, сбыт) в единую цифровую экосистему для сквозного контроля и оптимизации.

Основные аспекты вертикальной цифровизации:

– интеграция данных: создание общей цифровой среды, объединяющей информационные системы (ИС) разных уровней (например, ERP, MES, АСУ ТП);

– управление цепочкой: прозрачность процессов от сырья до конечного потребителя, улучшающая принятие решений;

– примеры: в строительстве – объединение проектирования, экспертизы и контроля строительства в единой цифровой вертикали. В медицине – система, объединяющая медкарты, телемедицину и аналитику;

– цели: повышение производительности, сокращение издержек, ускорение принятия управленческих решений и снижение влияния человеческого фактора.

Вертикальная цифровизация создает «цифровой след» на каждом этапе, позволяя оперативно реагировать на отклонения.

Отличительные признаки горизонтальной цифровизации представлены в таблице 1.

Формой реализации горизонтальной цифровизации является smart-кооперация.

Smart-кооперация стейкхолдеров – это ключевое направление цифровой трансформации промышленности Беларуси, объединяющее бизнес, науку и государство через цифровые платформы для создания высокотехнологичной продукции. Этот подход повышает конкурентоспособность, обеспечивает переход к циркулярной экономике, оптимизирует производственные цепочки и ускоряет внедрение инноваций в реальный сектор.

Формой реализации вертикальной цифровизации является smart-индустрия, которая рассматривается как межотраслевой комплекс, включающий совокупность коммерческих организаций всех форм собственности, основным видом деятельности которых является промышленное производство, учреждений и субъектов инновационной инфраструктуры (инфраструктуры поддержки МСП), осуществляющих и обеспечивающих разработку, производство и продвижение на рынок продукции с использованием элементов концепции «Индустрия 4.0» [37].

Smart-индустрия позволяет ускорить достижение Целей устойчивого развития 9 (Индустриализация, инновация и инфраструктура), 8 (Достойная работа и экономический рост), 11 (Устойчивые города и населённые пункты) [38].

На основе разработанных теоретических основ горизонтальной цифровизации, сформулированы ее преимущества:

– ускорение вывода новой продукции на рынок. Использование цифровых технологий позволяет сократить время на разработку и тестирование новых продуктов, что способствует более быстрому выводу их на рынок;

– повышение безопасности и надежности производства. Внедрение систем мониторинга и анализа данных позволяет предотвращать аварии и сбои в работе оборудования, повышая тем самым безопасность производства;

– увеличение гибкости производства. Цифровизация позволяет оперативно реагировать на изменения спроса, адаптируя производство под новые условия, что увеличивает его гибкость;

– повышение контроля за производством с целью повышения качества изготавливаемых товаров. Цифровизация процессов контроля качества и использование аналитики данных позволяют выявлять и устранять дефекты на ранних стадиях производства, повышая качество продукции;

– общее увеличение эффективности производств. Применение цифровых технологий способствует оптимизации производственных процессов, снижению затрат и увеличению общей эффективности работы предприятия;

– внедрение технологий бережливого производства. С помощью специализированных ИТ-платформ компании могут упростить внедрение концепции бережливого производства и автоматизировать управление этой системой. Такие платформы могут быть адаптированы под нужды конкретной компании и стать незаменимым инструментом на разных этапах бережливого производства.

Таблица 1 – Отличительные признаки вертикальной и горизонтальной цифровизации

Признаки	Вертикальная цифровизация	Горизонтальная цифровизация
Объекты	происходит внутри предприятия, затрагивая все бизнес-процессы, начиная с разработки идеи продукции и заканчивая послепродажным обслуживанием потребителей	охватывает взаимодействие субъектов институциональной среды, интегрируемые в единую информационную систему в реальном времени, включая все операции поставщиков, подрядчиков, собственников, акционеров и других стейкхолдеров по всей цепочке создания ценности
Субъекты	Персонал организации	поставщики, подрядчики, посредники, собственники, акционеры, контактные аудитории
Форма реализации	Smart-индустрия	Smart-кооперация
Инструменты	Единая информационная система (например, ERP, MES, АСУ ТП), искусственный интеллект, блокчейн, анализ больших данных.	Единая информационная система в реальном времени (например, CRM-система), цифровые бизнес-модели и интерактивное взаимодействие с ключевыми и компетентными клиентами на основе управляемых данными сервисов и интегрированных платформенных решений (например, искусственный интеллект, блокчейн, анализ больших данных
Преимущества	Доступность управленческой информации заранее определенному кругу лиц из любой точки входа в систему в режиме реального времени, формирование цифровой культуры и обучение цифровым навыкам сотрудников организаций	Сбалансированные и доверительные взаимоотношения всех субъектов внешних бизнес-процессов, обеспечение цифрового доверия и оптимального порядка выбора, анализа и хранения данных
Эффект	Снижение издержек	Снижение трансакционных издержек, повешение уровня доверия между стейкхолдерами

Источник: составлено авторами.

Заключение

Присущие Индустрии 4.0 компоненты обеспечивают повышение уровня эффективности производства и дополнительный доход за счет использования цифровых технологий, комплексных систем автоматизации, формирования сетевого взаимодействия поставщиков, производителей, университетов, государства и общества. Таким образом, горизонтальная цифровизация строится на кластерном подходе, охватывает по цепочке ценностей всех субъектов и способствует формированию кластера.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-238-243

Список цитированных источников

1. Best, M. H. Cluster Dynamics in Theory and Practice: Singapore / M. H. Best. – Johor and Penang Electronics, 2003. – URL: http://www.oecd.org/daf/corporate (date of access: 20.01.2026).
2. Roelandt, Theo J.A. and Pim den Hertog. Cluster Analysis and Cluster-Based Policy Making: The State of The Art, chapter 17 in OECD / Theo J. A. Roelandt, den Hertog Pim // Boosting Innovation: The Cluster Approach OECD Publications Service, Paris, France, 1999. – P. 9–23.
3. De Bresson, C. Breeding Innovation Clusters: A Source of Dynamic Development / C. De Bresson // World Development. – 1989. – Vol. 17, Iss. 1. – P. 1–16. – DOI: 10.1016/0305-750X(89)90218-0.
4. Luukkainen, S. Industrial Cluster in the Finnish Economy / S. Luukkainen // VTT Group for Technology Studies. P.O. BOX 1002. – URL: http://www.oecd.org/daf/corporate (date of access: 20.01.2026).
5. Porter, M. Location, competition and economic development: local clusters in the global economy / M. Porter // Economic Development Quarterly. – 2000. – № 14. – P. 15–31.
6. Porter, M. Clusters versus Industrial Policy / M. Porter // On Competition. – Cambridge, MA : Harvard Business School Press, 1998. – P. 197–287.
7. Портер, М. Конкуренция : пер. с англ. / М. Портер. – М. : Вильямс, 2002. – 496 с.
8. Enright, M. Local Partnership, Clusters and SME Globalisation / M. Enright, I. Ffowcs-Williams // OECD Workshop paper. – Bologna : OECD, 2001. – 32 p.
9. Humphrey, J. How does insertion in global value chains affect upgrading in industrial clusters? / J. Humphrey, H. Schmitz. – Brighton : Institute of Development Studies, 2002. – 16 p.
10. Rosenfeld, S. Bringing Business Clusters into the Mainstream of Economic Development / S. Rosenfeld // European Planning Studies. – 1997. – № 5. – P. 3–23.
11. Лозинский, С. Конкурентоспособность и отраслевые кластеры: новая повестка дня для российского бизнеса и власти / С. Лозинский, А. Праздничных // Мир Стройиндустрии. – 2003. – № 2. – С. 14–19.
12. Миранян, А. А. Теоретические аспекты формирования конкурентоспособных кластеров в странах с переходной экономикой / А. А. Миранян // Вестник КРСУ. – 2002. – URL: http://www.nccg.ru/site.xp/049054056050124.html (дата обращения: 15.02.2026).
13. Марков, Л. С. Проблемы реализации кластерной политики в России / Л. С. Марков // Научный эксперт. – 2007. – № 4. – С. 20–30.
14. Цихан, Т. В. Кластерная теория экономического развития / Т. В. Цихан // Теория и практика управления. – 2003. – С. 65.
15. Истомина, Л. А. Кластеры в регионах: «ЗА» И «НЕПРОТИВ» : пособие / Л. А. Истомина, Д. М. Крупский. – Минск : АльтиораФорте, 2019. – 120 с.
16. Нехорошева, Л. Н. Инновационные системы современной экономики / Л. Н. Нехорошева, Н. И. Богдан. – Минск : БГЭУ, 2003. – 354 с.
17. Третьяк, В. П. Кластеры фирм как проявление квазиинтеграции / В. П. Третьяк // Сайт I. Marketing. – URL: http://www.virtass.ru (дата обращения: 15.02.2026).
18. Валетко, В. Промышленные кластеры как институциональные структуры инновационного развития / В. Валетко // Бел. экон. портал «Єкономика.by». – URL: http://www.ekonomika.by/downloads/valetka2004_clusters_innovations.pdf (дата обращения: 17.01.2026).
19. Синяк, Н. Г. Эффективная кластерная политика и развитие отраслевых кластеров. Выявление и развитие кластеров в лесопромышленном комплексе Беларуси / Н. Г. Синяк, В. Валетко // Кластеры в Беларуси – альянс науки, бизнеса и государства : сб. докладов совещания-семинара // Сайт «Cluster.by». – URL: http://www.cluster.by/files/Cluster_in_Belarus.pps (дата обращения: 18.02.2026).
20. Пятинкин, С. Ф. Развитие кластеров: сущность, актуальные подходы, зарубежный опыт / С. Ф. Пятинкин, Т. П. Быкова. – Минск : Тесей, 2008. – 72 с.
21. Яшева, Г. А. Кластеры в цифровой экономике: методология, тенденции, практика. Монография / Г. А. Яшева, Ю. Г. Вайлунова, Н. Л. Касаева. – Витебск : ВГТУ, 2023. – 219 с.
22. Экономико-статистическое исследование влияния цифровизации на инновационную активность организаций промышленности Союзного государства / Г. А. Яшева, Ю. Г. Вайлунова, Е. Ю. Вардомацкая, О. М. Шерстнева // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2025. – № 1 (51). – С. 130–148. – DOI: 10.24412/2079-7958-2025-1-130-148.
23. Рябчук, П. Г. Структурообразующие направления развития Индустрии 4.0. в условиях цифровизации промышленного производства / П. Г. Рябчук, Е. С. Омельченко // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2022. – № 8–2. – С. 290–294.
24. Бекбергенева, Д. Е. Ключевые направления развития Индустрии 4.0 в современных условиях цифровизации экономики / Д. Е. Бекбергенева // Экономика и управление народным хозяйством. – 2020. – № 4 (185). – С. 61–65. – URL: https://ecsn.ru/wp-content/uploads/202004_61.pdf (дата обращения: 18.02.2026).
25. Шкодинский, С. В. Цифровая трансформация как инструмент снижения трансакционных издержек в вертикально интегрированных структурах / С. В. Шкодинский, А. А. Гайнитдинов // Региональная и отраслевая экономика. – 2025. – № 3. – С. 11–20. – DOI: 10.47576/2949-1916.2025.3.3.001.
26. Ватлина, Л. В. Цифровизация и инновационное развитие экономики / Л. В. Ватлина, В. А. Плотников // Известия. – 2023. – № 1. – С. 106–113.
27. Головенчик, Г. Г. Цифровая экономика в Республике Беларусь: современные тенденции, вызовы и перспективы / Г. Г. Головенчик // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. – 2022. – № 3, Т. 30. – С. 414–428.
28. Бодрунов, С. Д. Технологический прогресс: предпосылки и результат социогуманитарной ориентации экономического развития / С. Д. Бодрунов // Экономическое возрождение России. – 2022. – № 1 (71). – С. 5–13.
29. Ачаповская, М. Цифровизация экономики как драйвер инновационного развития / М. Ачаповская // Банкаускі веснік. – 2019. – № 1. – С. 52–58.
30. Быковская, Е. Н. Современные тенденции цифровизации инновационного процесса / Е. Н. Быковская, Г. П. Харчилава, Ю. Н. Кафиятуллина // Управление. – 2018. – № 6 (1). – С. 38–43. – DOI: 10.26425/2309-3633-2018-1-38-43.
31. Калиновская, И. Н. Анализ уровня цифровизации экономики Республики Беларусь и ее регионов / И. Н. Калиновская // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2023. – № 45. – С. 82–94. – DOI: 10.24412/2079-7958-2023-2-82-94.
32. Попов, Е. В. Эволюция бизнес-экосистем в промышленности – от классического типа к цифровым / Е. В. Попов, В. Л. Симонова, А. С. Зырянов // Информатизация в цифровой экономике. – 2024. – Т. 5, № 3. – С. 341–360. – DOI: 10.18334/ide.5.3.121748.
33. Яшева, Г. А. Кластерный подход в инновационном развитии экономики: концептуальные основы и направления реализации / Г. А. Яшева // Економічний вісник університету. – 2016. – № 29/1. – С. 46–56.
34. Яшева, Г. А. Кластерный подход в повышении конкурентоспособности предприятий : монография / Г. А. Яшева. – Витебск : ВГТУ, 2007. – 301 с.
35. Как будет обеспечиваться суверенитет Беларуси в сфере цифрового развития до 2030 года? Утверждена Концепция // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь : [сайт]. – Минск, 2003–2025. – URL: https://pravo.by/novosti/novosti-pravo-by/2025/january/80251 (дата обращения: 10.02.2026).
36. Яшева, Г. А. Предпосылки трансформации кластерной концепции в условиях Индустрии 4.0 / Г. А. Яшева, Ю. Г. Вайлунова // Материалы докладов 54-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов : в 2 т. / ВГТУ. – Витебск, 2021. – Т. 1. – С. 208–210.
37. Götz, M. The Industry 4.0 Induced Agility and New Skills in Clusters / M. Götz // Foresight and STI Governance. – 2019. – Vol. 13, № 2. – P. 72–83.
38. Porter, M. E. Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors / M. E. Porter. – New York : Free Press, 1980 (republ. 1998). – 396 p.
39. Положение об организационно-технологической платформе «Смарт-индустрия Беларуси». – URL: https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/proekt-Polozhenija.pdf (дата обращения: 10.02.2026).
40. Платформа для смарт-индустрии будет создана в Беларуси. – URL: https://sdgs.by/news/platforma-dlya-smart-industrii-budet-sozdana-v-belarusi/?print=print (дата обращения: 10.02.2026).

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-238-243

References

1. Best, M. H. Cluster Dynamics in Theory and Practice: Singapore / M. H. Best. – Johor and Penang Electronics, 2003. – URL: http://www.oecd.org/daf/corporate (date of access: 20.01.2026).
2. Roelandt, Theo J.A. and Pim den Hertog. Cluster Analysis and Cluster-Based Policy Making: The State of The Art, chapter 17 in OECD / Theo J. A. Roelandt, den Hertog Pim // Boosting Innovation: The Cluster Approach OECD Publications Service, Paris, France, 1999. – P. 9–23.
3. De Bresson, C. Breeding Innovation Clusters: A Source of Dynamic Development / C. De Bresson // World Development. – 1989. – Vol. 17, Iss. 1. – P. 1–16. – DOI: 10.1016/0305-750X(89)90218-0.
4. Luukkainen, S. Industrial Cluster in the Finnish Economy / S. Luukkainen // VTT Group for Technology Studies. P.O. BOX 1002. – URL: http://www.oecd.org/daf/corporate (date of access: 20.01.2026).
5. Porter, M. Location, competition and economic development: local clusters in the global economy / M. Porter // Economic Development Quarterly. – 2000. – № 14. – R. 15–31.
6. Porter, M. Clusters versus Industrial Policy / M. Porter // On Competition. – Cambridge, MA : Harvard Business School Press, 1998. – P. 197–287.
7. Porter, M. Konkurenciya : per. s angl. / M. Porter. – M. : Vil'yams, 2002. – 496 s.
8. Enright, M. Local Partnership, Clusters and SME Globalisation / M. Enright, I. Ffowcs-Williams // OECD Workshop paper. – Bologna : OECD, 2001. – 32 p.
9. Humphrey, J. How does insertion in global value chains affect upgrading in industrial clusters? / J. Humphrey, H. Schmitz. – Brighton : Institute of Development Studies, 2002. – 16 p.
10. Rosenfeld, S. Bringing Business Clusters into the Mainstream of Economic Development / S. Rosenfeld // European Planning Studies. – 1997. – № 5. – P. 3–23.
11. Lozinskij, S. Konkurentosposobnost' i otraslevye klastery: novaya povestka dnya dlya rossijskogo biznesa i vlasti / S. Lozinskij, A. Prazdnichnyh // Mir Strojindustrii. – 2003. – № 2. – S. 14–19.
12. Migranyan, A. A. Teoreticheskie aspekty formirovaniya konkurentosposobnyh klasterov v stranah s perekhodnoj ekonomikoj / A. A. Migranyan // Vestnik KRSU. – 2002. – URL: http://www.nccg.ru/site.xp/049054056050124.html (data obrashcheniya: 15.02.2026).
13. Markov, L. S. Problemy realizacii klasternoj politiki v Rossii / L. S. Markov // Nauchnyj ekspert. – 2007. – № 4. – S. 20–30.
14. Cihan, T. V. Klasternaya teoriya ekonomicheskogo razvitiya / T. V. Cihan // Teoriya i praktika upravleniya. – 2003. – S. 65.
15. Istomina, L. A. Klastery v regionah: «ZA» I «NEPROTIV» : posobie / L. A. Istomina, D. M. Krupskij. – Minsk : Al'tioraForte, 2019. – 120 s.
16. Nekhorosheva, L. N. Innovacionnye sistemy sovremennoj ekonomiki / L. N. Nekhorosheva, N. I. Bogdan. – Minsk : BGEU, 2003. – 354 s.
17. Tret'yak, V. P. Klastery firm kak proyavlenie kvaziintegracii / V. P. Tret'yak // Sajt I. Marketing. – URL: http://www.virtass.ru (data obrashcheniya: 15.02.2026).
18. Valetko, V. Promyshlennye klastery kak institucional'nye struktury innovacionnogo razvitiya / V. Valetko // Bel. ekon. portal «€konomika.by». – URL: http://www.ekonomika.by/downloads/valetka2004_clusters_innovations.pdf (data obrashcheniya: 17.01.2026).
19. Sinyak, N. G. Effektivnaya klasternaya politika i razvitie otraslevyh klasterov. Vyyavlenie i razvitie klasterov v lesopromyshlennom komplekse Belarusi / N. G. Sinyak, V. Valetko // Klastery v Belarusi – al'yans nauki, biznesa i gosudarstva : sb. dokladov soveshchaniya-seminara // Sajt «Sluster.by». – URL: http://www.cluster.by/files/Cluster_in_Belarus.pps (data obrashcheniya: 18.02.2026).
20. Pyatinkin, S. F. Razvitie klasterov: sushchnost', aktual'nye podhody, zarubezhnyj opyt / S. F. Pyatinkin, T. P. Bykova. – Minsk : Tesej, 2008. – 72 s.
21. YAsheva, G. A. Klastery v cifrovoj ekonomike: metodologiya, tendencii, praktika. Monografiya / G. A. YAsheva, YU. G. Vajlunova, N. L. Kasaeva. – Vitebsk : VGTU, 2023. – 219 s.
22. Ekonomiko-statisticheskoe issledovanie vliyaniya cifrovizacii na innovacionnuyu aktivnost' organizacij promyshlennosti Soyuznogo gosudarstva / G. A. YAsheva, YU. G. Vajlunova, E. YU. Vardomackaya, O. M. SHerstneva // Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2025. – № 1 (51). – S. 130–148. – DOI: 10.24412/2079-7958-2025-1-130-148.
23. Ryabchuk, P. G. Strukturoobrazuyushchie napravleniya razvitiya Industrii 4.0. v usloviyah cifrovizacii promyshlennogo proizvodstva / P. G. Ryabchuk, E. S. Omel'chenko // Vestnik Altajskoj akademii ekonomiki i prava. – 2022. – № 8–2. – S. 290–294.
24. Bekbergeneva, D. E. Klyuchevye napravleniya razvitiya Industrii 4.0 v sovremennyh usloviyah cifrovizacii ekonomiki / D. E. Bekbergeneva // Ekonomika i upravlenie narodnym hozyajstvom. – 2020. – № 4 (185). – S. 61–65. – URL: https://ecsn.ru/wp-content/uploads/202004_61.pdf (data obrashcheniya: 18.02.2026).
25. SHkodinskij, S. V. Cifrovaya transformaciya kak instrument snizheniya transakcionnyh izderzhek v vertikal'no integrirovannyh strukturah / S. V. SHkodinskij, A. A. Gajnitdinov // Regional'naya i otraslevaya ekonomika. – 2025. – № 3. – S. 11–20. – DOI: 10.47576/2949-1916.2025.3.3.001.
26. Vatlina, L. V. Cifrovizaciya i innovacionnoe razvitie ekonomiki / L. V. Vatlina, V. A. Plotnikov // Izvestiya. – 2023. – № 1. – S. 106–113.
27. Golovenchik, G. G. Cifrovaya ekonomika v Respublike Belarus': sovremennye tendencii, vyzovy i perspektivy / G. G. Golovenchik // Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekonomika. – 2022. – № 3, T. 30. – S. 414–428.
28. Bodrunov, S. D. Tekhnologicheskij progress: predposylki i rezul'tat sociogumanitarnoj orientacii ekonomicheskogo razvitiya / S. D. Bodrunov // Ekonomicheskoe vozrozhdenie Rossii. – 2022. – № 1 (71). – S. 5–13.
29. Achapovskaya, M. Cifrovizaciya ekonomiki kak drajver innovacionnogo razvitiya / M. Achapovskaya // Bankauski vesnik. – 2019. – № 1. – S. 52–58.
30. Bykovskaya, E. N. Sovremennye tendencii cifrovizacii innovacionnogo processa / E. N. Bykovskaya, G. P. Harchilava, YU. N. Kafiyatullina // Upravlenie. – 2018. – № 6 (1). – C. 38–43. – DOI: 10.26425/2309-3633-2018-1-38-43.
31. Kalinovskaya, I. N. Analiz urovnya cifrovizacii ekonomiki Respubliki Belarus' i ee regionov / I. N. Kalinovskaya // Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2023. – № 45. – C. 82–94. – DOI: 10.24412/2079-7958-2023-2-82-94.
32. Popov, E. V. Evolyuciya biznes-ekosistem v promyshlennosti – ot klassicheskogo tipa k cifrovym / E. V. Popov, V. L. Simonova, A. S. Zyryanov // Informatizaciya v cifrovoj ekonomike. – 2024. – T. 5, № 3. – C. 341–360. – DOI: 10.18334/ide.5.3.121748.
33. YAsheva, G. A. Klasternyj podhod v innovacionnom razvitii ekonomiki: konceptual'nye osnovy i napravleniya realizacii / G. A. YAsheva // Ekonomichnij visnik universitetu. – 2016. – № 29/1. – S. 46–56.
34. YAsheva, G. A. Klasternyj podhod v povyshenii konkurentosposobnosti predpriyatij : monografiya / G. A. YAsheva. – Vitebsk : VGTU, 2007. – 301 s.
35. Kak budet obespechivat'sya suverenitet Belarusi v sfere cifrovogo razvitiya do 2030 goda? Utverzhdena Koncepciya // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus' : [sajt]. – Minsk, 2003–2025. – URL: https://pravo.by/novosti/novosti-pravo-by/2025/january/80251/ (data obrashcheniya: 10.02.2026).
36. YAsheva, G. A. Predposylki transformacii klasternoj koncepcii v usloviyah Industrii 4.0 / G. A. YAsheva, YU. G. Vajlunova // Materialy dokladov 54-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii prepodavatelej i studentov : v 2 t. / VGTU. – Vitebsk, 2021. – T. 1. – S. 208–210.
37. Götz, M. The Industry 4.0 Induced Agility and New Skills in Clusters / M. Götz // Foresight and STI Governance. – 2019. – Vol. 13, № 2. – P. 72–83.
38. Porter, M. E. Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors / M. E. Porter. – New York : Free Press, 1980 (republ. 1998). – 396 p.
39. Polozhenie ob organizacionno-tekhnologicheskoj platforme «Smart-industriya Belarusi». – URL: https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/proekt-Polozhenija.pdf (data obrashcheniya: 10.02.2026).
40. Platforma dlya smart-industrii budet sozdana v Belarusi. – URL: https://sdgs.by/news/platforma-dlya-smart-industrii-budet-sozdana-v-belarusi/?print=print (data obrashcheniya: 10.02.2026).

Материал поступил 27.02.2026, одобрен 05.03.2026, принят к публикации 05.03.2026

УДК 005.95/.96

АНКЕТА УПРАВЛЯЕМОСТИ: НОВЫЙ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МЕНЕДЖЕРОВ И HR-СПЕЦИАЛИСТОВ. СОЗДАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ КОМАНДЫ

И. М. Гарчук[1], А. А. Казберович[2]

[1] К. э. н., доцент, заведующий кафедрой менеджмента, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: garchuk_im@mail.ru

[2] Студент, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: 04.07.15.2006.dadin.11@gmail.com

Реферат

Грамотное распределение человеческих ресурсов – один из ключевых аспектов работы современного предприятия, определяющий эффективность хозяйственной деятельности в целом, использования предметов и средств труда, а также конкурентоспособность на рынке [5]. Ключевым моментом в данном процессе является необходимость подобрать такой коллектив и такого руководителя, чтобы производительность труда в этом коллективе была максимальна, не возникало конфликтов не только на почве человеческих взаимоотношений, но и недопониманий, споров на основе несопоставления интересов и ожиданий работников. Важно определить, насколько люди в коллективе автономны, какого отношения они ждут от начальника и в чем их истинная мотивация. Каждый человек индивидуален, поэтому невозможно подвести человеческую природу поведения в точные и идеально выверенные цифры. В этой связи разработанная авторами «Анкета управляемости» позволит оценить эффективность системы управления коллективом, выявить конфликтные отношения в коллективе, определить уровень корпоративной культуры, разработать стратегию развития компании, эффективно подобрать команды для проектов, а также оперативно выявить проблему во взаимоотношениях двух сотрудников или сотрудника и руководителя.

«Анкета управляемости» ставит своей целью внести ясность в мотивацию людей на основе их рабочих ожиданий, а также провести параллель между мотивацией и созданием эффективной рабочей команды на основе совпадения интересов руководителя и его подчиненных, а также работников между собой.

В статье рассмотрена теоретическая основа концепции «Анкеты управляемости»: принцип разработки и пошаговая логика подсчета ее результатов; понятие «Ядра» работника и объяснение шаблонного поведения для S-, F-, I-, C-Ядра; понятие «Оттенка» и вариаций S-, F-, I-, C-; разбор каждого из 16 профилей работника, получаемых в результате сопоставления «Ядра» и «Оттенка»; оценка мотивационных факторов и шаблонного поведения каждого профиля; понятие «Баллов управляемости» и практическое применение в деятельности HR-специалистов и менеджеров; комплексная оценка эффективности команды согласно разработанной системы показателей.

Ключевые слова: анкета управляемости, HR-специалист, менеджер, организация, профиль, эффективность, коэффициент управляемости, индексы взаимодействия, матрица, производительность труда.

MANAGEMENT QUESTIONNAIRE: A NEW TOOL FOR MANAGERS AND HR SPECIALISTS. BUILDING AN EFFECTIVE TEAM

I. M. Garchuk, A. A. Kazberovich

Abstract

Proper allocation of human resources is a key aspect of a modern enterprise, determining the overall efficiency of business operations, the use of tools and equipment, and market competitiveness [12]. A key aspect of this process is the need to select a team and a manager that maximizes productivity and avoids conflicts not only based on human interactions but also misunderstandings and disputes based on misaligned interests and expectations. It is important to determine the extent of autonomy within the team, the attitude they expect from their manager, and their true motivation. Each person is unique, so it is impossible to distill human behavior into precise and perfectly calibrated figures. In this regard, the «Manageability Questionnaire» developed by the authors will allow one to assess the effectiveness of the team management system, identify conflicts within the team, determine the level of corporate culture, develop a company development strategy, effectively select teams for projects, and quickly identify problems in relationships between two employees or between an employee and a manager.

The «Controllability Questionnaire» aims to clarify people's motivation based on their work expectations, as well as to draw a parallel between motivation and the creation of an effective work team based on the alignment of interests between the manager and their subordinates, as well as between employees.

This article examines the theoretical basis of the «Controllability Questionnaire» concept: the development principle and the step-by-step logic for calculating its results; the concept of an employee's «Core» and an explanation of the patterned behavior of employees for the S-, F-, I-, and C-Core; the concept of «Shade» and variations of S-, F-, I-, and C-; an analysis of each of the 16 employee profiles obtained by comparing the «Core» and «Shade»; an assessment of the motivational factors and patterned behavior of each profile; the concept of «Controllability Points» and its practical application in the work of HR specialists and managers; and a comprehensive assessment of team effectiveness according to the developed system of indicators.

Keywords: manageability questionnaire, HR specialist, manager, organization, profile, efficiency, manageability coefficient, interaction indices, matrix, labor productivity.

Введение

Сложность оценки социальной стороны эффективности взаимодействия работника и руководителя заключается в том, что недостаточно рассчитать производительность или трудоемкость, чтобы сделать комплексный, развернутый вывод об отношениях в коллективе. Далеко не всегда HR-специалист или менеджер будет удовлетворен выводом «Эффективно» или «Не эффективно», потому что этот вывод не позволит решить проблемы, не позволит определить, может ли возникнуть конфликт в коллективе и на какой почве это вероятнее всего произойдет [3]. «Анкета управляемости» предполагает

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-244-252

частичное или полное решение этих проблем, так затрагивает аспекты мотивации и желаемые условия труда работника, его ожидания от рабочего места и меру мотивации, которая поможет ему работать намного эффективнее. Эффективность работы по результатам анкеты и подсчету баллов управляемости оценивается не индивидуально, а в паре: руководитель – работник, работник – работник, что позволит быстро и точно определить, где может возникнуть конфликт или недопонимание. Совмещение взаимодействия этих пар представляет собой общий, комплексный показатель эффективности команды, который будет незаменим для HR-специалиста или менеджера [14].

Данная концепция основана на «Спиральной динамике» У. Грейвза, а также трудах его последователя Ф. Лалу «Открывая организации будущего». На данный момент не существует другой концепции, предполагающей расчет эффективности взаимодействия подчиненных и руководителя, все авторские труды ограничены психологическим аспектом [16]. Поэтому, в управленческой литературе данный абстрактно-расчетный вопрос остается открытым для обсуждения. В «Анкете управляемости» допустимы расхождения с оригинальной концепцией «Спиральной динамики», но сама анкета и ее результаты являются авторской разработкой.

Теория, позволяющая определить отношение человека к себе и внешнему миру, может быть использована в интересах управленцев и специалистов по работе с персоналом,

Анкета управляемости. Методика определения результатов

«Анкета управляемости» представляет собой набор вопросов (в оригинальной версии 7), которые позволяют определить общие сведения о ценностях работника, его мотивации, методах, которыми он решает проблемы, а также о желаемых условиях труда [17]. По своей значимости вопросы разделены на две группы:

1. Группа А: Вопросы о ядре и ценностях. Отвечают на следующие вопросы: «Какой я вижу идеальную работу?», «Ради чего я работаю?», «Что для меня главное в работе?». Вопросы группы А (главные) представлены ниже.

1. Для меня идеальные рабочие условия – это...

S. Стабильность на рабочем месте, четкий регламент, каждый не лезет не в свое дело (10);

F. Тимбилдинг, все работают в команде, группах или парах (7);

I. Возможность проявить инициативу, разнообразие задач, здоровая конкуренция в коллективе и взаимодействие с коллегами при выполнении задач (5);

C. Самореализация «в своем мире», творческая работа, но не ради признания коллег и начальника (3).

2. В работе для вас главный мотиватор…

S. Стабильная зарплата, социальные гарантии, отработал – свободен (10);

F. Чувство нахождения в коллективе, своеобразной семье, осознание, что ты нужен команде (7);

I. Деньги, подъем по социальной лестнице (5);

C. Возможность раскрыть свой потенциал, профессионально развиваться (3).

3. Что для вас важнее в работе?

S. Выполнить в срок, как можно лучше, без форс-мажоров (10);

F. Работа в команде, где ни один коллега не будет чувствовать себя обиженным (7);

I. Конкретный результат, осязаемый или измеримый в цифрах (5);

C. Качество и интересность проекта, неспешное выполнение и внимание к деталям (3).

2. Группа Б: Вопросы о методах и реакциях. Отвечают на вопросы: «Как я действую в кризисе?», «Как я реагирую на новое?», «Как я отношусь к правилам?», «Как я предпочитаю получать обратную связь о своей работе?». Часть анкеты, относящаяся к группе Б (второстепенные вопросы), представлена ниже.

1. Когда на работе возникает проблема или сложная ситуация, я скорее всего...

S. Посмотрю инструкцию или спрошу у более опытного сотрудника, руководителя (10);

F. Обсудим с коллегами, вместе найдем решение (7);

I. Возьму на себя ответственность и выкручусь из ситуации вне зависимости от сложности (5);

C. Попытаюсь понять глубинные причины, найти нестандартное, системное решение, которое предотвратит подобное в будущем (3).

2. Как вы относитесь к изменениям?

S. С осторожностью, изменения должны быть четко обоснованы и внедрены постепенно (10);

F. Положительно, если весь коллектив поддержит изменения (7);

I. Отлично, если изменения дадут возможности и импульс для моего роста (5);

C. С энтузиазмом, нужно двигаться вперед и развиваться как профессионал (3).

3. Ваше отношение к регламенту?

S. Правила созданы чтобы их соблюдать, какой бы закон ни был, он должен быть исполнен (10);

F. Правила важны, но не важнее человеческих отношений в коллективе (7);

I. Правила – не больше, чем инструмент. Если они стопорят рост, значит их нужно редактировать (5);

C. Правила стоит пересмотреть, если они нелогичны или противоречат друг другу. Важны не сами правила, а смысл и принципы, заложенные в них (3).

4. Как вы предпочитаете получать обратную связь о своей работе?

S. В формальной обстановке, по конкретным пунктам в моей работе (10);

F. В доброжелательной, спокойной обстановке, без резкой критики (7);

I. Честно, прямо, по делу, не важна суть, а не форма обращения (5);

C. В формате личного диалога, с возможностью обсудить не только результат, но и идеи, перспективы (3).

У каждого вопроса есть 4 варианта ответа, обозначенные специальными буквами: S – стабильный (stable), F – семейный (family), I – захватнический (invasive), C – созидательный (constructive). Каждый вариант отвечает за одно из четырех ядер, которыми может обладать работник. В данном контексте, ядро – это главная характеристика работника, которая берется за основу в дальнейшей классификации. За каждый ответ начисляется определенное количество баллов управляемости (S – 10, F – 7, I – 5, C – 3), которые в результате будут не менее важным индикатором для HR-специалиста или менеджера, чем непосредственный результат – профиль работника.

При определении результатов анкеты, данные работника записываются в формате X-X-X-X-X-X-X, где X – буква ответа на конкретный вопрос. Методика подсчета результатов и правила, которые следует учитывать, представлены на схеме (рисунок 1).

Всего возможно 16 комбинаций (таблица 1).

По результатам анкеты сотрудник получает свой индивидуальный профиль в формате X-X, где буквы могут как отличаться, так и повторяться.

Ядро – это основополагающая, глубинная система ценностей человека, определяющая главный источник смысла и мотивации человека в работе. Ядро формируется годами работы, устойчиво к ситуативным изменениям и меняется только в процессе длительной эволюции личности индивида или под влиянием сильных жизненных трансформаций.

Оттенок – это поведенческая стратегия, привычная реакция, доминирующий способ реализации идей и задач в повседневной практике на рабочем месте. Оттенок более гибок, чем ядро – может формироваться годами и эволюционировать под влиянием опыта, но остаётся устойчивым поведенческим паттерном в пределах профессиональной роли [4].

Ядро показывает то, чего хочет работник, а оттенок укажет на то, как человек этого достигнет.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-244-252

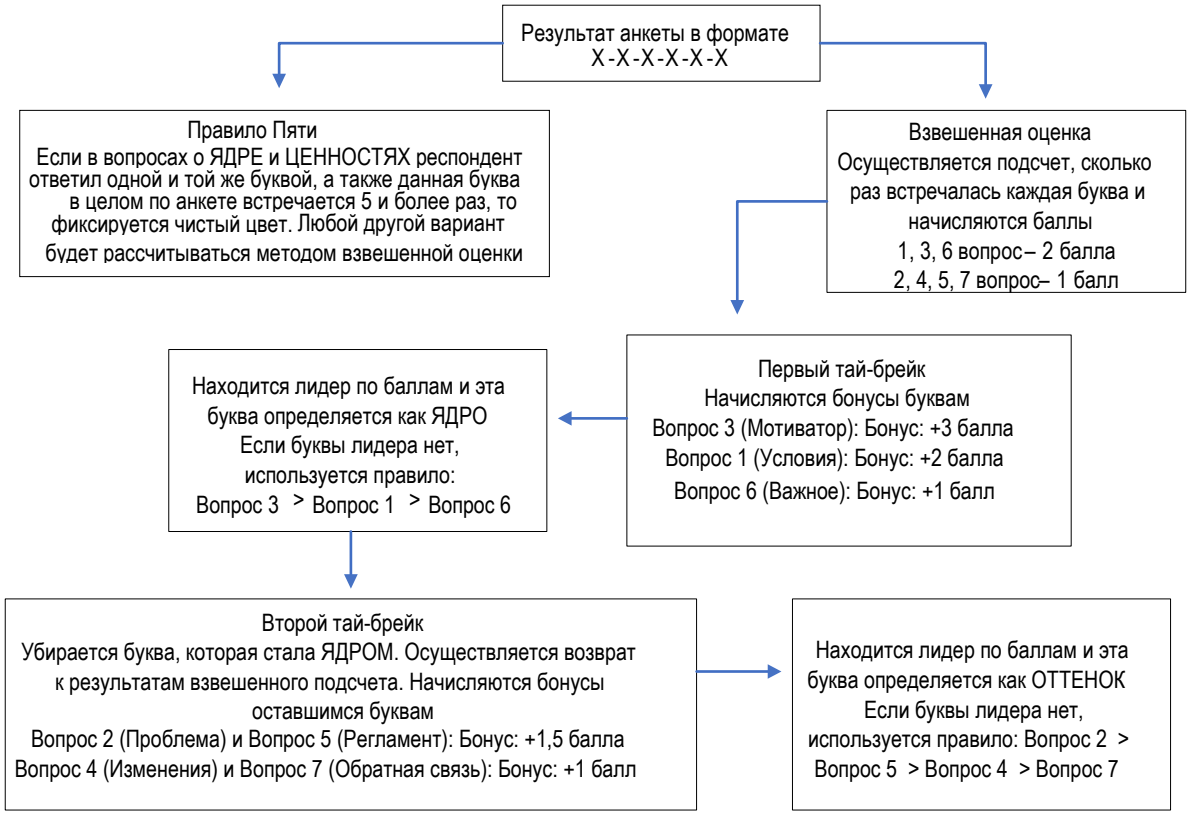


Рисунок 1 – Подсчет результатов «Анкеты управляемости»

Таблица 1 – Все возможные результаты прохождения анкеты

Первая приоритетная буква (Ядро)	Категория работника	Вторая приоритетная буква (Оттенок)	Цвет работника	Профиль работника
S	Хранитель порядка	S	Синий	Конформист
		F	Ультрамариновый	Традиционалист
		I	Серебряный	Стратег
		C	Графитовый	Аналитик
F	Душа команды	F	Фиолетовый	Эмпат
		S	Бежевый	Опекун
		C	Пурпурный	Развиватель
		I	Багряный	Мотиватор
I	Драйвер	I	Красный	Агрессор
		C	Желтый	Новатор
		F	Карамельный	Лидер
		S	Оранжевый	Исполнитель
C	Мыслитель	C	Аквамарин	Философ
		I	Бирюзовый	Реализатор
		F	Зеленый	Идеолог
		S	Перламутровый	Системщик

Описание профилей работников

Каждый профиль имеет свои уникальные характеристики, при этом характеристики работников внутри одного ядра имеют некоторые схожие параметры. Также, в данной классификации каждая группа напрямую связана с тем, насколько легко или трудно будет управлять сотрудниками и какие задачи лучше дать такому специалисту [6]. Существует четыре вариации ядра, поэтому представим анализ каждой «четверки» работников по отдельности.

1. Первая группа – хранители порядка (S-ядро). Стабильные сотрудники, которые не идут в противоречие с системой и регламентом. По Грейвзу такие люди находятся на синем завитке спирали, однако добавим к исходной теории синего цвета вкрапления и других цветов. В общем случае такие сотрудники – фундамент стабильной работы организации как единого механизма, «винтики и шестеренки», которые запускают хозяйственный процесс. Они пренебрегают гибкостью ради ясности и прозрачности. Частые и резкие изменения для них – главный источник стресса и стимула к уходу или потере эффективности [9]. Таким образом, хранители порядка сильно отличаются друг от друга, однако имеют общие черты, такие как деятельность в рамках правил, потребность в определенности. Для них есть четко сформулированное понятие структуры – в правилах, в традициях, иерархии, авторитете, бизнес-процессах. Их амбиции и личное мнение находятся в рамках этой системы. Для каждого из работников с основной буквой S хаос и неопределенность определяются как угроза. Руководителю стоит дать такому работнику определенность, конкретику. Разница лишь в «валюте»: для синего – инструкция, для ультрамаринового – «семейное» признание, для серебряного – прозрачный карьерный план, для графитового – логически обоснованная работа, которая принесет пользу организации. Подробный разбор каждого из них представлен в таблице 2.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-244-252

Таблица 2 – Характеристика «Хранителей порядка»

Хранители порядка	Характеристика	Факторы мотивации
Синий (Конформист)	«Есть инструкция – нет проблем; нет инструкции – нет действий»; – дисциплинирован, действует в рамках обозначенной иерархии, не вмешивается не в свое дело; – может быть креативным, но вряд ли проявит инициативу; – ценит не мгновенный результат, а стабильность и четкость; – надежный, стабильный и понятный	– наличие инструкций и методических указаний по поводу любого аспекта его работы; – стабильно неизменные задачи, минимум лишней информации и стабильный график; – похвала от начальника и коллег за четкое соблюдение регламента или выполненный план; – гарантированная зарплата, максимально понятные для него бизнес-процессы [8]
Ультрамариновый (Традициональст)	«Свой в коллективе» – любитель негласных правил и неформальных отношений на рабочем месте; – порядок и стабильность для него являются фундаментом, на котором строится доверие и взаимопомощь; – признает авторитет начальника в большей степени за счет опыта; – хранитель корпоративного духа	– чувство принадлежности в коллективе; – признание его заслуг (не всегда относящихся к работе) руководителем; – возможность отстаивать интересы как свои, так и коллег; – возможность быть наставником и передавать опыт новичкам
Серебряный (Стратег)	«Правила – это игровое поле для достижения успеха» – такой же бюрократ, как и остальные синие сотрудники, однако видит в правилах возможность, а не ограничение; – старается найти способ оптимизировать устоявшиеся правила, при этом никогда их не нарушает; – наведет порядок и добьется результата, стратег в том смысле, что он стратегически использует правила для личного роста; – заинтересован в росте показателей путем совершенствования правил, бизнес-процессов	– карьерный рост в организации; – возможность менять правила, если они обоснованно мешают развитию; – превышение плана, достижения соответствующие поощрениям в цифрах; – признание компетенций руководителем
Графитовый (Аналитик)	«Перфекционист от порядка» – ищет в правилах систему, где все связано и обосновано; – его раздражают несостыковки, дублирование функций и несовершенный характер бизнес-процессов; – не принимает исключения из правил	– рабочая среда, где решения принимаются на основе логики, а не традиций и неформальных связей; – хочет знать, что его работа ненапрасна; – возможность работать с данными, анализировать и находить проблемные места; – достижение обоснованного плана

2. Вторая группа – душа команды (F-ядро). Социальные люди с особым энтузиазмом к работе в команде. В оригинальной спирали это фиолетовый и бежевый завитки спирали. В общем случае это склонные к патернализму люди, ставящие неформальные отношения превыше деловых. Довольны своей работой в том случае, когда коллектив превращается в семью, имеют сильную потребность в принадлежности. Душа команды хоть и отличаются друг от друга своей ролью в коллективе, именно корпоративная культура для них является основой благоприятной работы в организации. Их действия, страхи и факторы мотивации вращаются вокруг межличностных отношений. Желание эффективно работать, перевыполнять планы и чувствовать себя безопасно вытекают из включенности в коллектив. Личные достижения для них вторичны и расцениваются как вклад в общее дело. Сотрудники F-группы будут чувствовать себя успешными лишь тогда, когда успешным будет весь коллектив в целом. Логика, цифры и холодный расчет второстепенны по отношению к человеческому общению. Их внимание приковано к текущему состоянию социального организма – команды, отдела, коллектива. Подробный анализ данной группы представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристика «Душа команды»

Душа команды	Характеристика	Факторы мотивации
Фиолетовый (Эмпат)	«Жилетка, в которую можно поплакать» – классический фиолетовый цвет Грейвза, социальный человек с сильной потребностью в принадлежности; – принимает решения с расчетом на то, как это повлияет на коллег и отношения с ними; – ставит человеческие отношения превыше формальных	– дружелюбная атмосфера в коллективе, общение с другими сотрудниками; – неформальные связи, дружба и поддержка на рабочем месте; – вовлеченность в личное общение, выходящее за рамки происходящего на предприятии; – патернализм
Бежевый (Опекун)	«Заботливый коллега» – стремится дружить со всеми не для собственной потребности, а «чтобы выжить»; – помнит о днях рождения, принесет кофе; – стремится обеспечить базовый комфорт всем членам коллектива	– его труд замечают и ценят; – стабильность и прозрачность процессов в организации; – патернализм со стороны руководителя; – обеспечение его базовых потребностей, наличие соцпакета, страховки, обедов и т. д.
Пурпурный (Развиватель)	«Садовник человеческих душ» – видит в коллегах нереализованный потенциал и поможет его раскрыть; – получает удовольствие от помощи другим; – стремится личностно развивать своих коллег, заинтересован в развитии не только социальных отношений, но и организации	– прогресс коллег, желательно с участием самого развивателя; – возможность не просто общаться, а обучать и обмениваться опытом; – признание его вклада в развитие не только корпоративной культуры, но и экономической составляющей; – инвестиции руководства в развитие сотрудников, курсы повышения квалификации и т. д.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-244-252

Продолжение таблицы 3

Душа команды	Характеристика	Факторы мотивации
Багряный (Мотиватор)	«Заводила команды» – не всегда это автор идеи, но именно он донесет идею до начальника; – инициатор здорового соперничества внутри команды; – энерджайзер групповых проектов; – мотивирует не индивидуально, а всех и сразу	– командные победы, грамоты, премии; – слоганы, ритуалы, традиции, командный дух; – возможность вдохновлять других и показывать лидерские качества; – руководитель, который будет еще сильнее такого сотрудника

3. Третья группа – драйверы (I-ядро). Группа амбициозных работников, захватчиков, достигателей по своей натуре. Это люди, которые не боятся выделиться, показать свои знания и умения, заинтересованные чаще всего в собственном успехе. По Грейвзу – красный, оранжевый отрезки, на которых человек не ищет способы выжить, а начинает забирать свое, а также желтый отрезок, на котором успех идет во взаимодействие с созиданием [11]. Такие работники фокусируются на успехе, результате в цифрах и интеллектуальных достижениях, карьерных перспективах. В зависимости от второй определяющей буквы они будут использовать разные способы, а также формулировки этих основных целей. Основная цель драйверов – доказать себе и миру свою индивидуальную ценность через достижения. Они определяют свою ценность не посредством места в системе или коллективе, а путем достижения результата. Их самооценка рушится без достижений, и они быстро теряют мотивацию [18]. Такие люди видят прошлое и настоящее в качестве трамплина в будущее, живут постоянным целеполаганием. Для драйверов кооперация – тактический ход, а не приоритет (таблица 4).

Таблица 4 – Характеристика «Драйверов»

Драйверы	Характеристика	Факторы мотивации
Красный (Агрессор)	«Мир – арена, где выживает сильнейший» – действует руководствуясь инстинктами, конфликтный и доминирующий; – любит мгновенный результат, здесь и сейчас; – не принимает долгосрочные стратегии; – нарушает правила ради результата; – не подчиняется человеку, который слабее эмоционально или своими компетенциями; – целеполагание для него: краткосрочные, тактические цели	– быстрый результат, такое же быстрое вознаграждение и сразу за следующий проект; – публичное признание, доказывающее его доминацию; – автономия; – сложные задачи, вызов и возможность пойти на риск для лучшего результата; – рейтинги, списки, в которых он захочет видеть себя на вершине [1]; – способы принятия решений типа «мозгового штурма»
Желтый (Новатор)	«Не просто много работает, а придумывает, как работать умнее» – автор интересных проектов, обладает нестандартным мышлением и находит особый подход для решения рабочих задач; – хочет не просто достичь успеха, а показать интеллект или творческие способности; – не принимает четкие рамки, ограничения; – готов рисковать, но риск этот просчитан и делается ради прорывного преимущества; – результат: сам факт создания нового, а не только деньги или признание	– творческая работа и постоянная возможность для реализации идей; – слава первооткрывателя, возможность запатентовать идеи, а также признание со стороны коллег и начальника; – доступ к современным технологиям; – время, бюджет и свобода действий для экспериментов; – уважение и поддержка его идей
Карамельный (Лидер)	«Начальник, за которым и в огонь, и в воду» – нуждается в людях, из которых без труда соберет команду для достижения своих (и не только) целей; – удерживает свой авторитет не на власти, а на компетенциях и взаимоуважении; – строит вокруг себя «клан» или «экипаж»; – энергичный и понимающий, но также зациклен на результате и цифрах	– наличие не просто подчиненных, а последователей; – возможность быть «лицом» команды, представителем; – масштабные и сложные задачи, которые позволят ему подтвердить свои компетенции и статус; – возможность защищать и продвигать «своих»
Оранжевый (Исполнитель)	«Карьерист-прагматик и тактик системы» – действует в рамках правил и регламента, но никогда не пропустит возможность показать амбиции; – любитель больших цифр и карьерного роста; – берется за проекты на виду у начальства; – не боится рисковать и показать свои амбиции тогда, когда это поможет ему в достижении конкретной цели; – умеет «продать» себя и свои результаты; – «выжмет соки» из устоявшегося регламента, но не будет искать способы его совершенствования	– прозрачные процессы в организации; – возможность карьерного роста и признание труда исполнителя начальником; – вознаграждение в зависимости от личного результата; – статусные проекты и возможность взять на себя ответственность [2]; – возможность учиться у более компетентных сотрудников, совершенствовать свои навыки

4. Четвертая группа – мыслители (C-ядро). Люди, живущие в своем мире мыслей и безграничных идей – часто гениальны, однако практически неуправляемы. По Грейвзу – это полностью автономные работники, у которых творчество и интеллектуальная деятельность нацелены не на получение дохода, а на рост себя как личности, профессионала в своей специфике. Данная группа объединяет зеленый и бирюзовый завитки оригинальной спирали. Базовая потребность мыслителей – понимание сути и рост с развитием. Для них правильность своей работы определяется не указом сверху или традицией, а внутренней непротиворечивостью и эффективностью задачи или идеи. Они ищут корневые проблемы и взаимосвязи во всей организации и в деятельности коллег. Мыслители не будут разрушать систему ради личной цели – такие люди не будут становиться частью той системы, которая не идет в ногу с их целями [13]. Лучшие идеи от таких специалистов рождаются только в условиях полной свободы и минимального внешнего воздействия. Анализ мыслителей представлен в таблице 5.

Каждый профиль имеет уникальные характеристики и требует точной оценки и внимательного анализа.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-244-252

Таблица 5 – Характеристика «Мыслителей»

Мыслители	Характеристика	Факторы мотивации
Аквамарин (Философ)	«Гражданин планеты идей» – докапывается до истины, анализирует каждую цифру, причину и следствие; – прирожденный исследователь, который работает за идею, а не деньги; – может часами искать и группировать информацию не для похвалы, а для удобства дальнейшего использования; – человек, у которого все всегда по полочкам: знания, информация	– свобода мысли, коллеги и начальник не мешают и не ограничивают; – доступ к технологиям, литературе; – высокая планка сложности задач; – проблемы без очевидного решения, которые дадут специалисту изучить проблему; – возможность учиться у тех, кто компетентнее; – разнообразие задач, полное отсутствие рутины [7]
Бирюзовый (Реализатор)	«Волевой трансформатор» – классический бирюзовый цвет Ф. Лалу – открыто обсуждает идеи и не боится высказывать недовольство, не принимает структуру [12]; – стремится не просто понять систему, а перестроить ее так, как будет эффективнее для достижения успеха; – ищет ключевые точки и воздействует на них; – сочетает стратегическое видение с напором и ответственностью за результат	– автономия и полномочия, позволяющие ему проанализировать систему и провести жесткие преобразования; – доступ к информации и данным; – сложнейшие задачи, которые синим или фиолетовым группам могут показаться невозможными; – задачи на проверку компетенций, возможность доказать свое место в системе [19]
Зеленый (Идеолог)	«Глубинный вдохновитель» – сможет сплотить людей в периоды кризиса; – придумает идею для решения проблемы, однако достигнет ее вместе с коллегами; – поддерживает корпоративную культуру, мотивирует не на получение дохода, а на совершенствование процессов в организации; – духовный лидер в коллективе, расскажет не «что делать», а «зачем и ради чего» [10].	– желание коллег работать в команде; – наличие у предприятия актуальной миссии и цели, способы достичь которых будет искать идеолог; – возможность проводить корпоративные мероприятия; – задачи, которые принесут пользу коллективу, организации или обществу
Перламутровый (Системщик)	«Архитектор идеальных систем» – личность, ориентированная на построение идеальной системы; – видит мир в целом и человеческие отношения как совокупность взаимосвязанных элементов, которые хочет собрать в структуру (порядок в процессах, проектирование бизнес-архитектуры); – готов долго и кропотливо проектировать систему, которая будет работать идеально, даже если на её создание уйдёт больше времени, чем на решения.	– полномочия для анализа процессов и «перестройки» в организации; – сложные задачи по оптимизации процессов, требующие комплексного подхода; – прозрачность процессов и возможность понимать все происходящее в организации; – признание его труда коллегами и руководителем

Создание эффективной команды на основе результатов «Анкеты управляемости»

За каждый ответ в анкете работнику начисляется определенное количество баллов управляемости. За ответы, отвечающие за системное ядро S, начисляется наибольшее количество баллов. За ответы с семейным ядром F начисляется чуть меньшее количество баллов, с агрессивным I – еще меньшее, а за ответы с созидательным ядром C сотрудник получит минимум баллов управляемости. Суть числа баллов состоит в том, насколько человек поддается управлению и прямым приказам. Теоретически, зная профиль руководителя и профили, баллы управляемости сотрудников, которые могут попасть в его команду, становится возможным составить эффективную комбинацию, где руководитель будет сочетать доверительную атмосферу с профессиональной требовательностью, что особенно важно в органических структурах, а также возможно и в бюрократической организации.

Рассмотрим показатели, которые помогут HR-специалисту или менеджеру собрать идеальную команду из работников, а также выявить узкие места в структуре отдела, команды, обоснованно определить конфликтного работника.

1. Базовый уровень управляемости (basic level of controllability) – показатель, отражающий склонность человека к внешнему управлению, подчинению и соблюдению инструкций и правил. Рассчитывается на основе баллов управляемости, присвоенных ответам в анкете по формуле

$$LC_{баз} = P / P_{max}. \quad (1)$$

где $LC_{баз}$ – базовый уровень управляемости сотрудника;

P – баллы управляемости, которые набрал сотрудник в результате прохождения анкеты;

P_{max} – максимальное количество баллов за прохождение анкеты.

2. Нормализованный уровень управляемости (normalized level of controllability) – Преобразованный показатель, приведённый к шкале от 0 до 1, где 0 соответствует минимально возможным баллам управляемости, а 1 максимальным. Показатель, используемый в дальнейших расчетах. Сам по себе не рассматривается и не несет смысловой нагрузки. $LC_{норм}$ подводит значения $LC_{баз}$ под масштаб IR, чтобы их можно было использовать в одном расчете по формуле

$$LC_{норм} = (P – P_{min}) / (P_{max} – P_{min}), \quad (2)$$

где $LC_{норм}$ – нормализованный уровень управляемости;

P – баллы управляемости, которые набрал сотрудник в результате прохождения анкеты;

P_{min} – минимальное количество баллов за прохождение анкеты;

P_{max} – максимальное количество баллов за прохождение анкеты.

3. Уровень влияния (influence ratio) – показатель того, насколько естественно и эффективно данный тип руководителя может взаимодействовать с данным типом подчинённого, исходя из их цветных профилей. IR находится из специальной таблицы (матрицы 16 на 16), где каждая категория руководителя соотносится с категориями подчиненных и это соотношение покажет их совместимость на рабочем месте. Высокая совместимость наблюдается, если ядро руководителя и сотрудника совпадает; принцип сохранения логики и иерархии: S-бюрократ сможет подчинить себе любого сотрудника, F-эмпат будет испытывать трудности с карьеристами, автономными мыслителями и слишком привязанными к системе людьми, I-драйвер не подружится с людьми, привязанными к зоне комфорта, а также с закрытыми в своих мыслях специалистами [15]. Матрица коэффициентов влияния отражена в таблице 6 и показывает, насколько эффективно руководитель типа X может управлять подчинённым типа Y.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-244-252

Таблица 6 – Матрица руководитель – сотрудник

	SS	SF	SI	SC	FF	FS	FC	FI	II	IC	IF	IS	CC	CI	CF	CS
SS	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,9	0,6	0,5	0,4	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,3	0,5
SF	1,5	1,6	1,3	1,1	1,2	1,4	1,0	0,9	0,6	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8
SI	1,4	1,3	1,6	1,2	0,9	1,0	0,8	0,9	1,3	1,2	1,0	1,2	0,7	0,9	0,7	1,0
SC	1,3	1,2	1,4	1,6	0,8	0,9	1,2	0,8	0,8	1,0	0,8	0,9	1,4	1,2	1,0	1,3
FF	0,7	1,0	0,6	0,5	1,6	1,5	1,3	1,1	0,4	0,5	0,7	0,5	0,5	0,6	0,8	0,6
FS	0,9	1,2	0,8	0,7	1,5	1,6	1,1	1,0	0,5	0,6	0,8	0,7	0,4	0,5	0,7	0,7
FC	0,6	0,9	0,7	1,0	1,3	1,1	1,6	1,2	0,6	0,8	0,7	0,6	1,3	1,1	1,4	1,2
FI	0,5	0,8	0,8	0,7	1,1	1,0	1,2	1,6	0,9	0,8	1,4	0,9	0,6	0,7	0,8	0,6
II	0,4	0,5	1,2	0,6	0,4	0,5	0,5	0,8	1,6	1,3	1,1	1,4	0,4	0,6	0,4	0,5
IC	0,5	0,6	1,1	0,9	0,5	0,6	0,8	0,7	1,3	1,6	1,2	1,1	1,3	1,5	1,1	1,2
IF	0,4	0,7	1,0	0,7	0,7	0,8	0,7	1,3	1,1	1,2	1,6	1,3	0,7	0,8	1,0	0,8
IS	0,6	0,9	1,2	0,8	0,5	0,7	0,6	0,8	1,4	1,1	1,3	1,6	0,6	0,8	0,7	1,0
CC	0,3	0,4	0,5	1,2	0,4	0,4	1,1	0,6	0,3	1,1	0,7	0,6	1,6	1,4	1,2	1,5
CI	0,4	0,5	0,7	1,1	0,5	0,5	1,0	0,7	0,6	1,4	0,8	0,8	1,4	1,6	1,1	1,3
CF	0,3	0,6	0,5	0,8	0,8	0,7	1,3	0,8	0,4	1,0	1,0	0,7	1,2	1,1	1,6	1,4
CS	0,5	0,7	0,8	1,2	0,6	0,7	1,1	0,6	0,5	1,1	0,8	0,9	1,5	1,3	1,4	1,6

4. Нормализованный уровень влияния (normalized influence ratio) – преобразованный IR, приведённый к шкале от 0 до 1, где 0 соответствует минимально возможному уровню влияния, а 1 – максимальному. Показатель, используемый в дальнейших расчетах. Фактически $IR_{норм}$ показывает эмпирическую степень влияния руководителя на сотрудника в долях

$$IR_{норм} = (IR - IR_{min}) / (IR_{max} - IR_{min}), \quad (3)$$

где $IR_{норм}$ – нормализованный уровень влияния;

IR – уровень влияния по матрице;

IR_{min} – минимальный уровень влияния по матрице;

IR_{max} – максимальный уровень влияния по матрице.

5. Эффективность взаимодействия руководителя и сотрудника (management efficiency between manager and employee) – показатель «совместимости» руководителя и подчиненного, измеряемый в процентах. Позволяет собрать эффективную команду, где не придется производить лишних манипуляций для комфортного взаимодействия сотрудников с руководителем. Рассчитывается по формуле

$$ME^{упр.}{}_{сотр.} = (LC_{норм} + IR_{норм}) / 2 * 100\ \%, \quad (4)$$

где $ME^{упр.}{}_{сотр.}$ – эффективность взаимодействия руководителя и сотрудника;

$LC_{норм}$ – нормализованный уровень управляемости;

IR – уровень влияния.

6. Средняя эффективность взаимодействия руководителя и сотрудника (average management efficiency between manager and employee) – отражает среднее значение эффективности взаимодействия среди сотрудников, которые находятся в подчинении у конкретного руководителя:

$$МЕср.^{упр.}{}_{сотр.} = \frac{\sum МЕупр.сотр.}{Ч}, \quad (5)$$

где $ME^{упр.}{}_{сотр.}$ – эффективность взаимодействия руководителя и сотрудника;

Ч – число сотрудников.

7. Индекс эффективности взаимодействия сотрудников друг с другом (interaction efficiency ratio between employees) – показатель, отражающий эмпирическую совместимость между работниками в зависимости от их предпочтений в работе. Показатель не учитывает характер работников, поэтому для конкретики требует дополнительного совершенствования относительно ситуации на рабочем месте [20]. Показатель IER можно найти в специальной матрице, построенной по похожей логике, что и матрица работников (таблица 7). Разница в значениях обусловлена тем, что взаимодействие коллега – коллега и руководитель – работник почти всегда отличается и имеет свои особенности. Одинаковые профили отлично понимают друг друга, работники с одинаковым ядром вряд ли будут конфликтовать, а остальные случаи нужно рассматривать индивидуально на основе индивидуальных характеристик.

Таблица 7 – Матрица работник – работник

	SS	SF	SI	SC	FF	FS	FC	FI	II	IC	IF	IS	CC	CI	CF	CS
SS	1,6	1,5	1,4	1,3	0,9	1,1	0,7	0,6	0,5	0,6	0,5	0,7	0,4	0,5	0,4	0,6
SF	1,5	1,6	1,3	1,2	1,2	1,4	1,0	0,9	0,6	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8
SI	1,4	1,3	1,6	1,4	0,8	0,9	0,8	0,9	1,2	1,1	1,0	1,2	0,6	0,8	0,6	0,9
SC	1,3	1,2	1,4	1,6	0,7	0,8	1,1	0,8	0,7	0,9	0,7	0,8	1,3	1,1	0,9	1,2
FF	0,9	1,2	0,8	0,7	1,6	1,5	1,3	1,1	0,5	0,6	0,8	0,6	0,6	0,7	0,9	0,7
FS	1,1	1,4	0,9	0,8	1,5	1,6	1,1	1,0	0,6	0,7	0,9	0,8	0,5	0,6	0,8	0,8
FC	0,7	1,0	0,8	1,1	1,3	1,1	1,6	1,2	0,7	0,9	0,8	0,7	1,2	1,0	1,4	1,1
FI	0,6	0,9	0,9	0,8	1,1	1,0	1,2	1,6	0,9	0,8	1,3	0,9	0,7	0,8	0,9	0,7
II	0,5	0,6	1,2	0,7	0,5	0,6	0,7	0,9	1,6	1,3	1,1	1,4	0,5	0,7	0,5	0,6
IC	0,6	0,7	1,1	0,9	0,6	0,7	0,9	0,8	1,3	1,6	1,2	1,1	1,2	1,4	1,0	1,1
IF	0,5	0,8	1,0	0,7	0,8	0,9	0,8	1,3	1,1	1,2	1,6	1,3	0,8	0,9	1,1	0,9
IS	0,7	0,9	1,2	0,8	0,6	0,8	0,7	0,9	1,4	1,1	1,3	1,6	0,7	0,9	0,8	1,0
CC	0,4	0,5	0,6	1,3	0,6	0,5	1,2	0,7	0,5	1,2	0,8	0,7	1,6	1,4	1,2	1,5
CI	0,5	0,6	0,8	1,1	0,7	0,6	1,0	0,8	0,7	1,4	0,9	0,9	1,4	1,6	1,1	1,3
CF	0,4	0,7	0,6	0,9	0,9	0,8	1,4	0,9	0,5	1,0	1,1	0,8	1,2	1,1	1,6	1,4
CS	0,6	0,8	0,9	1,2	0,7	0,8	1,1	0,7	0,6	1,1	0,9	1,0	1,5	1,3	1,4	1,6

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-244-252

8. Эффективность взаимодействия работников друг с другом (interaction efficiency ratio between employees) – для дальнейшего использования индекса IER в расчете нормализуем его значение:

$$IE = (IER - IER_{min}) / (IER_{max} - IER_{min}) * 100\ \%, \quad (6)$$

где IER – индекс эффективности взаимодействия сотрудников друг с другом;

IER_{min} – минимальное значение индекса в матрице;

IER_{max} – максимальное значение индекса в матрице.

Чаще всего применяется усредненное значение по отделу – $IE_{ср}$. Средняя IE покажет, насколько в отделе позитивные отношения работников друг с другом, основываясь на их оттенках:

$$IE_{ср} = \frac{\sum IE}{n}, \quad (7)$$

где ∑IE – сумма всех возможных взаимодействий сотрудников друг с другом;

N – число взаимодействий.

9. Индекс организационной синергии (organizational synergy index) – комплексный, заключающий показатель, показывающий эффективность взаимодействия всей команды, включающий совместимость подчиненных между собой, с руководителем. Это главный показатель, объединяющий эффективность вертикальных (руководитель – работник) и горизонтальных (работник – работник) в команде. Рассчитывается по формуле

$$OSI_{отдела} = (\alpha * ME_{упр.}^{сотр.}/100) + (\beta * IE_{ср}/100), \quad (8)$$

где $ME_{упр.}^{сотр.}$ – средняя эффективность взаимодействия руководителя и работников;

$IE_{ср}$ – средняя эффективность взаимодействия между всеми работниками в отделе;

α, β – весовые коэффициенты, отражающие приоритеты организации. В общем случае коэффициенты одинаковы и равны α = β = 0,5, однако, учитывая адаптивность системы расчета, руководство может изменить коэффициент, но при этом критически важно учитывать равенство α + β = 1.

Данная система показателей поможет HR-специалисту или менеджеру создать эффективную команду для выполнения проекта, а также оценить управляемость конкретного работника, совместимость работника и руководителя, работников между собой.

Заключение

Использование «Анкеты управляемости» в реальном секторе экономики позволит специалистам по персоналу оценивать эффективность работников не только по их производительности труда и ситуации на рабочем месте, а выявлять проблемные ситуации до их появления и создавать такую команду, которая сможет работать слаженно и достигать высоких показателей. Система подсчета результатов анкеты легко автоматизируется при помощи ботов и искусственного интеллекта, не требует от специалиста больших трудозатрат и при этом дает крайне ценную информацию. Определение сильных и слабых сторон каждого профиля позволит создать такую команду, которая будет эффективна для узконаправленной задачи, где каждый работник будет выполнять задачу по своим предпочтениям, что несомненно повысит не только индивидуальную производительность, но и общий результат функционирования группы.

У руководства появляется возможность еще во время проведения собеседования с кандидатами на вакантные должности определить, насколько легко или сложно будет работать с этим человеком, а также быстро оценить это отношение в процентах при помощи автоматически рассчитываемой формулы. «Анкета управляемости» является незаменимым инструментом, который предоставляет не только ценную информацию HR-специалисту или менеджеру, а дает подсказку, в чем конкретно заключается проблема на рабочем месте и примерные направления решения этих проблем.

Специалисты, использующие «Анкету управляемости», смогут не только повысить производительность трудовых ресурсов на своем предприятии, но и повысить конкурентоспособность организации на рынке за счет эффективного взаимодействия руководителей с подчиненными, что в современных реалиях составляет минимум 15–30 % успеха.

Список цитированных источников

1. Баляев, А. Красный, желтый, бирюзовый: как перекрасить компанию в другой цвет / А. Баляев. – URL: https://probusiness.io/management/3270-krasnyy-zheltyy-biryuzovyy-kak-perekrasit-kompaniyu-v-drugoy-cvet.html (дата обращения: 21.02.2026).
2. Спиральная динамика на практике. Модель развития личности, организации и человечества / Д. Бек, Т. Ларсен, С. Солонин [и др.]. – М. : Альпина Паблишер, 2019. – 319 с.
3. Беляцкий, Н. П. Креативный менеджмент : учеб. пособие / Н. П. Беляцкий. – Минск, 2016. – 290 с.
4. Гальперина, А. Д. Социально-антропологический анализ феномена спиральной динамики / А. Д. Гальперина // Медицина. Социология. Философия. Прикладные исследования. – 2022. – № 2. – С. 69–75.
5. Гарчук, И. М. Конкурентоспособность, конкурентные преимущества организации: понятия, факторы обеспечения конкурентоспособности / И. М. Гарчук // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Экономика. – 2024. – № 3. – С. 160–163. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-135-3-160-163.
6. Друкер, П. Ф. Практика менеджмента = The practice of management : пер. с англ. / П. Ф. Друкер. – М. : Вильямс, 2003. – 397 с.
7. Иванова, И. А. Спиральная динамика как модель развития организации / И. А. Иванова, А. С. Бардина // Транспортное дело России. – 2022. – № 2. – С. 88–90.
8. Казберович, А. А. Анализ строительной сферы деятельности согласно концепции спиральной динамики У. Грейвза / А. А. Казберович, Н. В. Носко // Фотинские чтения – 2025 (весеннее собрание) : сборник материалов XII Междунар. науч.-практ. конф., Ижевск, 27–29 марта 2025 г. / УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова ; редкол.: Ю. Г. Кислякова, О. Л. Симченко, У. Ф. Симакова [и др.]. – Ижевск : УИР ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2025. – С. 168–172.
9. Казберович, А. А. Роль эффективного менеджмента в достижении успеха организации / А. А. Казберович, А. В. Смаль // Экономика и управление социальный, экономический и инженерный аспекты» : сб. материалов VII Межд. науч.-практ. конф., Брест, 28–29 ноября 2024 г. / Брест гос. тех. ун-т. – Брест, 2024. – С. 128–132.
10. Лалу, Ф. Открывая организации будущего : пер. с англ. / Ф. Лалу. – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2016. – 42 с.
11. Лалу, Ф. Открывая организации будущего : пер. с англ. / Ф. Лалу. – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2019. – 432 с.
12. Маврина, А. Бирюзовая компания / А. Маврина. – URL: https://www.unisender.com/ru/glossary/chto-takoe-biryuzovaya-kompaniya/#anchor-2 (дата обращения: 08.12.2025).
13. Кочнев, А. Разноцветные организации / А. Кочнев. – URL: https://blog.iteam.ru/raznotsvetnye-organizatsii (дата обращения: 22.02.2026).
14. Петрович, М. В. Управление персоналом : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по группам специальностей "Экономика и управление", "Государственное управление", "Бизнес-управление" / М. В. Петрович. – Минск : БГЭУ, 2024. – 429 с.
15. Плешакова, Е. Ю. Причины возникновения патологий менеджмента в современных организациях / Е. Ю. Плешакова, И. Г. Головцова // Теория и практика общественного развития. – 2018. – № 11. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/prichiny-vozniknoveniya-patologiy-menedzhmenta-v-sovremennyh-organizatsiyah/viewer (дата обращения: 12.01.2026).
16. Смольский, А. П. Практический менеджмент: инструменты, стратегия и тактика управления : учебное пособие / А. П. Смольский. – Минск : Мисанта, 2021. – 443 с.
17. Спиральная динамика для компаний. – URL: https://www.marquiz.ru/blog/spiralnaya-dinamika (дата обращения: 04.12.2025).
18. Стрелкова, Л. В. Особенности современного управления промышленным предприятием / Л. В. Стрелкова, Д. И. Тарасов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия: Социальные науки. – 2015. – № 1 (37). – С. 73–80.

19. Таунсенд, Р. Сломай систему! Лекарство от управленческой изжоги / Р. Таунсенд. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2008. – 198 с.
20. Цветков, А. Н. Теория менеджмента : учебник для вузов / А. Н. Цветков. – 2-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2023. – 344 с.

References

1. Balyaev, A. Krasnyj, zheltyj, biryuzovyj: kak perekrasit' kompaniyu v drugoj cvet / A. Balyaev. – URL: https://probusiness.io/management/3270-krasnyy-zheltyy-biryuzovyy-kak-perekrasit-kompaniyu-v-drugoy-cvet.html (data obrashcheniya: 21.02.2026).
2. Spiral'naya dinamika na praktike. Model' razvitiya lichnosti, organizacii i chelovechestva / D. Bek, T. Larsen, S. Solonin [i dr.]. – M. : Al'pina Pablisher, 2019. – 319 s.
3. Belyackij, N. P. Kreativnyj menedzhment : ucheb. posobie / N. P. Belyackij. – Minsk, 2016. – 290 s.
4. Gal'perina, A. D. Social'no-antropologicheskij analiz fenomena spiral'noj dinamiki / A. D. Gal'perina // Medicina. Sociologiya. Filosofiya. Prikladnye issledovaniya. – 2022. – № 2. – C. 69–75.
5. Garchuk, I. M. Konkurentosposobnost', konkurentnye preimushchestva organizacii: ponyatiya, faktory obespecheniya konkurentosposobnosti / I. M. Garchuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika. – 2024. – № 3. – C. 160–163. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-135-3-160-163.
6. Druker, P. F. Praktika menedzhmenta = The practice of management : per. s angl. / P. F. Druker. – M. : Vil'yams, 2003. – 397 s.
7. Ivanova, I. A. Spiral'naya dinamika kak model' razvitiya organizacii / I. A. Ivanova, A. S. Bardina // Transportnoe delo Rossii. – 2022. – № 2. – S. 88–90.
8. Kazberovich, A. A. Analiz stroitel'noj sfery deyatel'nosti soglasno koncepcii spiral'noj dinamiki U. Grejvza / A. A. Kazberovich, N. V. Nosko // Fotinskie chteniya–2025 (vesennee sobranie) : sbornik materialov HII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Izhevsk, 27–29 marta 2025 g. / UIR IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova ; redkol.: YU. G. Kislyakova, O. L. Simchenko, U. F. Simakova [i dr.]. – Izhevsk : UIR IzhGTU im. M. T. Kalashnikova, 2025. – S. 168–172.
9. Kazberovich, A. A. Rol' effektivnogo menedzhmenta v dostizhenii uspekha organizacii / A. A. Kazberovich, A. V. Smal' // Ekonomika i upravlenie social'nyj, ekonomicheskij i inzhenernyj aspekty» : sb. materialov VII Mezhd. nauch.-prakt. konf., Brest, 28–29 noyabrya 2024 g. / Brest gos. tekh. un-t. – Brest, 2024. – C. 128–132.
10. Lalu, F. Otkryvaya organizacii budushchego : per. s angl. / F. Lalu. – M. : Mann, Ivanov i Ferber, 2016. – 42 s.
11. Lalu, F. Otkryvaya organizacii budushchego : per. s angl. / F. Lalu. – M. : Mann, Ivanov i Ferber, 2019. – 432 s.
12. Mavrina, A. Biryuzovaya kompaniya / A. Mavrina. – URL: https://www.unisender.com/ru/glossary/chto-takoe-biryuzovaya-kompaniya/#anchor-2 (data obrashcheniya: 08.12.2025).
13. Kochnev, A. Raznocvetnye organizacii / A. Kochnev. – URL: https://blog.iteam.ru/raznotsvetnye-organizatsii (data obrashcheniya: 22.02.2026).
14. Petrovich, M. V. Upravlenie personalom : uchebnoe posobie dlya studentov uchrezhdenij vysshego obrazovaniya po gruppam special'nostej "Ekonomika i upravlenie", "Gosudarstvennoe upravlenie", "Biznes-upravlenie" / M. V. Petrovich. – Minsk : BGEU, 2024. – 429 s.
15. Pleshakova, E. YU. Prichiny vozniknoveniya patologij menedzhmenta v sovremennyh organizaciyah / E. YU. Pleshakova, I. G. Golovcova // Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya. – 2018. – № 11. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/prichiny-vozniknoveniya-patologiy-menedzhmenta-v-sovremennyh-organizatsiyah/viewer (data obrashcheniya: 12.01.2026).
16. Smol'skij, A. P. Prakticheskij menedzhment: instrumenty, strategiya i taktika upravleniya : uchebnoe posobie / A. P. Smol'skij. – Minsk : Misanta, 2021. – 443 s.
17. Spiral'naya dinamika dlya kompanij. – URL: https://www.marquiz.ru/blog/spiralnaya-dinamika (data obrashcheniya: 04.12.2025).
18. Strelkova, L. V. Osobennosti sovremennogo upravleniya promyshlennym predpriyatiem / L. V. Strelkova, D. I. Tarasov // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. Seriya: Social'nye nauki. – 2015. – № 1 (37). – S. 73–80.
19. Taunsend, R. Slomaj sistemu! Lekarstvo ot upravlencheskoj izzhogi / R. Taunsend. – M. : Al'pina Biznes Buks, 2008. – 198 s.
20. Cvetkov, A. N. Teoriya menedzhmenta : uchebnik dlya vuzov / A. N. Cvetkov. – 2-e izd., ster. – SPb. : Lan', 2023. – 344 s.

Материал поступил 27.02.2026, одобрен 03.03.2026, принят к публикации 05.03.2026

УДК 330.341.1

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СФЕРЕ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

Э. Э. Ермакова[1], М. П. Мишкова[2]

[1] М. э. н., старший преподаватель кафедры экономической теории и логистики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ermakova.eleonora@gmail.com

[2] К. э. н., доцент кафедры менеджмента, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: mishkova69@yandex.by

Реферат

Искусственный интеллект (ИИ) является сегодня одной из ключевых технологий, стремительно меняющих экономику в целом и высокотехнологичные отрасли экономики в частности. Области применения ИИ проникают в различные сферы деятельности человека, включая научные исследования и создание объектов интеллектуальной собственности (ИС). Возможность анализировать большие объемы информации, автоматизировать сложные процессы, решать инженерные задачи стало возможным благодаря широкому распространению искусственного интеллекта, что говорит о прорывном характере технологии, способной сыграть важнейшую роль в развитии общества.

Одним из важных вопросов, стоящих перед научным миром и бизнес сообществом, является понимание прикладного аспекта ИИ, того, как работают разные классы решений на основе технологий искусственного интеллекта, как руководители осуществляют поиск прикладных зон ИИ и оценивают реальные потребности компании во внедрении технологий ИИ [1, С. 137].

В статье дается оценка состояния, тенденций и перспектив применения искусственного интеллекта в интеллектуальной деятельности и в патентной работе. Проведен обзор возможных направлений применения ИИ в сфере создания и использования объектов интеллектуальной собственности. Отдельное внимание уделено возможностям использования ИИ для решения экономических задач, связанных с технологическим прогнозированием, анализом патентной ситуации, оценкой результатов интеллектуальной деятельности, обозначены цели и направления применения ИИ для оптимизации научно-исследовательской деятельности и бизнес-процессов. Для каждого направления описаны функциональные возможности технологий искусственного интеллекта, а также выявлены характерные внедрения ИИ-систем в научную и патентную деятельность.

Ключевые слова: искусственный интеллект, интеллектуальная собственность, прогнозирование, анализ, оценка, автоматизация, патентные исследования, технологические тренды, ограничения, риск.

PROMISING DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN THE FIELD OF CREATION AND USE OF INTELLECTUAL PROPERTY OBJECTS

E. E. Ermakova, M. P. Mishkova

Abstract

Artificial intelligence (AI) is today one of the key technologies rapidly transforming the economy in general and high-tech sectors in particular. AI applications are permeating various areas of human activity, including scientific research and the creation of intellectual property (IP). The ability to analyze large volumes of information, automate complex processes, and solve engineering problems has become possible thanks to the widespread adoption of AI, demonstrating the breakthrough nature of this technology, which has the potential to play a crucial role in the development of society.

One of the important issues facing the scientific and business communities is understanding the applied aspects of AI, how different classes of AI-based solutions operate, how managers identify AI application areas, and assess a company's actual needs for implementing AI technologies [1, P. 137].

This article assesses the current state, trends, and prospects for the application of artificial intelligence in intellectual activity and patenting. A review of possible applications of AI in the creation and use of intellectual property is provided. Special attention is given to the potential of AI for solving economic problems related to technological forecasting, patent analysis, and intellectual property assessment. The objectives and areas of AI application for optimizing research and business processes are outlined. For each area, the functional capabilities of artificial intelligence technologies are described, and typical applications of AI systems in scientific and patenting activities are identified.

Keywords: artificial intelligence, intellectual property, forecasting, analysis, evaluation, automation, patent research, technological trends, limitations, risk.

Введение

Развитие современного общества неразрывно связано с IT-технологиями в том числе, немаловажную роль в современной экономике играют технологии искусственного интеллекта, как в области обеспечения традиционных бизнес-процессов, так и в сфере новых бизнес-моделей и идей [2, с. 48]. Ключевой особенностью ИИ является его способность к самообучению. Анализируя данные, полученные на собственном опыте, ИИ способен решать многие аналитические задачи, такие как классификация, прогнозирование, оценка данных. Стремительный рост объемов патентной и научно-технической информации усложняет традиционные подходы к анализу технологических трендов, управлению ИС и оценке ее рыночной стоимости. В этих условиях методы ИИ, включая машинное обучение и обработку естественного языка, становятся ключевыми инструментами для повышения эффективности и достоверности патентных исследований, прогнозирования технологического развития и стоимостной оценки объектов ИС.

Исследование, направленное на анализ развития технологий ИИ в сфере создания и использования объектов ИС, приобретает особую актуальность в связи с увеличением объема патентных данных, с повышением требований к точности технологического прогнозирования, со сложностью объективной оценки стоимости объектов ИС в условиях быстро меняющейся технологической среды. Использование ИИ приобретает значимость также в государственном и корпоративном планировании при формировании национальных и отраслевых инновационных стратегий, управлении портфелями ИС и минимизации рисков нарушения чужих прав.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-253-257

Цель исследования заключается в комплексной систематизации возможностей ИИ для решения трех ключевых задач: прогнозирования технологических трендов, автоматизации патентных исследований и повышения объективности оценки объектов ИС, а также определении ограничений и рисков их практического внедрения.

Научная новизна исследования состоит в предложении комплексной модели применения ИИ в сфере управления ИС, охватывающей взаимосвязанные функции – анализ, прогнозирование и оценку. Представлен критический анализ границ применения технологий искусственного интеллекта, обобщены риски использования ИИ-систем.

Экономическое, социальное и культурное развитие общества происходит вместе с ускорением темпов роста в научно-технической сфере. Информационно-компьютерная индустрия и технологии искусственного интеллекта кардинально изменили наше общество, шагнув в эпоху интеллектуальной экономики, где наука, информация, интеллектуальные продукты стали движущей силой экономического роста. Интеллектуальная собственность выступает сегодня источником высоких конкурентных преимуществ, служит показателем экономической независимости, способствует ускорению темпов роста ВВП, повышает инновационную активность экономики [3, с. 40].

Для современной экономики всё более острой становится проблема эффективного управления интеллектуальной собственностью для целей социально-экономического развития, которая может быть решена с помощью профессионалов, вооруженных технологиями искусственного интеллекта. Способности анализировать и обрабатывать большие объемы информации с высокой скоростью и точностью у ИИ постоянно растут, обеспечивая возможности автоматизации и оптимизации процессов. С помощью алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей, появляется возможность автоматизации рутинных задач, таких как обработка данных, прогнозирование научно-технического прогресса, проведение патентных исследований, что позволяет сократить затраты, увеличить производительность, снизить вероятность негативного влияния человеческого фактора и повысить точность полученных результатов. Кроме того, ИИ открывает новые возможности для инноваций и создания новых продуктов.

Перспективные области применения ИИ в сфере создания и использования объектов ИС

Термин Искусственный Интеллект впервые был введен в 1956 году Джоном Маккартни, который определял ИИ как науку и технологию создания интеллектуальных компьютерных программ; свойство интеллектуальных систем выполнять творческие функции, которые традиционно считаются прерогативой человека [4]. В настоящее время ИИ – общий термин, который объединяет в себе множество более конкретных понятий, таких как компьютерное зрение, нейросети, машинное обучение и т. д. Существует множество подходов к определению ИИ – через описание инструментов, характерных черт, сферы применения.

В рамках данного исследования понятие искусственного интеллекта определяется в самом широком его смысле – как совокупность технологий обработки различных типов данных и информации, в частности способных интерпретировать такие данные, извлекать знания и использовать для достижения целей [5].

ИИ представляет собой технологическую область, которая открывает множество персептивных направлений применения в сфере создания объектов ИС, основные из которых представлены на рисунке 1.

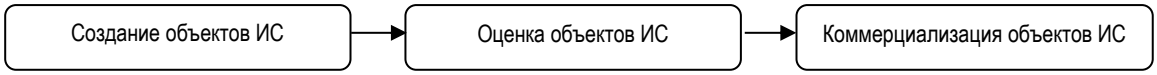


Рисунок 1 – Перспективные направления применения ИИ в сфере создания и использования объектов ИС

Создание результатов интеллектуальной деятельности включает в себя несколько этапов, среди которых формулирование идеи, патентные исследования, научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки.

Идея может появиться как в процессе научной деятельности, так и на базе более ранних научных исследований. Широкий взгляд на идею предусматривает не только ее техническое решение, но и идею коммерциализации технологической разработки, результаты реализации которой предусматривают повышение конкурентоспособности технологии или продукта, идею бизнеса, основанного на новой технологии или новом продукте [6, с. 195].

Продвинутые системы ИИ помогут исследователям-людям намного быстрее анализировать гигантские массивы данных и лучше ориентироваться в них, заранее устранять из научного поиска тупиковые комбинации идей, ускорять разработку новых продуктов, улучшать дизайн предоставляемых услуг, создавать более перспективные цифровые прототипы и просто обеспечивать несопоставимо большие вычислительные возможности для выискивания «иголок» (прорывных технологий) в «стоге сена» (в общем массиве информации). Взяв на себя многие задачи, которые раньше выполняли исследователи-люди, исследователи-системы ИИ смогут подтолкнуть таким образом экономику к взрывному росту [7, с. 34].

На этом этапе ИИ становится мощным инструментом для прогнозирования технологических трендов и выявления прорывных инноваций. ИИ-системы анализируют огромные массивы данных – патенты, научные публикации, техническую документацию, другие источники информации для выявления появляющихся технологий, позволяя обнаруживать тренды на ранних стадиях, когда они ещё не вполне очевидны для научного сообщества. Современные ИИ-системы сканируют миллионы патентов и научных статей, выявляя связи между областями, определяя технологические пробелы и прогнозируя направления технологического развития. Технологии ИИ, применяя различные математико-статистические методы, имеют возможность строить многовариантные прогнозы с высокой степенью точности и с минимальными временными затратами.

Несмотря на популярность использования ИИ для прогнозирования технологических трендов, нельзя не определить некоторые ограничения и риски этого направления. Связаны они, в первую очередь с самой природой алгоритмов машинного обучения и обработки данных, которые построены на экстраполяции ретроспективных данных. Технологические же прорывы являются чаще всего радикальными, в основе которых находятся абсолютно новые, уникальные решения. Очевидно, что ИИ выступает здесь как мощный инструмент обработки информации и определении скрытых закономерностей, а человек принимает окончательное решение.

С целью обоснования идеи, в процессе ее разработки, на основе патентной информации о последних достижениях науки и техники, проводятся **патентные исследования**. Анализируется уровень технической сложности идеи, новизна технологии, технический уровень и тенденции развития объектов техники, патентоспособность, патентная чистота и конкурентоспособность реализуемой идеи.

Анализ патентной информации является необходимым инструментом принятия решений в процессе научно-исследовательской деятельности. Осуществление релевантного патентного поиска позволяет не только иметь информацию о наличии научных достижений в различных областях, но и выявлять перспективные научные направления, сферы применения инноваций. Патентные исследования необходимы для исследовательских и технологических компаний, авторов изобретений, научных и образовательных организаций, участников государственных закупок и др. [8, с. 8].

Современные патентные исследования сталкиваются с огромными объемами текстовых данных, содержащихся в патентных документах. Для упрощения патентного поиска и экспертизы ИИ имеет огромный потенциал, предоставляя мощные инструменты для обработки и анализа этих текстовых описаний, что существенно улучшает процесс извлечения значимой информации из патентных документов.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-253-257

Алгоритмы обработки естественного языка позволяют автоматически извлекать ключевые слова и фразы из текстовых описаний патентов, а также классифицировать документы в соответствии с определенными темами или областями техники. Это значительно упрощает процесс поиска и анализа патентной информации, особенно при работе с большими объемами данных. ИИ также применяется для определения патентоспособности изобретений [9].

Кроме того, искусственный интеллект способен автоматизировать процесс создания отчетов по патентным исследованиям путем автоматического поиска и анализа патентных данных, системы на основе искусственного интеллекта могут генерировать структурированные отчеты, содержащие информацию о технических тенденциях, ключевых игроках на рынке и прочих патентных метриках [10, с. 44].

В связи с тем, что патент представляет собой документ, содержащий помимо графических объектов описание разработки, требуется обработка естественного языка. Алгоритмы обработки естественного языка автоматически извлекают ключевые слова и фразы из текстовых описаний патентов, классифицируют документы, что существенно упрощает патентный поиск и анализ информации. К основным направлениям использования ИИ в патентных исследованиях относят анализ текстовых описаний патентов, идентификацию семантических схожих патентов, прогнозирования патентоспособности. Автоматизированное создание отчетов, выявление трендов развития технологий и технических решений [11].

Еще одной важной функцией искусственного интеллекта в патентных исследованиях является выявление патентных конфликтов. ИИ может автоматически анализировать патентные данные и идентифицировать ситуации, когда предполагаемое изобретение может нарушить уже существующий патент. Это позволяет предотвратить возможные юридические проблемы и минимизировать риски для компании.

Внедрение искусственного интеллекта в сферу патентных исследований наиболее эффективно для таких объектов ИС как промышленные образцы и средства индивидуализации товаров. Решение об охраноспособности товарных знаков и промышленных образцов принимается по критерию оригинальности и новизны. С увеличением количества заявок на эти объекты ИС, Всемирная организация интеллектуальной собственности разработала инструмент поиска изображений на основе ИИ. Этот инструмент встроен в Глобальную базу данных по брендам и является первым в своем роде и выдает результаты с высокой точностью за секунды [12, с. 114].

Для технических же решений, таких как изобретения и полезные модели, использование технологий ИИ – от поиска предшествующего уровня техники до анализа портфелей и подготовки заявок – сопряжено со специфическими ограничениями и рисками, которые необходимо учитывать для минимизации рисков юридического и экономического характера.

Многие патенты содержат чертежи, схемы, химические формулы и структурные диаграммы. Для полноценной интерпретации этих данных ИИ-системы должны быть способны корректно анализировать весь визуальный контент. Развитие патентного права, в том числе изменения критериев патентоспособности и раскрытия сущности изобретения, требуют регулярного обучения ИИ на актуальных данных. Исследователи и патентоведы несут персональную ответственность за качество работы, в связи с чем полностью делегировать задачи по проведению патентных исследований не стоит и выводы, предложенные ИИ, окончательно оформлять после экспертной оценки специалиста.

Управление **научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими разработками** (НИОКР) сегодня является трудоемким процессом, требующим применения инновационных подходов и учета специфических особенностей, присущих той или иной научной сфере. Внедрение нейросетевых технологий и ИИ в процесс управления НИОКР на этих этапах очевидно предоставит возможность ученым получать информацию более оперативно, чем при традиционных исследованиях и сократить временные затраты на освоение НИОКР. Каждый из циклов НИОКР, включающих разработку, эксперименты, испытания, анализ результатов, корректировку требует затрат ресурсов, что определяет их высокую стоимость и длительные сроки. Кардинально может изменить ситуацию использования технологий ИИ. Первоначально обучаясь на ретроспективных данных, на результатах интеллектуальной деятельности уже имеющихся лабораторных испытаний, система прогнозирует заданные процессы, со временем повышая их точность, тем самым значительно сокращая количество необходимых экспериментов и ускоряя процесс исследования. Для тестирования и оптимизации результатов интеллектуальной деятельности могут создаваться «цифровые двойники технологий» – виртуальные копии разработок.

Сегодня ИИ уже трансформирует изобретательскую деятельность благодаря способности анализировать огромные объёмы данных, находить охраноспособные результаты творческой деятельности – музыкальные, литературные произведения и произведения изобразительного искусства [13, с. 31].

С целью ускорения процесса **оформления заявки** на патентование результатов интеллектуальной деятельности также можно рассчитывать на обучаемые системы ИИ и оформлять пакет документов в патентное ведомство с наименьшими трудозатратами.

В свою очередь экспертная комиссия патентного ведомства при оценке патентоспособности объектов ИС по всем критериям их охраноспособности может сократить сроки выдачи охранных документов и повысить качество оценки объектов.

Среди основных направлений деятельности в сфере интеллектуальной деятельности важное место занимает **оценка интеллектуальной собственности** – деятельность, осуществляемая в процессе передачи прав на объекты ИС. Особенности оценки ИС определяются целями и задачами коммерческого использования объектов ИС, при этом основной целью оценки является установление обоснованной рыночной стоимости объекта оценки, что в практической деятельности оценщика оказывается непростой задачей. Сложность определения обоснованной рыночной стоимости связана с необходимостью учёта целого ряда проблем экономического, технического и юридического характера и множеством изменяющихся и влияющих на ее оценку факторов [14, с. 73].

В настоящее время уже существует определенный опыт применения ИИ при определении стоимости недвижимого имущества [15, с. 310]. Однако в отношении оценочной деятельности в сфере ИС подобная практика пока не применяется. В Беларуси отсутствуют общедоступные сервисы по автоматизированному определению стоимости ИС.

При внедрении разработки технологий ИИ для оценки ИС появится возможность ещё на этапе планирования предусмотреть выделение ресурсов на создание объекта ИС, на этапе проектирования предусмотреть объем исходных данных, включающих максимальное количество различных показателей, способных прямо или опосредованно оказывать влияние на стоимость ИС, на этапах разработки и тестирования выработать оптимальные алгоритмы оптимизации стоимости оцениваемого объекта [16].

Традиционные методы оценки (затратный, доходный и сравнительный) имеют ряд недостатков и, как правило, не учитывают динамику технологической среды. ИИ позволяет интегрировать множественные факторы – правовую чистоту, цитируемость патентов, территориальную составляющую защиты, технологическую активность конкурентов – для формирования более точной оценки стоимости изобретений, товарных знаков и других активов ИС.

Особенности использования ИИ-систем в оценке объектов ИС ограничены в первую очередь необходимостью владения полной и достоверной информацией о рынке интеллектуальной собственности, т. к. модели ИИ используют рыночный подход. Динамика рынка ИС, условия конфиденциальности коммерческих сделок, уникальность каждой научной разработки – проблемы, с которыми сталкивается ИИ [17, с. 16].

Таким образом, определение справедливой стоимости объекта ИС остается область, где критически важны контекст, юридическая интерпретация, стратегическое видение и профессиональная ответственность, системы же искусственного интеллекта могут выступать как незаменимый помощник.

Особый интерес представляют технологии искусственного интеллекта и на этапе **коммерциализации**. Начнем с того, что активное использование ИИ на всех предыдущих этапах, значительно сокращает путь от идеи до внедрения результатов интеллектуальной деятельности.

Для участников лицензионных отношений ИИ становится инструментом стратегического принятия решений в области ИС, позволяя компаниям быстрее реагировать на изменения технологической среды и выявлять новые возможности для инвестиций в технологии.

Системы ИИ обрабатывают патентные ландшафты, выявляя ключевых игроков, технологические тренды и перспективные ниши для приобретения прав на объекты ИС; анализируют рыночные данные для оценки коммерческого потенциала изобретения ещё до его приобретения; отслеживают наличие аналогичных технологий, исследуя патентные портфели конкурентов и выявляют потенциальных лицензиатов на определенную технологию; оценивают потенциальную прибыль от лицензирования на основе аналогичных сделок и рыночных условий. Таким образом, использование ИИ значительно повышает точность и скорость определения технологий, обладающих наибольшим потенциалом для лицензирования, позволяет определить самые эффективные технологии как с точки зрения технологического превосходства объекта ИС, так и со стороны его коммерческой привлекательности.

Искусственный интеллект также может быть незаменим в управлении жизненным циклом технологии. В отличие от традиционных методов, ИИ позволяет не просто отслеживать этапы, а прогнозировать переходы между этими этапами (введение в хозяйственный оборот предприятия; рост потенциала технологии; зрелость технологии; тенденции к её моральному износу) и принимать возможные превентивные меры. Построение кривых зрелости технологии на основе патентных данных предсказывают точку насыщения и необходимости перехода к следующему технологическому поколению.

Заключение

Стремительное развитие технологий влияет на все сферы жизни общества, в частности, и на сферу интеллектуальной собственности. На сегодняшний день технологии ИИ оказывают влияние на творческий процесс создания новых результатов интеллектуальной деятельности. Это не просто компьютеры, структурирующие данные в определенном порядке. Это системы, которые в результате определенных методов и алгоритмов способны анализировать информацию и самообучаться путем использования данных без дополнительного программирования. Конструкция нейронных сетей позволяет создать имитацию когнитивных функций человеческого мозга, улучшая при этом производительность в процессе обработки имеющихся данных без дальнейшего вмешательства человека, то есть автономно. Современные системы искусственного интеллекта уже вполне могут создавать результаты, являющиеся потенциально охраноспособными в качестве объектов интеллектуальных прав [18].

В 60-е годы XX столетия первые исследователи искусственного интеллекта считали, что до появления интеллектуальных машин, способных мыслить на уровне человека, осталось каких-то 10 лет. Однако, даже сейчас алгоритмы далеки от воспроизведения человеческого мышления. Технологии ИИ находятся на этапе роста ожиданий от их применения, но станут ли они реальными в использовании – покажет время [19, с. 88].

В сфере интеллектуальной собственности наблюдается большой интерес к технологиям ИИ. Современные технологии и право интеллектуальной собственности тесно связаны между собой. Переходный этап сближения и внедрения данных технологий во все сферы управления интеллектуальной собственностью следует изучать, анализировать и поддерживать.

Искусственный интеллект трансформирует весь жизненный цикл технологических разработок – от идеи до внедрения и оценки, обеспечивая ускорение инновационных процессов, снижение затрат и повышение качества принимаемых решений. Однако важно сопровождать это развитие этическими, правовыми и методологическими рамками, чтобы избежать неконтролируемых рисков.

Исследование возможностей и ограничений ИИ в контексте прогнозирования технологического развития, проведения патентных исследований и оценки объектов ИС представляет собой научно обоснованную и практически значимую задачу. Полученные результаты должны сопровождаться интеллектуальными экспериментами, где машины и люди взаимодействуют в тесном цикле прогнозирования, проверки и уточнения данных [20].

Список цитированных источников

1. Искусственный интеллект: от фундаментальных проблем к прикладным задачам : монография : в 2 т. / под ред. Е. Н. Макаренко. – Ростов н/Д. : Ростовский государственный экономический университет, 2025. – 393 с.
2. Корнилов, Д. А. Анализ и перспективы развития мирового рынка искусственного интеллекта / Д. А. Корнилов, Ю. Н. Шувалова // Развитие и безопасность / НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2021. – № 1 (21). – С. 46–57.
3. Ермакова, Э. Э. Роль интеллектуальной собственности в инновационном развитии общества / Э. Э. Ермакова // Экономика. Финансы. Управление. – 2010. – № 5. – С. 40–44.
4. Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2025. – URL: https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartnertop10strategictechnologytrendsfor2019 (дата обращения: 12.01.2026).
5. Цифровая экономика от теории к практике: как российский бизнес использует ИИ / Отчет РАЭК и НИУ ВШЭ, 2024. – URL: https://raec.ru/upload/files/190715-ii.pdf (дата обращения: 20.01.2026).
6. Ермакова, Э. Э. Классификация рисков интеллектуальной деятельности / Э. Э. Ермакова, М. П. Мишкова // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 1(133). – С. 194–197. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-194-197.
7. Капелюшников, Р. И. Искусственный интеллект и проблема сингулярности в экономике: препринт WP/2025/01 / Р. И. Капелюшников ; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2025. – 67 с.
8. Погонышев, В. А. Искусственный интеллект в патентоведении / В. А. Погонышев, Д. А. Погонышева // Инофрмационные технологии. – 2023. – № 2 (22). – С. 7–9.
9. Deep learning for predicting patent application outcome: The fusion of text and network embeddings / Hongxun Jiang, Shaokun Fan, Nan Zhang, Bin Zhu // Journal of Informetrics. – 2023. – Vol. 17, Iss. 2. – DOI: 10.1016/j.joi.2023.101402.
10. Черненко, А. М. Использование искусственного интеллекта в патентных исследованиях / А. М. Черненко // Механика. Управление. Информатика ИКИ РАН. – 2024. – № 3 (65). – С. 38–49.
11. Тенденции развития технологий: Искусственный интеллект : Доклад ВОИС о технологических тенденциях (WITT). – URL: https://www.wipo.int/pressroom/ru/news/2019/news_0002.html (дата обращения: 12.01.2026).
12. Ермакова, Э. Э. Управление интеллектуальной собственностью в эпоху развития технологий искусственного интеллекта / Э. Э. Ермакова // Актуальные проблемы современных экономических систем – 2025 : сб. научных трудов / редкол.: А. Г. Проровский [и др.] – Брест : БрГТУ, 2025. – С. 112–116.
13. Ермакова, Э. Э. Основные подходы к оценке стоимости объектов интеллектуальной собственности / Э. Э. Ермакова // Вестник Брестского государственного технического университета. Экономика. – 2019. – № 3. – С. 30–33.
14. Смоляк, А. С. Искусственный интеллекта в массовой и индивидуальной оценке / А. С. Смоляк, Е. П. Нейман // Имущественные отношения в Российской Федерации. – 2020. – № 5 (224). – С. 71–75.
15. Клементьев, В. А. Применение искусственного интеллекта в оценке интеллектуальной собственности / В. А. Клементьев // Вестник ФИПС. – 2024. – № 3 (9). – С. 308–312.
16. Ермакова, Э. Э. Основы управления интеллектуальной собственностью. Краткий курс лекций / Э. Э. Ермакова. – Брест : БрГТУ, 2022. – 58 с.
17. Искусственный интеллект в сфере интеллектуальной собственности : Исследование IPChain ИИ в сфере ИС. – URL: https://rspp.ru/upload/iblock/f89/Исследование%20IPChain%20Искусственный%20интеллект%20в%20сфере%20ИС.pdf (дата обращения: 21.01.2026).
18. Brooks R. An Inconvenient Truth About AI — AI won't surpass human intelligence anytime soon / R. Brooks // IEEE Spectrum : сайт. – URL: https://mordorintelligence.com/industry-reports/naturallanguage-processing-market (дата обращения: 18.01.2026).

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-253-257

19. Ермакова, Э. Э. Технологии искусственного интеллекта в интеллектуальной деятельности / Э. Э. Ермакова // Инновации: от теории к практике : сб. научн. статей X междун. науч.-практич. конф., Брест, 30–31 окт. 2025 г. – Брест : БрГТУ, 2025. – С. 86–92.
20. Ратледж, Ву Дэйв. От проб и ошибок к прогнозированию и проверке: влияние ИИ на производственные НИОКР / Ву Дэйв Ратледж // Лидеры мысли декабрь 2025 г. – URL: https://www.unite.ai/ru/from-trial-and-error-to-predict-and-verify-ais-impact-onmanufacturing-rd (дата обращения: 14.02.2026).

References

1. Iskusstvennyj intellekt: ot fundamental'nyh problem k prikladnym zadacham : monografiya : v 2 t. / pod red. E. N. Makarenko. – Rostov n/D. : Rostovskij gosudarstvennyj ekonomicheskij universitet, 2025. – 393 s.
2. Kornilov, D. A. Analiz i perspektivy razvitiya mirovogo rynka iskusstvennogo intellekta / D. A. Kornilov, YU. N. SHuvalova // Razvitie i bezopasnost' / NGTU im. R. E. Alekseeva. – N. Novgorod, 2021. – № 1 (21). – S. 46–57.
3. Ermakova, E. E. Rol' intellektual'noj sobstvennosti v innovacionnom razvitii obshchestva / E. E. Ermakova // Ekonomika. Finansy. Upravlenie. – 2010. – № 5. – S. 40–44.
4. Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2025. – URL: https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartnertop10strategictechnologytrendsfor2019 (data obrashcheniya: 12.01.2026).
5. Cifrovaya ekonomika ot teorii k praktike: kak rossijskij biznes ispol'zuet II / Otchet RAEK i NIU VSHE, 2024. – URL: https://raec.ru/upload/files/190715-ii.pdf (data obrashcheniya: 20.01.2026).
6. Ermakova, E. E. Klassifikaciya riskov intellektual'noj deyatel'nosti / E. E. Ermakova, M. P. Mishkova // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 1 (133). – S. 194–197. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-194-197.
7. Kapelyushnikov, R. I. Iskusstvennyj intellekt i problema singulyarnosti v ekonomike: preprint WP/2025/01 / R. I. Kapelyushnikov ; Nac. issled. un-t «Vysshaya shkola ekonomiki». – M. : Izd. dom Vysshej shkoly ekonomiki, 2025. – 67 s.
8. Pogonyshev, V. A. Iskusstvennyj intellekt v patentovedenii / V. A. Pogonyshev, D. A. Pogonysheva // Inofrmacionnye tekhnologii. – 2023. – № 2 (22). – S. 7–9.
9. Deep learning for predicting patent application outcome: The fusion of text and network embeddings / Hongxun Jiang, Shaokun Fan, Nan Zhang, Bin Zhu // Journal of Informetrics. – 2023. – Vol. 17, Iss. 2. – DOI: 10.1016/j.joi.2023.101402.
10. CHernenko, A. M. Ispol'zovanie iskusstvennogo intellekta v patentnyh issledovaniyah / A. M. CHernenko // Mekhanika. Upravlenie. Informatika IKI RAN. – 2024. – № 3 (65). – S. 38–49.
11. Tendencii razvitiya tekhnologij: Iskusstvennyj intellekt : Doklad VOIS o tekhnologicheskih tendenciyah (WITT). – URL: https://www.wipo.int/pressroom/ru/news/2019/news_0002.html (data obrashcheniya: 12.01.2026).
12. Ermakova, E. E. Upravlenie intellektual'noj sobstvennost'yu v epohu razvitiya tekhnologij iskusstvennogo intellekta / E. E. Ermakova // Aktual'nye problemy sovremennyh ekonomicheskih sistem – 2025 : sb. nauchnyh trudov / redkol.: A. G. Prorovskij [i dr.] – Brest : BrGTU, 2025. – S. 112–116.
13. Ermakova, E. E. Osnovnye podhody k ocenke stoimosti ob"ektov intellektual'noj sobstvennosti / E. E. Ermakova // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ekonomika. – 2019. – № 3. – S. 30–33.
14. Smolyak, A. S. Iskusstvennyj intellekta v massovoj i individual'noj ocenke / A. S. Smolyak, E. P. Nejman // Imushchestvennye otnosheniya v Rossijskoj Federacii. – 2020. – № 5 (224). – S. 71–75.
15. Klement'ev, V. A. Primenenie iskusstvennogo intellekta v ocenke intellektual'noj sobstvennosti / V. A. Klement'ev // Vestnik FIPS. – 2024. – № 3 (9). – S. 308–312.
16. Ermakova, E. E. Osnovy upravleniya intellektual'noj sobstvennost'yu. Kratkij kurs lekcij / E. E. Ermakova. – Brest : BrGTU, 2022. – 58 c.
17. Iskusstvennyj intellekt v sfere intellektual'noj sobstvennosti : Issledovanie IPChain II v sfere IS. – URL: https://rspp.ru/upload/iblock/f89/Issledovanie%20IPChain%20Iskusstvennyj%20intellekt%20v%20sfere%20IS.pdf (data obrashcheniya: 21.01.2026).
18. Brooks R. An Inconvenient Truth About AI — AI won't surpass human intelligence anytime soon / R. Brooks // IEEE Spectrum : sajt. – URL: https://mordorintelligence.com/industry-reports/naturallanguage-processing-market (data obrashcheniya: 18.01.2026).
19. Ermakova, E. E. Tekhnologii iskusstvennogo intellekta v intellektual'noj deyatel'nosti / E. E. Ermakova // Innovacii: ot teorii k praktike : sb. nauchn. statej X mezhdun. nauch.-praktich. konf., Brest, 30–31 okt. 2025 g. – Brest : BrGTU, 2025. – S. 86–92.
20. Ratledzh, Vu Dejv. Ot prob i oshibok k prognozirovaniyu i proverke: vliyanie II na proizvodstvennye NIOKR / Vu Dejv Ratledzh // Lidery mysli dekabr' 2025 g. – URL: https://www.unite.ai/ru/from-trial-and-error-to-predict-and-verify-ais-impact-onmanufacturing-rd (data obrashcheniya: 14.02.2026).

Материал поступил 19.02.2026, одобрен 02.03.2026, принят к публикации 02.03.2026

УДК 339.926

ТРАНСГРАНИЧНЫЙ ТУРИЗМ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В. В. Зазерская[1], А. И. Тарасёнок[2]

[1] К. э. н., доцент, декан экономического факультета, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: zazerskaya@mail.ru

[2] Д. э. н., профессор, профессор кафедры межкультурной профессиональной коммуникации, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Реферат

Международное сотрудничество может стать мощным стимулом для развития туризма, способствуя совершенствованию туристической отрасли в соседних странах. Трансграничный туризм, охватывающий приграничные регионы, предполагает разработку маршрутов, проходящих через эти территории, строительство и модернизацию туристической инфраструктуры, создание совместных зон отдыха и охраны природы, а также организацию экологических маршрутов на их территории. Цель работы заключается в систематизации теоретических и практических подходов к анализу влияния трансграничности на туристскую отрасль и выявление основных факторов, которые оказывают влияние на эффективность межрегионального сотрудничества в сфере туризма. В ходе исследования будут определены ключевые направления развития трансграничного туризма и его основные составляющие. Среди проблем, препятствующих развитию туризма, выделяются недостаточно развитая туристическая и транспортно-логистическая инфраструктура, низкий уровень инвестиций в туристическую отрасль и недостаточное финансирование туристических маркетинговых кампаний.

Проведен анализ туристических потоков и туристической активности. Инструментом сохранения и популяризации природного и культурно-исторического потенциала приграничных регионов, а также повышения предпринимательской деятельности выступает построение маршрутов трансграничного туризма. В части развития транспортно-логистической инфраструктуры идут работы по улучшению логистических возможностей прибытия туристов из государств – членов ЕАЭС воздушным транспортом и восстановлению железнодорожного сообщения, в том числе с учетом реализации совместных евразийских туристических маршрутов.

В работе представлена оценка развития туристской инфраструктуры, рассчитан интегрированный индекс, включающий индивидуальные параметры состояния структурных элементов туристской инфраструктуры региона.

Результаты работы демонстрируют значимость политических, инфраструктурных, социально-культурных и экономических факторов в формировании трансграничных потоков и определяют практическую ценность для туристских компаний и органов управления, заинтересованных в развитии международного туризма.

Ключевые слова: туризм, трансграничный туризм, трансграничные потоки, туристическая активность, индекс развития туристской инфраструктуры региона.

CROSS-BORDER TOURISM IN MODERN CONDITIONS

V. V. Zazerskaya, A. I. Tarasionak

Abstract

International cooperation can be a powerful stimulus for tourism development, contributing to the improvement of the tourism industry in neighboring countries. Cross-border tourism, encompassing border regions, involves the development of routes passing through these territories, the construction and modernization of tourism infrastructure, the creation of joint recreation and nature conservation areas, and the organization of ecological routes within these territories. The aim of this study is to systematize theoretical and practical approaches to analyzing the impact of cross-border tourism on the tourism industry and identify the key factors that influence the effectiveness of interregional cooperation in tourism. The study will identify key areas for the development of cross-border tourism and its main components. Among the challenges hindering tourism development are underdeveloped tourism and transport and logistics infrastructure, low investment in the tourism industry, and insufficient funding for tourism marketing campaigns.

An analysis of tourist flows and activity was conducted. The development of cross-border tourism routes is a tool for preserving and promoting the natural, cultural, and historical potential of border regions, as well as enhancing entrepreneurial activity. In terms of developing transport and logistics infrastructure, work is underway to improve logistical capabilities for tourists arriving from EAEU member states by air and restore rail service, including through the implementation of joint Eurasian tourist routes.

This paper presents an assessment of tourism infrastructure development and calculates an integrated index, including individual parameters for the condition of the structural elements of the region's tourism infrastructure.

The results demonstrate the importance of political, infrastructural, socio-cultural, and economic factors in shaping cross-border flows and define practical value for tourism companies and government agencies interested in developing international tourism.

Keywords: tourism, cross-border tourism, cross-border flows, tourist activity, regional tourism infrastructure development index.

Введение

Одной из крупных мировых отраслей с высокими темпами роста является туризм, что связано сростом спроса на отдых. В условиях глобализации особого внимания требуют регионы, которые отличаются трансграничным положением, так как имеются предпосылки для формирования особых зон с интенсивными межрегиональными и международными экономическими, социальными и культурными связями. Он играет важную роль в социально-экономическом и политическом развитии стран, способствует более широкому культурному обмену. Такие страны как США, Великобритания, Канада, используют его преимущества для поддержания своей экономики.

Статистическая комиссия ООН интерпретирует понятие туризма: «Туризм – это деятельность лиц, которые путешествуют и осуществляют пребывание в местах, находящихся за пределами их обычной среды, в течение периода, не превышающего одного года подряд, с целью отдыха, деловыми или прочими целями» [1].

Несколько по-иному рассмотрено понятие туризма С. А. Быстровым и М. Г. Воронцовой, которые выделяют его две составляющие: социально-культурную и экономическую. По их мнению с социально-культурной точки зрения под туризмом понимаются временные путешествия граждан с постоянного места жительства в места временного пребывания в оздоровительных, познавательных, профессионально-деловых,

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-258-264

спортивных и иных целях без оплачиваемой деятельности в месте временного пребывания [2].

Вышеприведенные определения туризма лишь отражают различные стороны одного социально-экономического явления, и можно сделать следующее обобщение: туризм – это временное перемещение граждан из мест их постоянного проживания в другие места с определенной целью путешествия, без права занятия деятельностью в месте их пребывания, которое является деятельности системы субъектов туристской индустрии.

Трансграничный туризм – вид туристической деятельности, охватывающий трансграничные регионы, который представляет собой организацию маршрутов по данным территориям, строительство и улучшение туристской инфраструктуры, создание совместных рекреационных, природоохранных зон и организацию на них экологических маршрутов [3, 4]

Согласно концепции трансграничного туризма, Брингас [5] определяет его как «временное перемещение людей за пределы их обычного места жительства в города, прилегающие к разделительной линии между двумя странами, происходящее по причинам досуга, развлечения, отдыха, здоровье, бизнес, посещение семьи и/или друзей, религия, общественные мероприятия или шопинг, среди прочего, пребывание которых не превышает одного года и предполагает как минимум одну ночевку в посещаемом месте». Трансграничное туристическое пространство понимается не только через его физические атрибуты, но и через символические компоненты, в результате чего возникает концепция социального построения туристического пространства, которое определяется отношениями и взаимодействиями, возникающими между туристами и хозяевами, с другими субъектами, также играющие важную роль. Государственные и частные учреждения способствуют развитию туризма, создавая отношения между пространством, в котором осуществляется туристическая деятельность, и различными группами интересов [6].

Реализация трансграничного туризма происходит на основе заключения международных договоров и программ, двухсторонних договоров между двумя и более государствами или регионами этих стран. Данный вид туризма способствует расширению и укреплению международных отношений, взаимодействию в экономической сфере.

Существуют ключевые направления развития трансграничного туризма: организация трансграничных туристических маршрутов, которые включают в себя посещение туристских объектов пограничных государств, совместно согласованное размещение и развитие центров, трасс и инфраструктуры туризма по обе стороны границы, организация крупных международных мероприятий в приграничных регионах для привлечения туристов из соседнего государства (фестивалей, спортивных соревнований, торговых ярмарок и пр.) [7].

Основным преимуществом трансграничного туризма выступает его роль в продвижении трансграничного региона как единой туристской дестинации на мировом туристическом рынке. Более того, такой туризм служит инструментом для более эффективного и бережного использования общих природно-культурных ресурсов, сокращает расходы на развитие инфраструктуры регионов [8].

Трансграничный туризм вносит такой положительный экономический вклад, как увеличение валютных поступлений, что впоследствии улучшает платежный баланс, расширяет сектор услуг за счет создания рабочих мест с широким диапазоном уровней квалификации, привлекает инвестиционный капитал, стимулируя развитие инфраструктуры, экономическое развитие и долгосрочную стабильность [9, 10].

Поскольку туризм стимулирует экономическую активность в пункте назначения, он также способствует улучшению общего экономического положения страны, приводя к увеличению ВВП. Например, на островах Карибского бассейна и Тихого океана более 50 % ВВП приходится на туризм, который увеличивается до 88 % в случае Мальдивских островов.

В Программе социально-экономического развития страны на 2026–2030 годы направление «реализация туристического потенциала» закреплено в числе национальных приоритетов [11]. В 2024 году 87 % всех поездок внутри страны – однодневные, без ночевки. Средняя продолжительность въездного тура составляет всего четыре дня, тогда как белорусы за рубежом отдыхают в среднем восемь дней – 35–40 % путешествий совершаются на срок менее суток. Во внутреннем туризме доминируют неорганизованные самостоятельные путешественники – 94,5 % [11].

В 2024 году общее количество въездных поездок составило 6,6 млн, а внутренних – 19,7 млн. За границу совершено 4,7 млн поездок. В сфере работают более 1,1 тыс. туристических организаций, которые сотрудничают с 124 странами мира. Их услугами в прошлом году воспользовались свыше 2,7 млн человек (рисунок 1). Во-первых, это обуславливается работой государства в улучшении компонентов и характеристик системы туристского обслуживания:

- качества предоставляемых услуг;
- количества предприятий, осуществляющие эти услуги;
- характера и объёма финансирования туризма и т. д.

Во-вторых, визовые условия способствуют въездному туризму преобладать над выездным. В Беларуси действует безвизовый режим для граждан 80 стран мира, включая 39 государств Европы. Преимущественное количество туристов, посетивших Республику Беларусь, из России и Литвы.

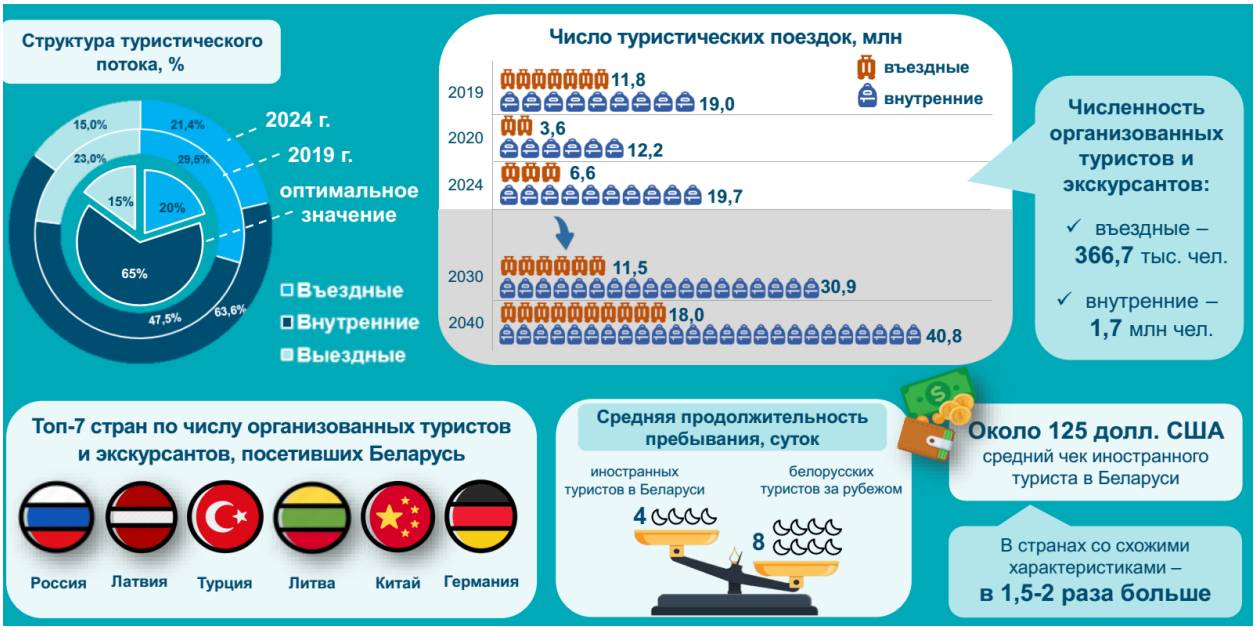


Рисунок 1 – Анализ туристических потоков и туристической активности [13]

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-258-264

Пользовались популярностью агроусадьбы – их в стране в 2024 году насчитывалось 1408. Здесь побывали 427,6 тыс. человек из 41 страны, которые в среднем находились на отдыхе два дня. В числе гостей, в основном, белорусы (413 640 человек), на втором месте – россияне (11 919 агротуристов). Замыкают пятерку Узбекистан, Латвия и Казахстан.

Что касается выездного туризма, то география насчитывает 113 стран. В лидерах по числу организованных туристов, выехавших за рубеж, значатся Турция, Россия, Египет, ОАЭ и Грузия.

Основные направления и точки роста

В Беларуси представлены 13 видов туризма: историко-культурный, образовательный, религиозный, лечебно-оздоровительный, медицинский, агроэкотуризм, охотничий, событийный, промышленный, экологический, деловой, гастрономический, активный (рисунок 2). В настоящее время наблюдается рост всех направлений туризма. Соотношение турпотоков соответствует оптимальной пропорции (60–70 % – внутренний, 15–25 % – въездной и 10–20 % – выездной) [12].

Туристические прибытия обеспечили около 820 млн долл. США экспорта по статье «Поездки» и около 270 млн долл. США экспорта туруслуг по методологии Белстата [12]. Доля сферы туризма в ВВП более чем в два раза меньше доли в занятости, что свидетельствует о высокой трудозатратности. В сфере услуг в целом данное соотношение составляет 1,3 раза. По оценке, 1 млн въездных и внутренних туристических поездок формируют порядка 0,09 % ВВП Беларуси, а по отрасли в целом на сегодняшний день – порядка 2,6 % ВВП.

Национальной стратегией устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года и Концепцией программы социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года ставится задача увеличить вклад туризма в ВВП до 4,2 % к 2030 году и 5,0 % к 2040 году.

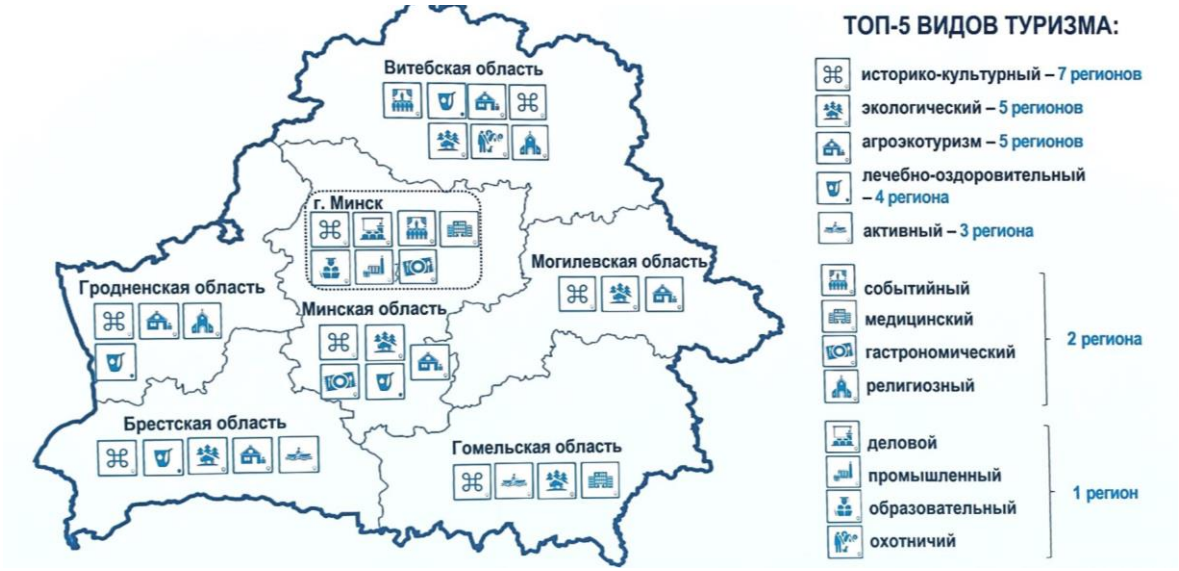


Рисунок 2 – Специализация регионов Республики Беларусь по видам туризма [12]

Национальной стратегией устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года и Концепцией программы социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года ставится задача увеличить вклад туризма в ВВП до 4,2 % к 2030 году и 5,0 % к 2040 году.

Это потребует кратного увеличения туристических потоков: въездного – в 1,6 раза к 2030 году и 2,5 раза – к 2040 году, внутреннего – в 1,3 и 1,7 раза, соответственно; создания соответствующей инфраструктуры гостеприимства – увеличения единовременной вместимости и модернизации всех средств размещения, включая коллективные, индивидуальные и агроусадьбы, на 20 % к уровню 2030 г. и более чем в 1,5 раза – к 2040 г. при одновремнном доведении их загрузки до 60 % в год [14].

В 2024 году функционировало 618 гостиниц вместимостью 39 тыс. мест, в которых было размещено более 2,5 млн человек, из них 1,2 млн иностранных граждан, среднегодовой коэффициент загрузки составил 37,3 % (самый высокий показатель загрузки гостиниц с 2016 года) [14].

В рамках государственной программы «Беларусь гостеприимная» на 2021–2025 годы, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 29 января 2021 г. № 58, построено и реконструировано 39 объектов туристической инфраструктуры. На реализацию программы привлечены из внебюджетных источников более 244 млн рублей, затраты из бюджета составили 4 %.

Туристическим брендом и источником экспортных поступлений (до 50 %) от общего объема являются санаторно-курортные учреждения. Функционируют 75 санаториев на 20 тыс. мест. В 2024 году средняя заполняемость здравниц составила 84,3 %.

Перспективными регионами для строительства новых санаториев являются Могилевская и Витебская области, а также природоохранные и туристско-рекреационные районы страны (Каменецкий, Пружанский, Браславский, Логойский, Мядельский) (рисунок 3).

В части развития транспортно-логистической инфраструктуры идут работы по улучшению логистических возможностей прибытия туристов из государств-членов ЕАЭС воздушным транспортом и восстановлению железнодорожного сообщения, в том числе с учетом реализации совместных евразийских туристических маршрутов.

Основными проблемами, препятствующими развитию туризма, являются:

– «недостаточный уровень развития туристической и транспортно-логистической инфраструктуры» (в частности, существует потребность в улучшении логистики прибытия туристов из государств – участников СНГ авиатранспортом и восстановлении железнодорожного сообщения, в проекте Великий Шелковый путь) [15];

– низкая инвестиционная активность в сфере туризма;

– недостаточное финансирование маркетинговых мероприятий в туризме.

Мерой по устранению проблем является реализация четырех подпрограмм: развитие объектов туристической индустрии (создание разнообразной и качественной туристической инфраструктуры, включая строительство новых и модернизацию существующих средств размещения); развитие национального туризма (демонстрация привлекательности Беларуси как полноценного туристического направления для граждан страны и иностранных граждан); маркетинг туристических услуг (продвижение туристического потенциала страны на внутреннем и внешних туристических рынках); цифровой туризм (создание цифровой среды, позволяющей повысить качество и доступность туристических услуг) [16, 17].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-258-264

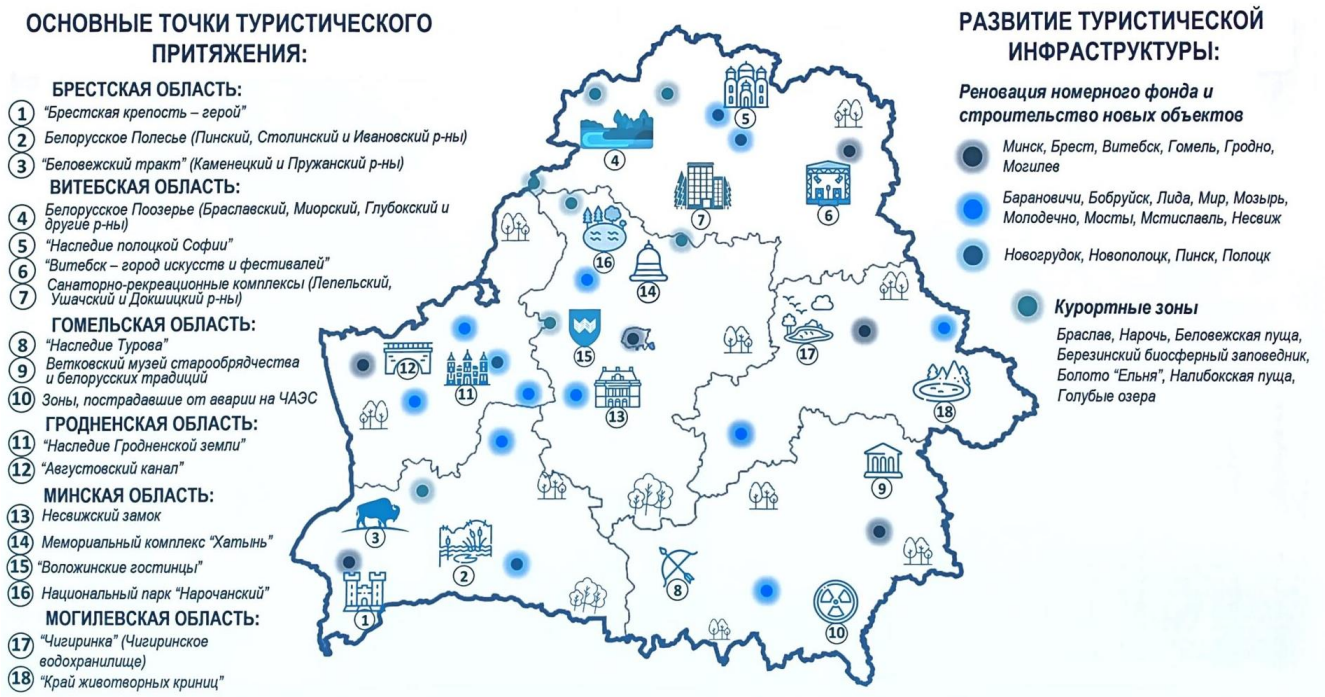


Рисунок 3 – Направления развития туризма по регионам [12]

Трансграничный туризм

Инструментом сохранения и популяризации природного и культурно-исторического потенциала приграничных регионов, а также повышения предпринимательской деятельности выступает построение маршрутов трансграничного туризма.

Развитие туристического потенциала государств-членов, увеличение взаимного туристического потока, повышение конкурентоспособности туристического сектора и продвижение туристических продуктов государств-членов в рамках ЕАЭС (Союз) осуществляются государствами-членами совместно с Евразийской экономической комиссией посредством проведения соответствующих мероприятий по развитию экономического сотрудничества государств-членов в сфере туризма [16, 18].

Разработка и развитие совместных евразийских туристических маршрутов:

– создание новых трансграничных маршрутов и актуализация действующих туристических маршрутов;

– актуализация информации о туристических маршрутах и объектах на информационном портале Союза;

– взаимодействие и обмен опытом но вопросам развития отдельных видов туризма (экологического, культурно-познавательного, горнолыжного и др.).

Создание условий для увеличения туристического потока между государствами-членами и привлечения туристических групп путем:

– взаимодействия по вопросам применения стандартов предоставления туристических услуг в государствах-членах;

– содействия углублению взаимодействия туристических ассоциаций и операторов, в том числе в части подготовки совместных туристических продуктов, взаимного информирования о возможностях применения соответствующих мер стимулирования спроса потребителей туристических услуг (включая специальные предложения и скидки при заинтересованности туристических операторов), особенно в низкий сезон.

Развитие цифровых технологий в сфере туризма посредством:

- разработки и обеспечения функционирования на информационном портале Союза тематического раздела о туризме, содержащего в том числе информацию о туристических маршрутах и туристических объектах, а также о проводимых в государствах-членах мероприятиях, представляющих интерес для туристов и (или) профессионального сообщества;
- сотрудничества и обмена опытом по вопросам внедрения цифровых платформенных решений в сфере туризма;
- расширение административного сотрудничества уполномоченных органов государств-членов в сфере туризма, в том числе взаимодействие государств-членов в области правового регулирования сферы туризма и обмен информацией о развитии законодательства в области туризма в государствах-членах.

Для развития материальной базы трансграничного туризма в республике требуется увеличение на 30 % номерного фонда гостиниц и аналогичных средств размещения, рост на 30 % номерного фонда санаториев и оздоровительных организаций для крупнейших собственников, льготное долгосрочное кредитование в рамках специальных кредитных продуктов [14]. Запланировано 26 инвестиционных проектов, а также разработка туристических схем территориально-пространственного планирования и концепции цифровой трансформации сферы туризма.

Так, в Витебской области действует белорусско-российский международный туристический маршрут «Дорогами «Катюши» (г. Орша – Рудня (Смоленская обл.) – г. Смоленск – д. Соловьево – г. Вязьма). Особой популярностью среди детей и молодежи пользуются следующие проекты: марафоны «Автопоезд памяти: «Беларусь непокоренная», «Сестры Хатыни», творческий экспресс «Арт-панорама», железнодорожный круиз «Поезд памяти» с посещением Бреста и Мемориального комплекса «Брестская крепость-герой», который ежегодно принимает более 70 тыс. россиян. Прорабатывается трансграничный туристический тур по территории Республики Беларусь и России. Во время трансграничного тура можно будет посетить Минск, Полоцк, Псков, Витебск, Смоленск и Могилев. Для передвижения между городами рассматривают как автобусы, так и поезда.

Оценка туристской инфраструктуры

Важное методологическое значение имеет оценка развития туристской инфраструктуры. Условно можно выделить два подхода к оценке развития туристской инфраструктуры (таблица 1).

Под инфраструктурой туризма понимается комплекс вспомогательных отраслей, обеспечивающих деятельность индустрии туризма [19]. В неё входит: совокупность гостиниц и иных средств размещения, средств транспорта, объектов общественного питания, средств развлечения смежных индустрии туризма предприятий, обеспечивающих нормальный доступ туристов к туристским ресурсам.

В инфраструктуре выделяется два элемента:

– индустрия гостеприимства, куда следует отнести предприятия, предоставляющие услуги по размещению и питанию;

– инфраструктурная составляющая туризма, которая представляет из себя трехуровневую систему (таблица 2).

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-258-264

Таблица 1 – Подходы к оценке развития туристской инфраструктуры

Подход	Возможности	Недостатки
1	2	3
Оценка через совокупность элементов	Проведение интеграционного экономико-географического анализа развития, но без снижения значимости отдельных элементов. Выделение наиболее слабо развитых мест	Нечеткое определение значимости системы тех показателей внутри каждой группы инфраструктурных элементов. Охватка неполного компонентного состава
Анализ объектов	Осуществление годового и оперативного планирования на предприятиях инфраструктуры туризма. Выполнение стратегического бизнес-планирования	Система статистических показателей не дает возможности проведения их на региональном уровне

Таблица 2 – Уровни инфраструктурной составляющей

Уровень	Характеристика структуры	Пример
1	2	3
Первый	Производственная инфраструктура, обеспечивающая материальное производство	Комплекс действующих сооружений, транспорт, связь, коммунальное хозяйство, финансы и т. д.
Второй	Структуры, которые могут существовать без туристов, но деятельность которых разрастается при нахождении в местах пребывания туристов	Предприятия по прокату автомобилей, таксопарки, кафе и рестораны, социально-культурный сервис, придорожный сервис и т. д.
Третий	Информационная инфраструктура, научная инфраструктура, учебная инфраструктура, предприятия по производству товаров туристского спроса	Информационные системы управления, сетевые СМИ, информационные агентства, инновационные разработки на основе ИКТ и т. д.

Наиболее качественную оценку туристской инфраструктуры отражает индекс развития туристской инфраструктуры региона, количественно характеризующего уровень ее развития и представляющего собой среднее арифметическое индексов девяти входящих в него блоков. После адаптации подхода А. В. Величкиной [20] предложено рассчитывать интегрированный индекс, включающий индивидуальные параметры состояния структурных элементов туристской инфраструктуры региона по следующим показателям.

1. Транспорт (I_1):

– обеспеченность населения легковыми автомобилями на 1000 чел. населения;

– объем транспортных услуг, оказанных населению, в расчете на одного жителя.

2. Информационно-коммуникационная инфраструктура (I_2):

– число зарегистрированных абонентских терминалов сотовой связи;

– охват населения теле- и радиовещанием;

– удельный вес организаций, использующих средства ИКТ, в общем числе обследованных организаций;

– число персональных компьютеров на 100 работников.

3. Охрана окружающей среды (I_3):

– объем совокупных расходов на охрану окружающей среды.

4. Туроператоры и турагенты (I_4):

– число организаций, осуществляющих туристическую деятельность;

– численность туристов и экскурсантов, отправленных по маршрутам тура в пределах территории Республики Беларусь, тыс. человек.

5. Средства размещения (I_5):

– число коллективных средств размещения (КСР);

– число мест в КСР;

– численность размещенных лиц, тыс. человек;

– санаторно-курортных, оздоровительных организаций и других специализированных средств размещения.

6. Предприятия отдыха и развлечения (I_6):

– число социально-культурных инфраструктур;

– численность зрителей театров на 1000 чел. населения;

– число посещений музеев на 1000 чел. населения;

– объем платных услуг населения в области искусства, развлечений и отдыха.

7. Предприятия общественного питания (I_7):

– количество мест в объектах общественного питания на 10 000 чел. населения;

– количество предприятий общественного питания.

8. Торговля (I_8):

– оптовый товарооборот;

– индекс физического объема оптового товарооборота.

9. Безопасность (I_9):

– число зарегистрированных преступлений на 100 000 чел. населения;

– число ДТП.

Показатели представляются в виде нормализованных данных при помощи соотнесения фактических значений с наилучшими в выборке

$$\text{НД}_m = \begin{cases} \dfrac{1000 * З_m}{З_m^{max}}, & \text{для прямых показателей} \\ 1000 - \dfrac{1000 * З_m}{З_m^{max}}, & \text{для обратных показателей} \end{cases}$$

где $З_m$ – фактическое значение показателя;

$З_m^{max}$ – наилучшее значение показателя в выборке.

Затем индексы отдельных блоков рассчитываются как среднее арифметическое величин нормализованных показателей.

Значение индекса лежит в интервале от 0 до 1000. Чем больше показатель, тем выше уровень развития инфраструктуры туризма в регионе. Границы интервалов групп формируются в зависимости от среднего значения рассматриваемого индекса (таблица 3).

Таблица 3 – Интерпретация пороговых значений интегральной оценки уровня развития туристской инфраструктуры

№ группы	Граница интервала		Уровень туристского потенциала
	Нижняя граница	Верхняя граница	
1	2	3	4
1	$\bar{I} - \frac{I_{max}}{2N} - \frac{4I_{max}}{N}$	$\bar{I} - \frac{I_{max}}{2N} - \frac{3I_{max}}{N}$	Очень низкий
2	$\bar{I} - \frac{I_{max}}{2N} - \frac{3I_{max}}{N}$	$\bar{I} - \frac{I_{max}}{2N} - \frac{2I_{max}}{N}$	Низкий
3	$\bar{I} - \frac{I_{max}}{2N} - \frac{2I_{max}}{N}$	$\bar{I} - \frac{I_{max}}{2N}$	Ниже среднего
4	$\bar{I} - \frac{I_{max}}{2N}$	$\bar{I} + \frac{I_{max}}{2N}$	Средний
5	$\bar{I} + \frac{I_{max}}{2N}$	$\bar{I} + \frac{I_{max}}{2N} + \frac{I_{max}}{N}$	Выше среднего
6	$\bar{I} + \frac{I_{max}}{2N} + \frac{I_{max}}{N}$	$\bar{I} + \frac{I_{max}}{2N} + \frac{2I_{max}}{N}$	Высокий

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-258-264

где I_{max} – максимальное значение индекса развития туристской инфраструктуры, равное 1000;

$\bar{I}$ – среднее значение индекса развития туристской инфраструктуры;

N – число групп по уровню развития туристской инфраструктуры.

Использование методики дает возможность:

– оценить состояние и уровень развития туристской инфраструктуры отдельно взятого региона в сравнении с другими субъектами страны;

– анализировать состояние каждого элемента туристской инфраструктуры, выявляя сильные и слабые стороны инфраструктурного развития;

– соотносить уровень развития туристской инфраструктуры с целевыми показателями долгосрочного планирования в сфере туризма на данной территории;

– на основе выявленных проблем формировать направления развития туристской инфраструктуры региона.

Рассчитаем уровень развития туристской инфраструктуры для областей Республики Беларусь исходя из данных Национального статистического комитета Республики Беларусь за 2024 год (таблица 4).

Таблица 4 – Индекс туристской инфраструктуры областей Республики Беларусь

Область	Брестская	Витебская	Гомельская	Гродненская	Минская	Могилевская
I	953,64	838,44	604,80	1117,60	1031,28	1032,0

Согласно расчетам, среднее значение индекса туристской инфраструктуры составляет – 929,63. Результаты исследования позволили распределить области Республики Беларусь по уровню развития в них инфраструктуры туризма.

Высокий уровень развития инфраструктуры туризма зафиксирован в Гродненской области, занимающем лидирующее положение по большинству составляющих индекса. В Минской, Могилевской областях уровень инфраструктурного развития выше среднего, что объясняется ростом значений показателей социально-культурных инфраструктур, предприятий общественного питания и транспорта.

Средний уровень развития туристской инфраструктуры выявлен в Брестской и Витебской областях. Уровень туристской инфраструктуры ниже среднего отмечается в Гомельской области, что обусловлено низкими показателями по многим составляющим индекса.

Эффективное позиционирование Республики Беларусь на международном туристическом рынке через разработку и реализацию кросс-маркетинговой стратегии с соседними странами по продвижению общего туристического продукта, активное вовлечение Беларуси в трансграничные маршруты; активное взаимодействие, совместное продвижение и повышение конкурентоспособности туристического продукта в рамках интеграционных образований (Союзное государство, ЕАЭС, СНГ, инициатива ”Один пояс – один путь“).

Список цитированных источников

1. Винокуров, М. А. Что такое туризм? / М. А. Винокуров // Известия БГУ. – 2004. – № 3. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/chto-takoe-turizm (дата обращения: 03.01.2026).
2. Быстров, С. А. Туризм: макроэкономика и микроэкономика / С. А. Быстров, М. Г. Воронцова. – СПб. : Издательский дом «Герда», 2007. – 149 с.
3. Ступина, О. Г. Туризм и государственные границы / О. Г. Ступина // Псковский регионологический журнал. – 2010. – № 10. – С. 100–107.
4. Александрова, А. Ю. Роль и влияние границы, пограничности и трансграничности в развитии туризма: стратегические инициативы и партнерство / А. Ю. Александрова // Устойчивое развитие туризма: стратегические инициативы и партнерство : материалы III-й междунар. науч.-практ. конф. – Улан-Удэ : БНЦ СО РАН, 2009. – С. 56–66.
5. Gelbman, A. У. Border complexity, tourism and international enclaves: a case study / A. У. Gelbman, D. J. Timothy // Annals of Tourism Research. – 2011. – Vol. 38 (1). – P. 110–131.
6. Кононов, А. Ю. Трансграничность как фактор развития туризма / А. Ю. Кононов, П. В. Шадрин // Креативная экономика. – 2025. – Т. 19, № 10. – С. 2557–2584. – DOI: 10.18334/ce.19.10.124009.
7. Ступина, О. Г. Туризм и государственные границы / О. Г. Ступина // Псковский регионологический журнал. – 2010. – № 10. – С. 100–107.
8. Тарасенок, А. И. Оценка конкурентоспособности национальной туристической дестинации Республики Беларусь / А. И. Тарасенок // Белорусский экономический журнал. – 2018. – № 2. – С. 139–151.
9. Тарасенок, А. И. Геоэкономика туризма: учебное пособие / А. И. Тарасёнок. – Минск : РИВШ, 2023. – 360 с.
10. Зазерская, В. В. Внешнеэкономическая деятельность регионов Республики Беларусь в условиях трансграничного сотрудничества / В. В. Зазерская // Тенденции развития науки, образования и экономики в эпоху цифровизации. – 2022. – С. 91–94.
11. Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на 2026–2030 годы. – URL: https://pravo.by/novosti/novosti-pravo-by/2025/december/91547 (дата обращения: 10.02.2026).
12. Волонцевич, Е. Туризм как экономический двигатель и вызовы новой пятилетки. – URL: https://rsti.by/o-nas/novosti/elena-volontsevich-turizm-kak-ekonomicheskiy-dvigatel-i-vyzovy-novoy-pyatiletki (дата обращения: 14.02.2026).
13. Портрет современного туризма Беларуси. – URL: https://niei.by/ru/novosti-nauchnoi-zhizni-ru/view/portret-sovremennogo-turizma-belarusi-534 (дата обращения: 14.02.2026).
14. Портрет современного туризма. – URL: https://niei.by/uploads/files/Analitica/Portret-sovremennogo-turizma-Belarusi.pdf (дата обращения: 14.02.2026).
15. О Государственной программе "Туризм" на 2026–2030 годы : постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30 дек. 2025 г. № 797. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=C2250079 (дата обращения: 14.02.2026).
16. О Концепции развития туризма в рамках Евразийского экономического союза : решение Высшего Евразийского экономического совета от 21 декабря 2025 г. № 19. – URL: https://pravo.by/novosti/obshchestvenno-politicheskie-i-v-oblasti-prava/2025/december/91695 (дата обращения: 20.01.2026).
17. Национальная стратегия развития туризма в Республике Беларусь до 2035 года. – URL: https://belarustourism.by/news/НАЦИОНАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ.pdf (дата обращения: 20.01.2026).
18. Зазерская, В. В. Развитие цифровой экономики в странах Евразийского экономического союза: формирование институциональной среды интеграционных объединений / В. В. Зазерская // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 2 (131). – С. 150–154. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-131-2-150-154.
19. Платов, А. В. Туристская инфраструктура как основа устойчивого развития дестинаций / А. В. Платов, О. И. Литвинова // Научный результат. Технологии бизнеса и сервиса. – 2022. – № 2. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/turistskaya-infrastruktura-kak-osnova-ustoychivogo-razvitiya-destinatsiy (дата обращения: 03.03.2026).
20. Величкина, А. В. Оценка развития туристской инфраструктуры региона / А. В. Величкина // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2014. – № 2 (32). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-razvitiya-turistskoy-infrastruktury-regiona (дата обращения: 12.01.2026).

References

1. Vinokurov, M. A. CHto takoe turizm? / M. A. Vinokurov // Izvestiya BGU. – 2004. – № 3. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/chto-takoe-turizm (data obrashcheniya: 03.01.2026).
2. Bystrov, S. A. Turizm: makroekonomika i mikroekonomika / S. A. Bystrov, M. G. Voroncova. – SPb. : Izdatel'skij dom «Gerda», 2007. – 149 s.
3. Stupina, O. G. Turizm i gosudarstvennye granicy / O. G. Stupina // Pskovskij regionologicheskij zhurnal. – 2010. – № 10. – S. 100–107.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-258-264

4. Aleksandrova, A. YU. Rol' i vliyanie granicy, pogranichnosti i transgranichnosti v razvitii turizma: strategicheskie iniciativy i partnerstvo / A. YU. Aleksandrova // Ustojchivoe razvitie turizma: strategicheskie iniciativy i partnerstvo : materialy III-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – Ulan-Ude : BNC SO RAN, 2009. – S. 56–66.
5. Gelbman, A. U. Border complexity, tourism and international enclaves: a case study / A. U. Gelbman, D. J. Timothy // Annals of Tourism Research. – 2011. – Vol. 38 (1). – P. 110–131.
6. Kononov, A. YU. Transgranichnost' kak faktor razvitiya turizma / A. YU. Kononov, P. V. SHadrin // Kreativnaya ekonomika. – 2025. – T. 19, № 10. – S. 2557–2584. – DOI: 10.18334/ce.19.10.124009.
7. Stupina, O. G. Turizm i gosudarstvennye granicy / O. G. Stupina // Pskovskij regionologicheskij zhurnal. – 2010. – № 10. – S. 100–107.
8. Tarasenok, A. I. Ocenka konkurentosposobnosti nacional'noj turisticheskoj destinacii Respubliki Belarus' / A. I. Tarasenok // Belorusskij ekonomicheskij zhurnal. – 2018. – № 2. – S. 139–151.
9. Tarasenok, A. I. Geoekonomika turizma: uchebnoe posobie / A. I. Tarasyonok. – Minsk : RIVSH, 2023. – 360 s.
10. Zazerskaya, V. V. Vneshneekonomicheskaya deyatel'nost' regionov Respubliki Belarus' v usloviyah transgranichnogo sotrudnichestva / V. V. Zazerskaya // Tendencii razvitiya nauki, obrazovaniya i ekonomiki v epohu cifrovizacii. – 2022. – S. 91–94.
11. Programma social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na 2026–2030 gody. – URL: https://pravo.by/novosti/novosti-pravo-by/2025/december/91547 (data obrashcheniya: 10.02.2026).
12. Voloncevich, E. Turizm kak ekonomicheskij dvigatel' i vyzovy novoj pyatiletki. – URL: https://rsti.by/o-nas/novosti/elena-volontsevich-turizm-kak-ekonomicheskiy-dvigatel-i-vyzovy-novoy-pyatiletki (data obrashcheniya: 14.02.2026).
13. Portret sovremennogo turizma Belarusi. – URL: https://niei.by/ru/novosti-nauchnoi-zhizni-ru/view/portret-sovremennogo-turizma-belarusi-534 (data obrashcheniya: 14.02.2026).
14. Portret sovremennogo turizma. – URL: https://niei.by/uploads/files/Analitica/Portret-sovremennogo-turizma-Belarusi.pdf (data obrashcheniya: 14.02.2026).
15. O Gosudarstvennoj programme "Turizm" na 2026–2030 gody : postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 30 dek. 2025 g. № 797. – URL: https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=C2250079 (data obrashcheniya: 14.02.2026).
16. O Koncepcii razvitiya turizma v ramkah Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza : reshenie Vysshego Evrazijskogo ekonomicheskogo soveta ot 21 dekabrya 2025 g. № 19. – URL: https://pravo.by/novosti/obshchestvenno-politicheskie-i-v-oblasti-prava/2025/december/91695 (data obrashcheniya: 20.01.2026).
17. Nacional'naya strategiya razvitiya turizma v Respublike Belarus' do 2035 goda. – URL: https://belarustourism.by/news/NACIONAL'NAYA STRATEGIYA.pdf (data obrashcheniya: 20.01.2026).
18. Zazerskaya, V. V. Razvitie cifrovoj ekonomiki v stranah Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza: formirovanie institucional'noj sredy integracionnyh ob"edinenij / V. V. Zazerskaya // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2023. – № 2 (131). – S. 150–154. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-131-2-150-154.
19. Platov, A. V. Turistskaya infrastruktura kak osnova ustojchivogo razvitiya destinacij / A. V. Platov, O. I. Litvinova // Nauchnyj rezul'tat. Tekhnologii biznesa i servisa. – 2022. – № 2. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/turistskaya-infrastruktura-kak-osnova-ustoychivogo-razvitiya-destinatsiy (data obrashcheniya: 03.03.2026).
20. Velichkina, A. V. Ocenka razvitiya turistskoj infrastruktury regiona / A. V. Velichkina // Ekonomicheskie i social'nye peremeny: fakty, tendencii, prognoz. – 2014. – № 2 (32). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-razvitiya-turistskoy-infrastruktury-regiona (data obrashcheniya: 12.01.2026).

Материал поступил 03.03.2026, одобрен 06.03.2026, принят к публикации 06.03.2026

УДК 339.138:316.42

КОНЦЕПЦИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО БРЕНДИНГА В СИСТЕМЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ РЕГИОНА

С. Ф. Куган[1], О. Ю. Осташко[2]

[1] Д. э. н., доцент, начальник управления подготовки научных кадров высшей квалификации УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь, e-mail: sfkugan@mail.ru

[2] Аспирант 4-го года обучения кафедры экономической теории и маркетинга, УО «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь, e-mail: ostashko@belstu.by

Реферат

В статье рассматривается бренд территории как интегративный инструмент стратегического управления социально-экономическим развитием региона. Обоснована необходимость включения бренда территории в систему стратегического планирования в условиях усиления межрегиональной конкуренции за ресурсы, инвестиции и человеческий капитал. Проанализированы теоретико-методологические подходы к определению сущности бренда территории, выявлена его социально-экономическая природа и роль в системе взаимодействия ключевых стейкхолдеров региона. Особое внимание уделено обоснованию дифференцированного подхода к формированию и развитию территориального бренда с учетом интересов населения, бизнеса, инвесторов, туристов и органов власти.

В работе предложена концептуальная модель интеграции бренда территории в систему социально-экономического развития региона, основанная на синтезе маркетингового, ресурсно-ориентированного и стейкхолдерского подходов, а также принципах устойчивого развития. Раскрыта логика построения модели, включающей аналитический, проектный и корректирующий блоки, функционирующие в формате замкнутого управленческого цикла с элементами стратегической адаптации. Подчеркнута роль SWOT-анализа, формулирования миссии и стратегических приоритетов территории как основы бренд-платформы. Обоснована целесообразность использования принципа «двойной петли обучения», обеспечивающего возможность как операционной корректировки инструментов продвижения, так и стратегического пересмотра базовых установок развития бренда в условиях изменяющейся внешней среды.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования предложенной модели органами регионального управления при разработке и реализации стратегий социально-экономического развития территорий, а также в совершенствовании механизмов координации взаимодействия стейкхолдеров и оценки эффективности брендинговых инициатив. Статья отличается логичной структурой, теоретической обоснованностью выводов и методологической целостностью. Полученные результаты обладают научной новизной и могут быть использованы в дальнейших исследованиях проблем территориального маркетинга и стратегического управления регионами.

Ключевые слова: территориальный брендинг, бренд территории, социально-экономическое развитие региона, стратегическое планирование, региональный маркетинг, стейкхолдеры территории, устойчивое развитие, управление регионом.

THE CONCEPT OF TERRITORIAL BRANDING IN THE SYSTEM SOCIO-ECONOMIC MANAGEMENT AND DEVELOPMENT OF THE REGION

S. F. Kugan, O. Yu. Ostashko

Abstract

The article considers the brand of the territory as an integrative tool for strategic management of the socio-economic development of the region. The necessity of including the territory's brand in the strategic planning system is substantiated in the context of increased interregional competition for resources, investments and human capital. The theoretical and methodological approaches to determining the essence of the brand of the territory are analyzed, its socio-economic nature and role in the system of interaction of key stakeholders of the region are revealed. Special attention is paid to substantiating a differentiated approach to the formation and development of a territorial brand, taking into account the interests of the population, business, investors, tourists and authorities.

The paper proposes a conceptual model for integrating the territory's brand into the socio-economic development system of the region, based on a synthesis of marketing, resource-based and stakeholder approaches, as well as the principles of sustainable development. The logic of building a model that includes analytical, design and corrective blocks operating in a closed management cycle format with elements of strategic adaptation is revealed. The role of SWOT analysis, formulation of the mission and strategic priorities of the territory as the basis of the brand platform is emphasized. The expediency of using the "double learning loop" principle is substantiated, which provides the opportunity for both operational adjustments of promotion tools and a strategic revision of the basic brand development guidelines in a changing external environment.

The practical significance of the study lies in the possibility of using the proposed model by regional governments in the development and implementation of strategies for the socio-economic development of territories, as well as in improving mechanisms for coordinating stakeholder engagement and evaluating the effectiveness of branding initiatives. The article is distinguished by its logical structure, theoretical validity of conclusions and methodological integrity. The results obtained have scientific novelty and can be used in further research on the problems of territorial marketing and strategic management of regions.

Keywords: territorial branding, brand of the territory, socio-economic development of the region, strategic planning, regional marketing, stakeholders of the territory, sustainable development, regional management.

Введение

Процесс управления социально-экономическим развитием (далее – СЭР) территорий сегодня невозможен без стратегического планирования. Оно предполагает анализ стратегического потенциала, формирование стратегического плана развития, а также выбор приоритетной стратегии социально-экономического развития территориального образования.

Одним из базовых документов стратегического развития в Республике Беларусь является Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на 2026–2030 годы, утвержденной

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-265-269

решением Всебелорусского народного собрания от 25 апреля 2024 г. № 5 [1]. В числе приоритетов данной программы обозначены формирование качественной среды для жизни, развитие сильных регионов и реализация туристического потенциала, что объективно актуализирует задачи развития маркетинга и брендинга территорий [1].

Развитие регионов находится в прямой зависимости с качеством формирования системы стратегического планирования в стране, в методологическую основу которой постепенно закладываются принципы программно-целевого управления. Это подтверждается активно формирующейся нормативно-правовой базой в стране в области стратегического планирования.

На региональном уровне в Республике Беларусь определены два основных документа государственного планирования среднесрочного и краткосрочного временного периода (таблица 1).

Таблица 1 – Документы системы государственного планирования на региональном уровне в Республике Беларусь

Период	Наименование документа государственного планирования	Порядок утверждения
Долгосрочный	Программа социально-экономического развития Республики Беларусь Региональные стратегии устойчивого развития Республики Беларусь до 2040 года	Утверждаются ВНС, Советом Министров Республики Беларусь
Среднесрочный 3–5 лет	Программы социально- экономического развития административно-территориальных единиц областного и базового территориальных уровней	Утверждаются соответствующими местными Советами депутатов
Краткосрочный Ежегодно	Планы развития административно- территориальных единиц областного и базового территориальных уровней	Утверждаются соответствующими местными исполнительными и распорядительными органами

Как видно из таблицы 1, отдельными документами, определяющими направления развития административно-территориальных единиц областного и базового территориальных уровней Республики Беларусь, являются программа социально-экономического развития территориальной единицы и разработанный на ее основе план развития административно-территориальной единицы.

О значимости данного вектора и нахождении его на постоянном контроле Президента Республики Беларусь А. Г. Лукашенко свидетельствуют как проводимые на высшем государственном уровне совещания по вопросам регионального развития, так и частота посещений регионов Главой государства, в том числе отдаленных районных центров.

Несмотря на наличие институциональных основ стратегического управления, характер современного социально-экономического развития регионов свидетельствует о необходимости поиска дополнительных механизмов повышения их конкурентоспособности. В этой связи территориальный брендинг следует рассматривать не только как инструмент имиджевого продвижения, но и как элемент системы стратегического управления, способствующий устойчивому развитию территорий [2].

Основная часть. Теоретико-методологические основы и концептуальная модель интеграции территориального брендинга в систему социально-экономического развития региона

Значительный вклад в формирование концептуальных положений, раскрывающих сущность социально-экономического развития территорий на основе маркетинга территорий, внесли такие постсоветские и зарубежные исследователи, как Е. А. Атаманова [3], Л. В. Балабанова [4], В. И. Беляев [5], И. С. Важенина [6] Ф. Котлер [7, 8], А. Динис [9], В. Жирард [10] и др.

Однако исследованию методологии брендинга территорий в системе социально-экономического развития региона уделено недостаточно внимания. Хотя сегодня, в большинстве случаев, формирование концепции управления социально-экономическим развитием территорий направлено на создание и поддержание ее привлекательности, с одной стороны, а также привлекательности и конкурентоспособности воспроизводства, сосредоточенных на данной территории, с другой стороны, базируется на концепции брендинга территории.

В данном контексте брендинг территории (региона, города, места) стоит рассматривать как управленческий процесс по созданию, планированию и продвижению уникальных особенностей территории с целью достижения в перспективе определенного социального и экономического эффекта.

Д. В. Визгалов считает, что бренд территории – это роль, которую играет территория; социальный проект, который содержит эмоциональные составляющие (впечатление о территории и доверие к ней; симпатия к ее жителям и уважение их ценностей) [11].

Т. Е. Исаченко и Е. А. Постникова определяют бренд территории как многомерный конструкт, включающий функциональные материальные и эмоциональные элементы, которые в совокупности создают уникальный набор ассоциаций с местом в общественном сознании [12].

О. Т. Ергунова и Р. Т. Тимакова считают, что бренд территории – это инструмент системы управления региональным развитием, который представляет собой совокупность функциональных, эмоциональных, психологических и социальных восприятий потребителя, материальных элементов, повышающих конкурентоспособность территории, и, соответственно, способствующих увеличению прибыли предпринимательских структур [13].

Т. А. Атаева определяет бренд территории как важный фактор продвижения территории, который опирается на ее политический, экономический, социокультурный потенциал и природные и рекреационные ресурсы, а также бренды товаров и услуг, локализованные в рельеф определенной географической зоны [14].

Общим в приведенных определениях является выраженная социальная сторона территориального бренда (ценности, эмоции, впечатления), основанная на экономическом потенциале, миссии и целях развития территории, которая должна находить отклик как у внутренней, так и у внешней аудитории.

Большинство исследователей соглашаются с тем, что бренд территории находится под влиянием разных целевых групп, что диктует необходимость селективного развития бренда для каждой конкретной аудитории. Поэтому, чтобы избежать потери части стоимости бренда, подчеркивает К. Динни, власти нуждаются в проведении стратегического анализа основных трендов социального и экономического окружения; определении территории, где сосредоточены возможности, навыки, ресурсы и способности регионов; выяснении, какие ключевые ценности, подходы, принципы и характеристики позволили им достичь этого. Затем следует подумать, как все это скомбинировать, чтобы создать дифференцированное обращение к каждой целевой аудитории. По результатам такого анализа разрабатывается интегрированная бренд-платформа, и на ее основе создается интегрированная коммуникационная стратегия бренда и план ее реализации [15].

В работе обоснована целесообразность классификации целевых аудиторий по критериям территориальной принадлежности и функциональной роли, включая население региона, туристов, инвесторов, предпринимателей и органы власти. Различие интересов данных групп обусловливает необходимость дифференцированного подхода к формированию и управлению территориальным брендом, таблица 2.

В данной связи территориальный брендинг в системе социально-экономического развития региона следует рассматривать не только как инструмент имиджевого продвижения, а как интегративный механизм стратегического управления, обеспечивающий демонстрации целей, приоритетов и результатов СЭР во внешнюю и внутреннюю среду.

Концептуальная модель интеграции территориального бренда в систему СЭР региона представлена на рисунке.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-265-269

Таблица 2 – Важность интеграции брендинга территории в стратегию СЭР на основе взаимодействия со стейкхолдерами

Стейкхолдеры территории	Прямые эффекты	Косвенные эффекты
Население	– рост информированности населения; – рост активности и вовлеченности населения в продвижение города; – рост числа волонтеров; – рост удовлетворенности населения; – рост лояльности населения городу; – экономия на продвижении бренда	– рост информированности населения других городов, регионов и стран за счет интернета; – приток туристов (внутренних и внешних); – повышение привлекательности города на фоне менее развитых городов
Местные предприниматели	– рост доходов местного бизнеса; – рост экспорта из города; – рост доверия со стороны бизнеса правительству	– рост налогов от местного бизнеса; – рост числа рабочих мест; – рост инвестиций в местный бизнес
Органы власти	– рост налоговых поступлений в бюджет; – рост стоимости активов города	– упорядочивание деятельности по формированию и развитию бренда; – рост имиджа и доверия к администрации; – рост ВРП; – рост ИРЧП
Туристы	– рост числа туристов; – рост узнаваемости бренда города; – рост удовлетворенности туристов; – рост расходов туристов за счет лучшей информированности	– рост доходов от туризма; – рост числа рабочих мест; – рост налогов от туризма
Инвесторы	– рост числа инвесторов; – рост объема инвестиций; – рост информированности потенциальных инвесторов; – рост доверия и узнаваемости бренда города и т. п.	– рост ВРП; – рост числа рабочих мест; – рост налогов; – рост благосостояния населения и т. п.

Примечание – Источник: собственная разработка.

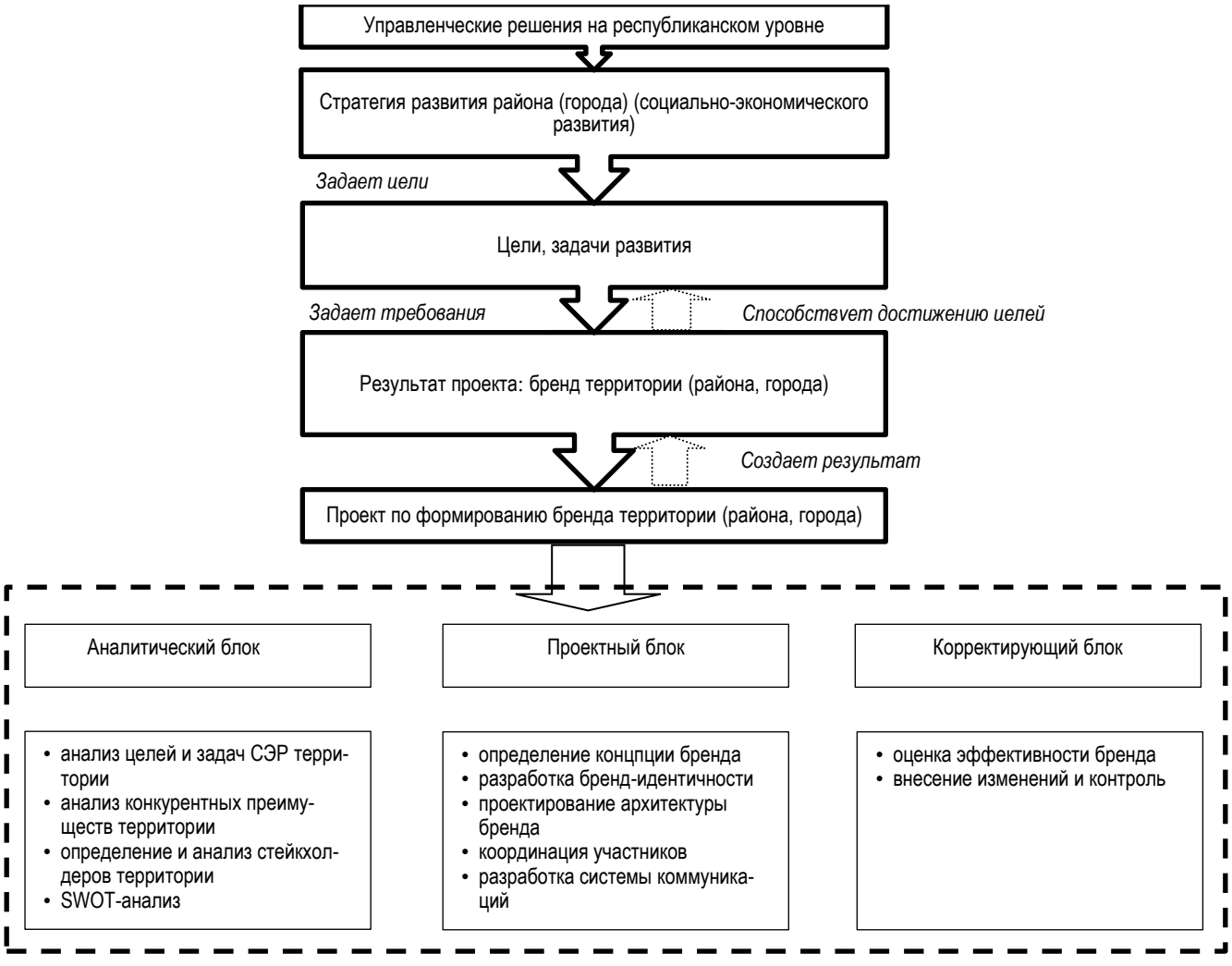


Рисунок 1 – Концептуальная модель интеграции территориального брендинга в систему СЭР региона

Примечание – Источник: собственная разработка.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-265-269

Теоретической основой модели выступает синтез современных концепций регионального развития, маркетинга и бренда территории. Она интегрирует принципы ресурсно-ориентированного подхода, стейкхолдерской теории и концепции устойчивого социально-экономического развития, маркетинга и брендинга, что позволяет рассматривать бренд как динамическую систему, находящуюся в постоянном взаимодействии с внутренней и внешней средой.

Особенностью модели является реализация принципа «двойной петли обучения», предполагающего не только операционную корректировку текущей стратегии в зависимости от цели и задач социально-экономического развития, но и стратегический пересмотр базовых установок брендинга в ответ на изменения среды [16].

Таким образом, структурно модель представляет собой взаимосвязанный комплекс ключевых блоков, образующих замкнутый цикл управления.

Аналитический блок включает всесторонний анализ социально-экономического развития территории, ее конкурентных преимуществ, определение и анализ потребностей стейкхолдеров.

Важным процессом исследования также является определение сильных и слабых сторон, возможностей и угроз по основным блокам социально- экономической системы региона (территориального образования) – SWOT-анализ.

Результаты SWOT-анализа могут лечь в основу не только определения конкурентных преимуществ региона и стратегической цели, но и формирования бренда территории: с их помощью происходит формулировка цели и задач конструирования бренда (решение возникающих проблем с помощью сильных сторон и возможностей).

Вторым этапом является определение стейкхолдеров территории (аналогия с первым этапом брендинга территории). Цель разработки стратегии развития любого региона заключается в поиске источников эффективности и повышения социально-экономического развития региона на основе роста материального благосостояния и всестороннего развития личности ее целевой аудитории [17].

Третьим этапом, согласно логике стратегии социально-экономического развития региона, является сценарий развития, то есть определение миссии (стратегической цели) и непосредственных направлений социально-экономического развития региона в рамках стратегического видения образа его будущего. В алгоритме брендинга территории данный пункт схож с этапом, на котором происходит формулировка идеи регионального бренда.

Анализируя программу социально-экономического развития территории можно выделить три основных составляющих элемента, необходимых для формирования бренда территории:

– миссия (стратегическая цель) развития города (территории);

– важные направления развития территории, сформулированные в виде целевых требований, удовлетворение которых обеспечивает достижение поставленной стратегической цели;

– стратегические действия – комплексы программных мероприятий и отдельные мероприятия, проекты, с помощью которых должны быть решены задачи, направленные на достижение стратегической цели в рамках стратегических направлений развития территории.

Пожалуй, последним источником информации, необходимой для формирования платформы территориального бренда являются такие блоки стратегии развития, как описание его характеристик, текущего социально-экономического положения, конкурентные преимущества, состояние и перспективы развития инфраструктуры, текущее состояние и перспективы развития базовых отраслей экономики, основное направление пространственного развития региона и т. д.

В этих блоках детально расписаны так называемые атрибуты позиционирования территории, или «магниты», а также их потенциал и способы развития.

На основе анализа формируется проектный блок, содержащий разработку бренд-идентичности, архитектуры бренда и системы коммуникаций. Эффективный региональный бренд должен иметь реальное основание, сущность, учитывающую не только привлекательные особенности и возможности территории, но и ее недостатки, а также встающие перед ней и ее администрацией угрозы. А. П. Жуков дает следующее определение сущности бренда (суть / ДНК / концепция бренда): «это его основная идея, задающая рамки, в которых он развивается» [18].

Что касается территориальных брендов, то их концепции поливариативны: в зависимости от конкретных целей социально-экономического развития территории, целевых аудиторий, слабых сторон и угроз в определенное время для региона выбирается определенная идея брендинга. Согласно второму и третьему закону Д. Германа [19] – закону сужения и закону распространения – бренд становится сильнее при сжимании центра внимания и фокусировке на узком сегменте, который составляет ядро бренда территории, настоящая сила бренда заключается в отождествлении территории с какой-либо сферой общественной жизни.

Следует отметить, что применение инструментов коммуникации и позиционирования реализации концепции брендинга территорий в системе СЭР территории исходит из целей применения конкретного инструмента, который одинаково успешно может использоваться и для целей позиционирования территории, и для целей управления.

Данный блок также обеспечивает практическое воплощение стратегии через координацию участников, обязательного вовлечения местного сообщества [20] и проведение конкретных мероприятий.

Особое значение в модели придается корректирующему блоку, который включает комплексную оценку эффективности брендинга с использованием как количественных (экономические показатели, медиаактивность), так и качественных (имиджевые исследования) методов. Полученные данные служат основой для адаптации стратегии к изменяющимся условиям.

Конечно же, отсутствие системного управления неизбежно приводит к постепенной снижению эффективности и ценности бренда. В разрезе ключевых аспектов управление территориальным брендом включает механизмы адаптации к изменяющимся условиям, инструменты мониторинга эффективности и стратегии долгосрочного социально-экономического развития. Существенное значение приобретает формирование гибкой системы бренд-менеджмента, которая не только поддерживает, но и последовательно усиливает конкурентные позиции региона в условиях динамично меняющейся социально-экономической среды.

Таким образом, предложенная концептуальная модель интеграции территориального брендинга в систему СЭР региона не противопоставляется существующим взглядам на теорию и практику управления социально-экономическим развитием территорий, а выступает их продолжением, обеспечивая непрерывное совершенствование процессов управления территорией в современных реалиях. Предлагаемая интегративная модель управления региональным брендом представляет собой целостную систему, объединяющую стратегические, операционные и оценочные компоненты в единый управленческий цикл. Тем самым она позволяет преодолеть фрагментарность существующих подходов к процессу территориального брендинга.

Заключение

Разработанная модель позволит обеспечить структурированный стратегический подход к поддержанию и развитию имиджа территории, усилить координацию усилий различных заинтересованных сторон, отслеживать изменения и оценивать успешность реализуемых инициатив, что делает процесс управления территорией более гибким и эффективным. Данная модель управления способствует формированию устойчивого и позитивного образа региона, что в свою очередь содействует его экономическому и социальному развитию. Практическая ценность предложенной автором модели заключается в ее способности эффективно использоваться для стратегического управления территорией. Данная модель предоставляет возможность проводить анализ текущего состояния развития территории, диагностику текущего состояния бренда, выявлять несоответствия в его развитии и формировать гармоничный и сбалансированный региональный бренд.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-265-269

Список цитированных источников

1. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://pravo.by/novosti/novosti-pravo-by/2025/december/91547 (дата обращения 10.01.2026).
2. Transport infrastructure in the system of environmental projects for sustainable development of the region / O. Fokina, L. Goncharenko, T. Sobol, A. Mottaeva // BIO Web of Conferences, 2024. – № 93. – P. 5–13.
3. Атаманова, Е. А. Организационно-экономические аспекты формирования системы территориального маркетинга для развития промышленного сектора экономики региона / Е. А. Атаманова, М. Д. Ощепкова. – Пермь : НИИУМС, 2007. – 206 с.
4. Балабанова, Л. В. Маркетинговий менеджмент : навч. посібник / Л. В. Балабанова. – Донецьк : АСНА, 2008. – 146 с.
5. Маркетинг территорий: методология и методы обоснования стратегических решений развития регионов : монография / В. И. Беляев, С. Н. Бочаров, О. А. Горянинская, Р. Г. Малахов. – Барнаул : Изд-во Алтайск. ун-та, 2015. – 244 с.
6. Важенина, И. С. Теоретико-методологические основы определения сущности репутации территории / И. С. Важенина. – Екатеринбург : Ин-т экономики УрО РАН, 2006. – 108 с.
7. Маркетинг мест : Привлечение инвестиций, предприятий, жителей и туристов в города, коммуны, регионы и страны Европы / Ф. Котлер, К. Асплунд, И. Рейн, Д. Хайдер ; пер. с англ. М. Аккая при участии В. Мишучкова. – СПб. : Стокгольм. шк. экономики, 2005. – 375 с.
8. Котлер, Ф. Маркетинг для государственных и общественных организаций / Ф. Котлер, Н. Ли ; пер. с англ. под ред. С. Г. Божук. – СПб. : Питер, 2008. – 384 с.
9. Dinnie, K. Place branding: Overview of an emerging literature / K. Dinnie // Place Branding and Public Diplomacy. – 2004. – № 1. – P. 106–110.
10. Girard, V. Territorial marketing and Strategic Planning in: Marketing Terytorialny – strategiczne wyzwania dla miast i regionów / V. Girard. – UniwersytetŁódzki, 1997. – 87 p.
11. Визгалов, Д. В. Брендинг города / Д. В. Визгалов. – М. : Фонд. Институт экономики города, 2011. – 160 с.
12. Исаченко, Г. А. Образное восприятие в географическом познании мира // Известия Рус. геогр. о-ва. 2001. – Т. 133, Вып. 3. – С. 24–33.
13. Ергунова, О. Т. Маркетинг и брендинг городов в стратегии регионального развития / О. Т. Ергунова, Р. Т. Тимакова // Государство, право, общество – Россия и мировое сообщество: актуальные проблемы современности/ под общ. ред. Н. Б. Барановой, А. А. Грачева, С. Д. Морозова ; Пензенский государственный университет, Межотраслевой научно-информационный центр. – Пенза, 2020 – С. 21–61.
14. Атаева, Т. А. Маркетинг территорий как фактор развития инфраструктуры региона / Т. А. Атаева // Маркетинг – реальность и проекция в будущее : сб. материалов Междунар. науч. конф. – Варна, 2012 – С. 74–81.
15. Брендинг территорий. Лучшие мировые практики / под ред. К. Динни. – М., 2013. – 331 с.
16. Бурцева, Т. А. Управление региональным брендом / Т. А. Бурцева, А. В. Кузнецова, С. Н. Ворожцов // Маркетинг в России и за рубежом. – 2009. – № 1. – С. 115–126.
17. Львов, Д. С. Стратегическое планирование на региональном уровне / Д. С. Львов, А. Г. Гранберг, А. П. Егошин. – URL: http://kpfu.ru/docs/F1553168800/4_Bog_lek3.pdf (дата обращения: 06.01.2026).
18. Жуков, А. П. Логика строения бренда / А. П. Жуков // Бренд-менеджмент. 2011 – № 5. – С. 33.
19. Герман, Д. Рождение бренда: практическое руководство / Д. Герман. – М., 2004 – 344 с.
20. Общественное мнение как объект исследования в стратегическом планировании развития территории: экономико-социологический подход / Е. Л. Ситникова, Н. К. Савельева, А. А. Созинова, Е. А. Бармина // Креативная экономика. – 2024. – № 2. – С. 475–486.

References

1. Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: https://pravo.by/novosti/novosti-pravo-by/2025/december/91547 (data obrashcheniya 10.01.2026).
2. Transport infrastructure in the system of environmental projects for sustainable development of the region / O. Fokina, L. Goncharenko, T. Sobol, A. Mottaeva // BIO Web of Conferences, 2024. – № 93. – P. 5–13.
3. Atamanova, E. A. Organizacionno-ekonomicheskie aspekty formirovaniya sistemy territorial'nogo marketinga dlya razvitiya promyshlennogo sektora ekonomiki regiona / E. A. Atamanova, M. D. Oshchepkova. – Perm' : NIIUMS, 2007. – 206 s.
4. Balabanova, L. V. Marketingovij menedzhment : navch. posibnik / L. V. Balabanova. – Donec'k : ASNA, 2008. – 146 s.
5. Marketing territorij: metodologiya i metody obosnovaniya strategicheskih reshenij razvitiya regionov : monografiya / V. I. Belyaev, S. N. Bocharov, O. A. Goryaninskaya, R. G. Malahov. – Barnaul : Izd-vo Altajsk. un-ta, 2015. – 244 s.
6. Vazhenina, I. S. Teoretiko-metodologicheskie osnovy opredeleniya sushchnosti reputacii territorii / I. S. Vazhenina. – Ekaterinburg : In-t ekonomiki UrO RAN, 2006. – 108 s.
7. Marketing mest : Privlechenie investicij, predpriyatij, zhitelej i turistov v goroda, kommuny, regiony i strany Evropy / F. Kotler, K. Asplund, I. Rejn, D. Hajder ; per. s angl. M. Akkaya pri uchastii V. Mishuchkova. – SPb. : Stokgol'm. shk. ekonomiki, 2005. – 375 s.
8. Kotler, F. Marketing dlya gosudarstvennyh i obshchestvennyh organizacij / F. Kotler, N. Li ; per. s angl. pod red. S. G. Bozhuk. – SPb. : Piter, 2008. – 384 s.
9. Dinnie, K. Place branding: Overview of an emerging literature / K. Dinnie // Place Branding and Public Diplomacy. – 2004. – № 1. – P. 106–110.
10. Girard, V. Territorial marketing and Strategic Planning in: Marketing Terytorialny – strategiczne wyzwania dla miast i regionów / V. Girard. – UniwersytetŁódzki, 1997. – 87 p.
11. Vizgalov, D. V. Brending goroda / D. V. Vizgalov. – M. : Fond. Institut ekonomiki goroda, 2011. – 160 s.
12. Isachenko, G. A. Obraznoe vospriyatie v geograficheskom poznanii mira // Izvestiya Rus. geogr. o-va. 2001. – T. 133, Vyp. 3. – S. 24–33.
13. Ergunova, O. T. Marketing i brending gorodov v strategii regional'nogo razvitiya / O. T. Ergunova, R. T. Timakova // Gosudarstvo, pravo, obshchestvo – Rossiya i mirovoe soobshchestvo: aktual'nye problemy sovremennosti/ pod obshch. red. N. B. Baranovoj, A. A. Gracheva, S. D. Morozova ; Penzenskij gosudarstvennyj universitet, Mezhotraslevoj nauchno-informacionnyj centr. – Penza, 2020 – S. 21–61.
14. Ataeva, T. A. Marketing territorij kak faktor razvitiya infrastruktury regiona / T. A. Ataeva // Marketing – real'nost' i proekciya v budushchee : sb. materialov Mezhdunar. nauch. konf. – Varna, 2012 – S. 74–81.
15. Brending territorij. Luchshie mirovye praktiki / pod red. K. Dinni. – M., 2013. – 331 s.
16. Burceva, T. A. Upravlenie regional'nym brendom / T. A. Burceva, A. V. Kuznecova, S. N. Vorozhcov // Marketing v Rossii i za rubezhom. – 2009. – № 1. – S. 115–126.
17. L'vov, D. S. Strategicheskoe planirovanie na regional'nom urovne / D. S. L'vov, A. G. Granberg, A. P. Egoshin. – URL: http://kpfu.ru/docs/F1553168800/4_Bog_lek3.pdf (data obrashcheniya: 06.01.2026).
18. ZHukov, A. P. Logika stroeniya brenda / A. P. ZHukov // Brend-menedzhment. 2011 – № 5. – S. 33.
19. German, D. Rozhdenie brenda: prakticheskoe rukovodstvo / D. German. – M., 2004 – 344 s.
20. Obshchestvennoe mnenie kak ob"ekt issledovaniya v strategicheskom planirovanii razvitiya territorii: ekonomiko-sociologicheskij podhod / E. L. Sitnikova, N. K. Savel'eva, A. A. Sozinova, E. A. Barmina // Kreativnaya ekonomika. – 2024. – № 2. – S. 475–486.

Материал поступил 12.02.2026, одобрен 16.02.2026, принят к публикации 16.02.2026

УДК 339.5

БЕЛАРУСЬ НА АФРИКАНСКОМ КОНТИНЕНТЕ: ПОТЕНЦИАЛ И ДИВЕРСИФИКАЦИЯ ЭКСПОРТА ТОВАРОВ

С. А. Кристиневич

Д. э. н., доцент, профессор кафедры экономической теории, УО «Белорусский государственный экономический университет», Минск, Беларусь, e-mail: kristinevich@gmail.com

Реферат

Современные практики анализа и оценки внешней торговли ориентированы прежде всего на выработку эффективных мер государственной политики. Среди ключевых задач внешнеторговой политики Республики Беларусь особое значение придается выходу на новые рынки. В силу этого актуализируется проблема разработки мер поддержки отечественных экспортеров. В работе предлагается подход, основанный на оценке экспортного потенциала, концентрации и диверсификации экспорта.

Экспортный потенциал рассчитывается на основе предложения, спроса и безбарьерности торговли. Прогнозирование спроса и предложения осуществляется с использованием статистических данных о торговле, прогнозов ВВП и численности населения, эластичности доходов и величины тарифов. Концентрация экспортной продукции определяется на основе индекса Херфиндаля – Хиршмана, который учитывает стоимость и количество товаров, экспортируемых страной. Возможность диверсификации экспорта детерминируется через «продуктовое пространство», отражающее тесноту связей между товарами.

В статье ставится задача исследования международных практик оценки и анализа экспорта товаров. Объектом исследования является экспорт товаров, предметом – потенциал и диверсификация экспорта как характеристики его устойчивости. Цель – обоснование перспективных направлений экспортных потоков для Беларуси на рынках Африканского континента.

В работе использованы данные по внешней торговле международных организаций: база данных Comtrade ООН; база данных World Development Indicators Всемирного Банка; агрегаторы Гарвардского университета; инструменты Центра международной торговли. В качестве сферы приложения выбран Африканский континент как перспективное и малоизученное направление экспортных потоков из Беларуси. Определено, что во многом конкурентная позиция на африканском рынке зависит от корзины экспортной специализации и технологической сложности входящих в нее товаров.

Ключевые слова: экспорт, экспортный потенциал, индекс концентрации экспорта, диверсификация экспорта, Африка, внешнеторговая устойчивость.

BELARUS ON THE AFRICAN CONTINENT: POTENTIAL AND DIVERSIFICATION OF GOODS EXPORTS

S. A. Kristinevich

Abstract

Modern practices of foreign trade analysis and assessment are focused primarily on the development of effective public policy measures. Among the key tasks of the foreign trade policy of the Republic of Belarus, special attention is paid to entering new markets. Due to this, the problem of developing support measures for domestic exporters is becoming more relevant. The paper proposes an approach based on the assessment of export potential, concentration and diversification of exports.

Export potential is calculated based on supply, demand and barrier-free trade. Supply and demand are forecast using trade statistics, GDP and population forecasts, income elasticity and tariff levels. Export product concentration is determined using the Herfindahl-Hirschman index, which takes into account the value and quantity of goods exported by a country. The possibility of export diversification is determined through the “product space”, which reflects the closeness of the links between goods.

The article sets the task of studying international practices of assessing and analyzing the export of goods. The object of the study is the export of goods, the subject is the potential and diversification of export as characteristics of its sustainability. The goal is to substantiate promising directions of export flows for Belarus in the markets of the African continent.

The paper uses data on foreign trade of international organizations: the UN Comtrade database; the World Development Indicators database the World Bank; Harvard University aggregators and the tools of the International Trade Center. The African continent was chosen as the area of application as a promising and little-studied direction of export flows from Belarus. It was determined that in many respects the competitive position in the African market depends on the basket of export specialization and the technological complexity of the goods included in it.

Keywords: export, export potential, export concentration index, export diversification, Africa, foreign trade sustainability.

Введение

Современная теоретическая оптика, используемая на различных уровнях анализа экономической системы, предполагает существование так называемых идеальных (равновесных) состояний. Для описания отклонений и возврата в эти состояния применяется довольно известный, но при этом неоднозначный набор понятий: «устойчивость» [1, 2], «резильентность» [3–7], «робастность» [8], «сбалансированность» [9–10] и прочие. Неоднозначность понятий здесь связана в меньшей степени с их содержательным наполнением, скорее, с тем, как исследователь воспринимает «экономическую картину мира» – как априорно равновесную или неравновесную. Сложность состоит в том, что часть этих понятий может использоваться одновременно в двух «мирах»[1]. Таким образом, перед конкретным исследователем стоит задача на начальном этапе обозначить видение «картины мира» (равновесное/неравновесное)

[1] Если понятие «резильентности» используют преимущественно для мира неравновесных систем и ассоциируют с динамической устойчивостью, то, например, понятия «устойчивость» и «сбалансированность» могут применяться для описания как равновесных, так и неравновесных состояний системы.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-270-282

и уточнить содержательное наполнение. Понимание «устойчивости» зависит как правило от дисциплинарного ракурса и специфики приложения к объекту. Существующее разнообразие подходов к пониманию «устойчивости» подводит к выводу, что во многом содержание зависит от доминирующих стандартов научности в той или иной дисциплинарной области: в одних случаях упор делается на всеохватность и познание сути явления, в других случаях преимущество отдается узкому, но количественно измеримому подходу. В современной теоретической экономике утвердился ориентир на строгость и измеримость явлений/процессов [11], что служит своего рода сертификатом достоверности в академическом мире и одновременно «перекидным мостом» в практику (выработку мер экономической политики).

Одним из примеров устойчивости как характеристики экономической системы выступает ее проявление во внешней торговле: в описании экспортных потоков. При этом хрестоматийной трактовки внешнеторговой устойчивости на данный момент нет. В силу этого актуализируется блок научных проблем, связанных с разработкой теоретических, методических и практических подходов к ее исследованию. В настоящей статье ставится скромная задача: исследование международных практик оценки и анализа экспорта товаров.

Объектом исследования является экспорт товаров, предметом – потенциал и диверсификация экспорта как характеристики его устойчивости. Цель – обоснование перспективных направлений экспортных потоков для Беларуси на рынках Африканского континента.

Методический подход к исследованию экспорта товаров: потенциал, концентрация, диверсификация

В настоящее время для анализа и оценки экспортных потоков используется разнообразный инструментарий: индекс энтропии [12], коэффициент Джини [13], индекс сравнительных преимуществ Балласы [14], индекс Боуэна, учитывающий открытость экономики [15], индекс экономической сложности [16], индекс диверсификации Тейла [17], индекс Херфиндаля – Хиршмана [18] и другие.

Для оценки внешнеторговой устойчивости предлагается подход, включающий следующие группы показателей.

1. Экспортный потенциал – это оценка потенциальной стоимости экспорта в долларах США, которая может быть достигнута для данного экспортера (i), продукта (k) и рынка (j) в конкретном году. Экспортный потенциал рассчитывается на основе предложения, спроса и безбарьерности торговли. Прогнозирование спроса и предложения осуществляется с использованием статистических данных о торговле, прогнозов ВВП и численности населения, эластичности доходов и величины тарифов. Экспортный потенциал не рассчитывается для товаров, которые считаются опасными для здоровья человека и окружающей среды (например, табак, нефть, природный газ), а также для товаров, не представляющих экспортной ценности (например, антиквариат, использованные почтовые марки). Потенциальный экспорт оценивается на шесть лет относительно данных, использованных в модели.

2. Индекс концентрации экспортной продукции – один из способов измерения уровня диверсификации экспорта страны. Высокая концентрация (значение, близкое к единице) указывает на то, что большая доля экспорта страны приходится на небольшое количество товаров, что означает, что экспортная корзина страны не диверсифицирована. Низкая концентрация (значение, близкое к нулю) указывает на то, что экспорт страны равномерно распределен по широкому спектру товаров, что свидетельствует о диверсифицированной экспортной корзине. Концентрация экспортной продукции определяется для каждой страны на основе индекса Херфиндаля – Хиршмана (HHI), который учитывает стоимость и количество товаров, экспортируемых данной страной. Он рассчитывается путем возведения в квадрат доли каждой страны на выбранном рынке и суммирования полученных чисел. В расчетах HHI не учитывается экспорт услуг.

3. Диверсификация экспорта. Поскольку прогнозируемую долю рынка можно рассчитать только для продуктов, которые уже экспортируются, расчеты диверсификации опираются на концепцию «продуктового пространства» [19]. Эта концепция предполагает, что продукты, более тесно связанные между собой (т. е. встречающиеся вместе в экспортных корзинах других стран), представляют перспективные возможности для диверсификации. Расчеты начинаются с анализа близости («родственности») между существующими продуктами, экспортируемыми с выявленным сравнительным преимуществом, и новыми продуктами. Поскольку родственность не всегда отражает способность страны экспортировать новый продукт, предлагаемые возможности диверсификации фильтруются с учетом наличия у страны необходимой климатической зоны и выхода к морю.

Экспорт Беларуси на Африканский континент: потенциал, концентрация, диверсификация

Информационная базой исследования[2] стали данные по международной торговле (база данных Comtrade ООН; база данных World Development Indicators Всемирного Банка; агрегаторы Гарвардского университета; инструменты Центра международной торговли).

Как правило, в современных исследованиях используется номенклатура Harmonized System (далее HS) – гармонизированный способ описания и кодирования товаров, представляет собой международную стандартизированную систему наименований и номеров, используемую для классификации продуктов.

На конец 2021 года присутствие Республики Беларусь на товарном рынке Африки представлено на карте (рисунок 1). Основные партнеры: Египет, Сенегал, Тунис.

Динамика экспорта за период 1995–2023 гг. показана на рисунке 2. С 2021 года наблюдается последовательное снижение объема, который в последующие годы не превышает 200 млн долл. США. Поиск новых рынков и удержание позиций на уже существующих становится приоритетной экономической задачей в условиях санкционного давления и острой конкуренции.

В 2023 году география расширяется: ключевыми партнерами, потребляющими основную долю белорусского экспорта, становятся Египет, Тунис, Марокко, Зимбабве (рисунок 3).

Анализ структуры экспорта в названные выше страны позволяет заключить, что спрос со стороны африканских торговых партнеров предъявляется преимущественно на продукцию металлургии, товары химической промышленности, сельского хозяйства и машиностроения по номенклатуре HS (таблица 1).

Существенным фактором, определяющим конкурентоспособность продукции на рынке, выступает ее технологичность или сложность. Рейтинги стран Гарвардской лаборатории экономического роста оценивают текущее состояние продуктивных знаний страны с помощью индекса экономической сложности (ECI). Страны повышают свой ECI, увеличивая количество и сложность успешно экспортируемых ими продуктов.

Рейтинг основан на диверсификации и сложности экспортной корзины. Страны, обладающие большим разнообразием производственных технологий, особенно специализированных, способны производить широкий спектр сложной продукции.

Динамика индекса экономической сложности для Беларуси представлена на рисунке 4.

На рисунке 5 показана динамика Беларуси в рейтинге в сравнении с основными импортерами белорусской продукции в Африке: Египтом, Тунисом, Марокко, Зимбабве.

[2]Национальные официальные статистические данные по внешней торговле Республики Беларусь, как правило, представлены на конец 2021 года. Оценки и анализ после 2021 г. основываются на зеркальной статистике международных организаций.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-270-282

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-270-282

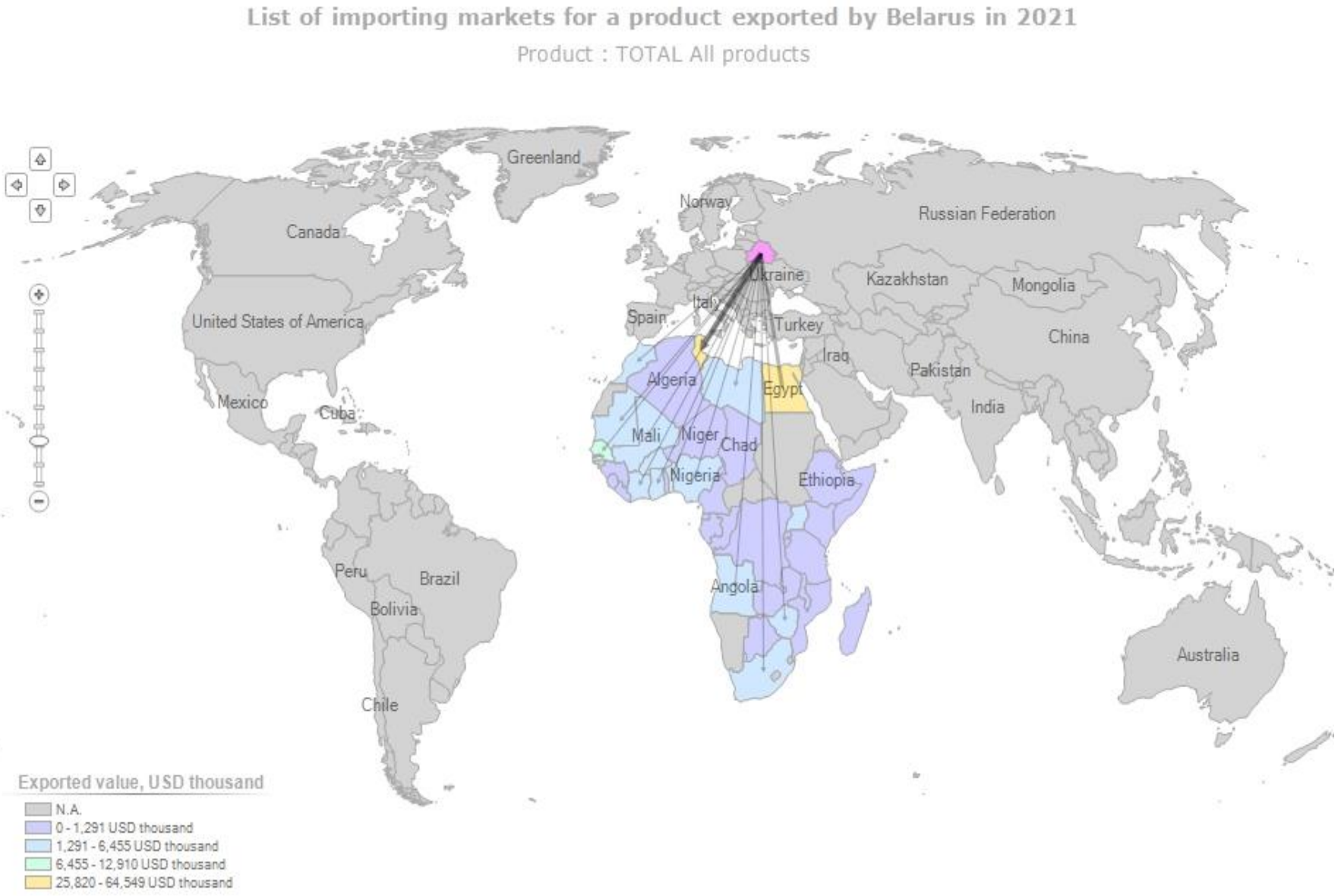


Рисунок 1 – Карта экспорта Республики Беларусь на Африканский континент по странам в стоимостном разрезе, в 2021 году

Источник: визуализация на основе инструмента https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry_TS_Map.aspx?nvpm=1%7c112%7c%7c%7c7%7cTOTAL%7c%7c%7c2%7c1%7c1%7c2%7c2%7c1%7c2%7c1%7c1%7c3

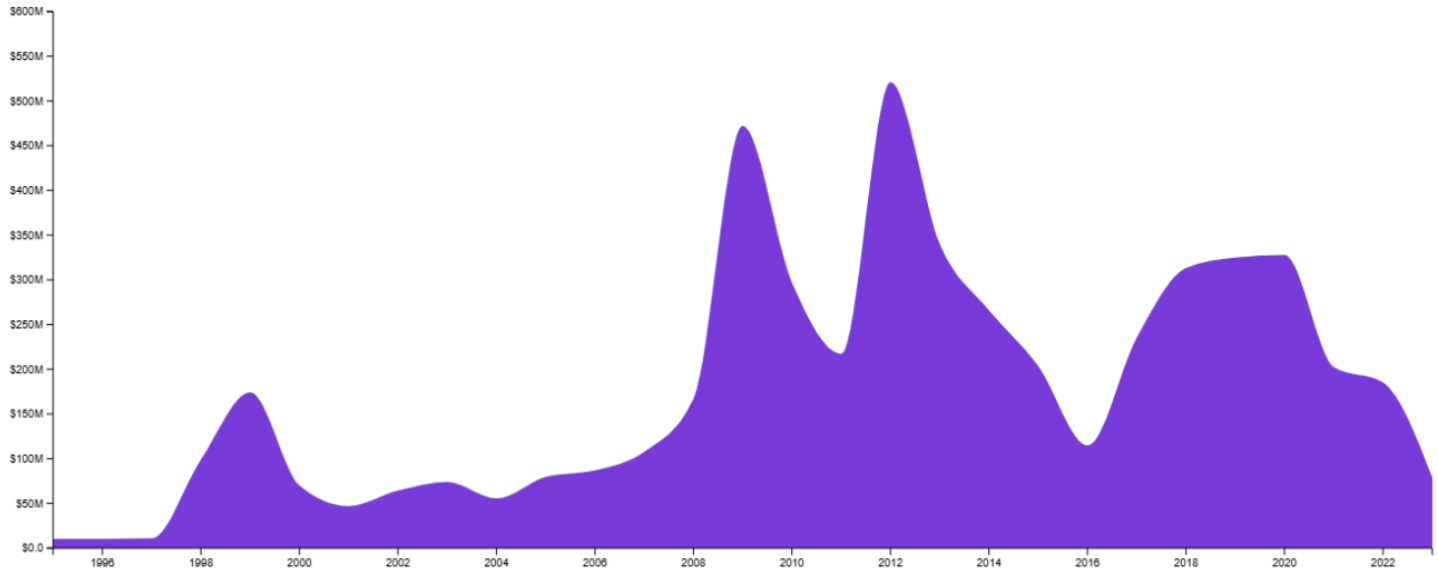


Рисунок 2 – Динамика объема экспорта Беларуси в Африку с 1995 по 2023 гг. в текущих ценах, млн долл. США
Источник: составлено автором на основе данных https://atlas.hks.harvard.edu/explore/overtime? exporter=country-112&view=markets



Рисунок 3 – Страновая структура экспорта товаров Беларуси на Африканский континент в 2023 году
Источник: составлено автором на основе данных https://atlas.hks.harvard.edu/explore/treemap? exporter=country-112&productLevel=4&view= markets

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-270-282

Таблица 1 – Структура и объем экспорта Беларуси в ключевые страны-партнеры Африки, 2023 год

Страна	Наименование товара и код в номенклатуре HS92	Общая стоимость экспорта в текущих ценах, млн. долл. США	Доля в общем объеме экспорта, %
Египет	Полуфабрикаты из железа или нелегированной стали (7207)	63,7	84,75
Тунис	Проволока из железа или стали, неизолированная (7312)	4,5	80,84
Марокко	Пластиковые трубы (3917)	3,31	38,06
	Проволока из железа или стали, неизолированная (7312)		24,75
	Трансмиссионные валы (8483)		17,45
	Ткани из льна (5309)		7,29
Зимбабве	Детали автотранспортных средств (8708)	2,46	35,08
	Автомобили специального назначения (8705)		17,11

Источник: составлено автором на основе данных https://atlas.hks.harvard.edu/explore/treemap?exporter=country-112&productLevel=4&view=markets

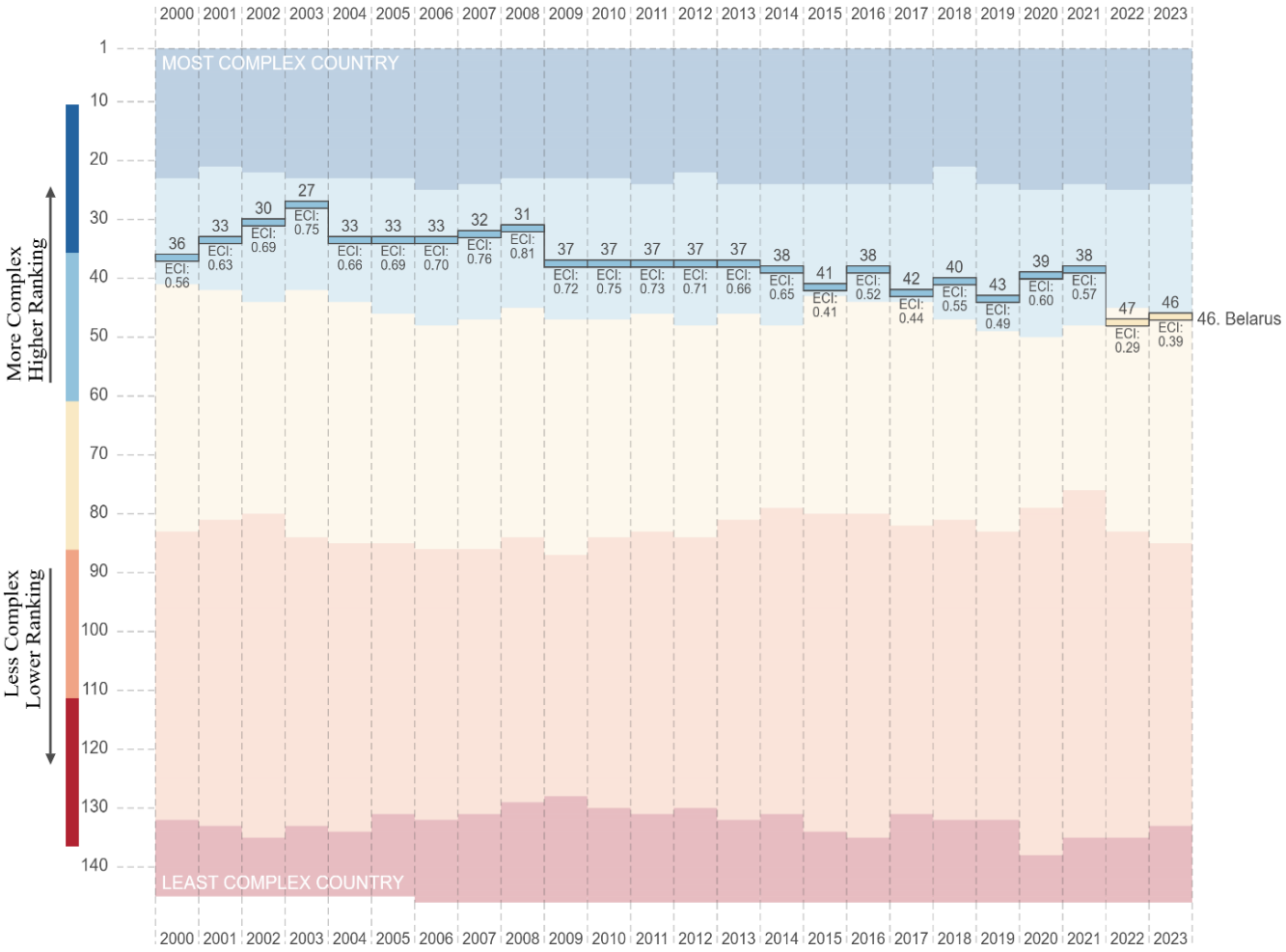


Рисунок 4 – Беларусь в рейтинге экономической сложности стран (46 место из 145)
Источник: составлено автором на основе данных https://atlas.hks.harvard.edu/rankings

Кроме этого, рассчитывается Индекс сложности продукта (PCI), который оценивает разнообразие и сложность производственных технологий, необходимых для производства продукта. К продуктам с высоким значением PCI относятся электроника и химикаты. К продуктам с низким значением PCI относятся сырье и сельскохозяйственная продукция (таблица 2).

Рассмотрим возможные перспективные направления экспорта товаров на африканский континент с позиций предложенного выше подхода: последовательно оценивая экспортный потенциал, концентрацию экспорта, диверсификацию экспорта Беларуси.

Экспортный потенциал. Наибольшим экспортным потенциалом (из Беларуси в Африку) обладают хвойные лесоматериалы, распиленные/расколотые вдоль толщиной более 6 мм, сухое молоко с пониженным содержанием жира и замороженные мясо птицы, разделанные и субпродукты (рисунок 6). Наибольшая абсолютная разница между потенциальным и базовым экспортом[3] в стоимостном выражении наблюдается по хвойным лесоматериалам, распиленным/расколотым вдоль толщиной более 6 мм, что позволяет реализовать дополнительный экспорт на сумму 27 млн долларов США и составляет 14 % нереализованного экспортного потенциала.

[3] Базовый экспорт рассчитывается на основе пятилетнего средневзвешенного значения прямых и зеркальных данных, при этом более поздним годам придается больший вес.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-270-282

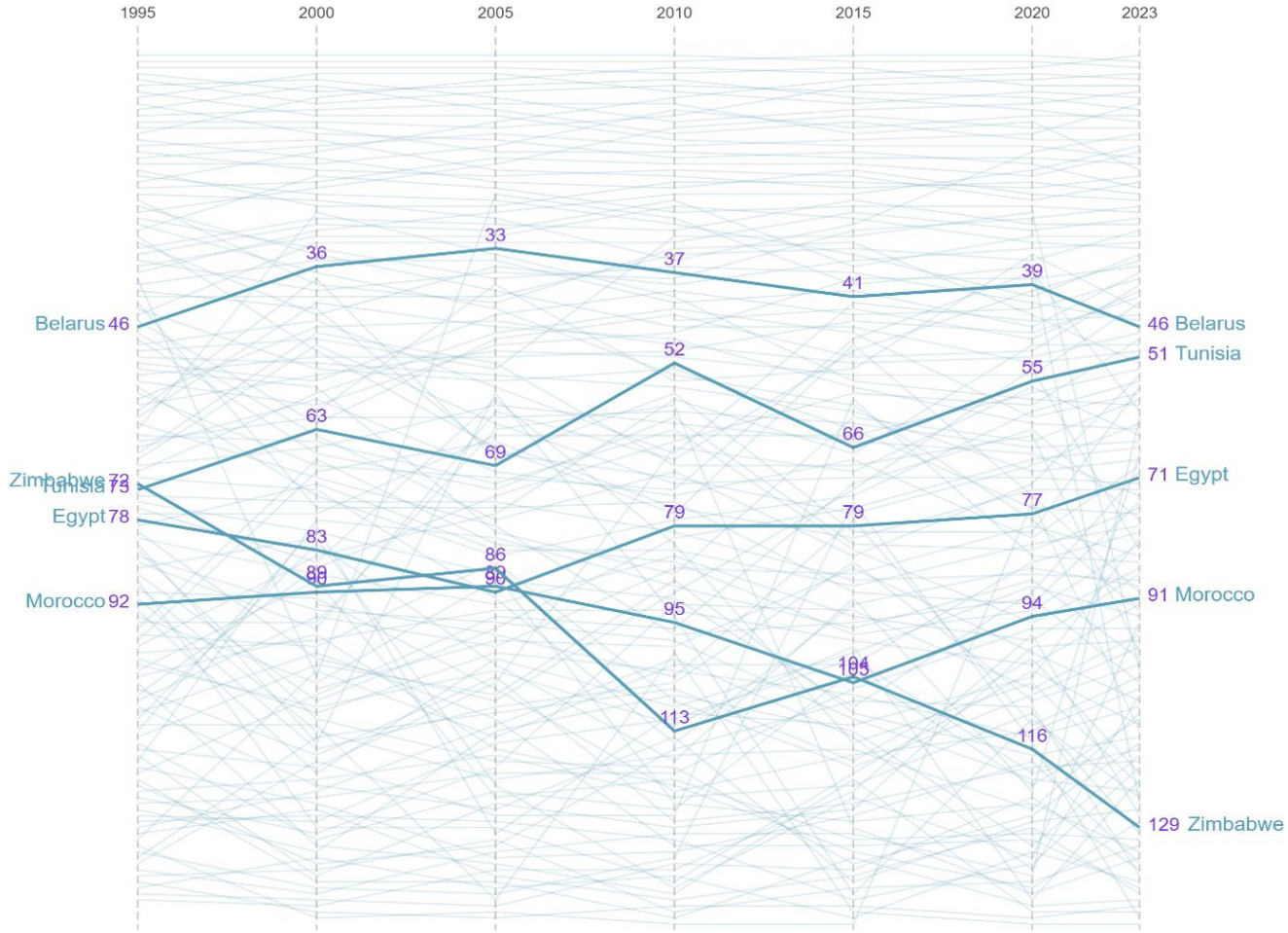


Рисунок 5 – Беларусь и основные импортеры в Африке в рейтинге экономической сложности

Источник: составлено автором на основе данных https://atlas.hks.harvard.edu/rankings

Таблица 2 – Топ-5 сложных производств на основе Индекса сложности продукта на 2023 год

Место в рейтинге сложности продукта	Код HS92	Наименование	Индекс сложности продукта
1	2841	Соли оксометаллических или пероксометаллических кислот	3,47
2	3705	Фотопластинки и фотопленки, экспонированные и проявленные, кроме кинопленки	2,83
3	7506	Никелевые пластины, листы, полосы и фольга	2,56
4	8444	Машины для экструзии, вытяжки и резки искусственных текстильных волокон	2,47
5	3707	Химические препараты для использования в фотографии (кроме лаков, клеев, адгезивов и аналогичных препаратов); несмешанные продукты для использования в фотографии, расфасованные в мерные порции или предназначенные для розничной продажи в готовом к использованию виде	2,44

Источник: составлено автором на основе данных https://atlas.hks.harvard.edu/rankings

Так, например, для номенклатурного кода 040210 Сухое молоко с низким содержанием жира экспортный потенциал оценивается в 17 млн долларов при базовом экспорте 1,1 млн долларов; для кода 020714 Мясо птицы, разделка и субпродукты, замороженные экспортный потенциал – 7,2 млн долларов, базовый экспорт – 16 тысяч долларов. По оценке Центра мировой торговли нереализованный[4] экспортный потенциал Беларуси в Африке по всем товарным группам составил 194 млн долларов на 2023 год.

[4]Нереализованный экспортный потенциал – степень отклонения потенциального экспорта от базового.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-270-282

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-270-282

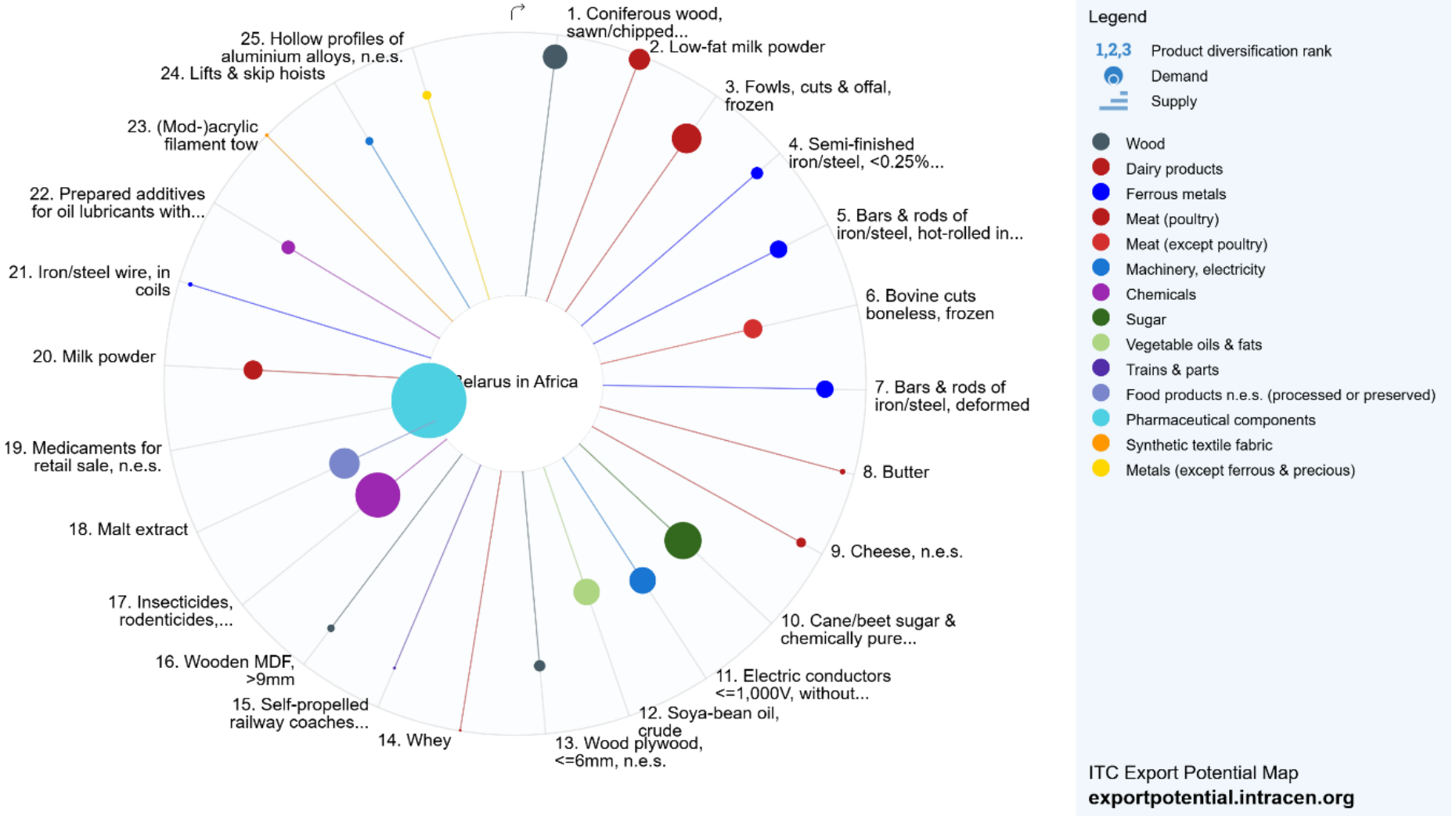


Рисунок 6 – Экспортный потенциал Беларуси в Африке, оценка на 2029 год на основе спроса, предложения, степени безбарьерности торговли

Источник: составлено автором на основе данных https://exportpotential.intracen.org/en/diversification/products?fromMarker=i&exporter=112& toMarker=re&market=1

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-270-282

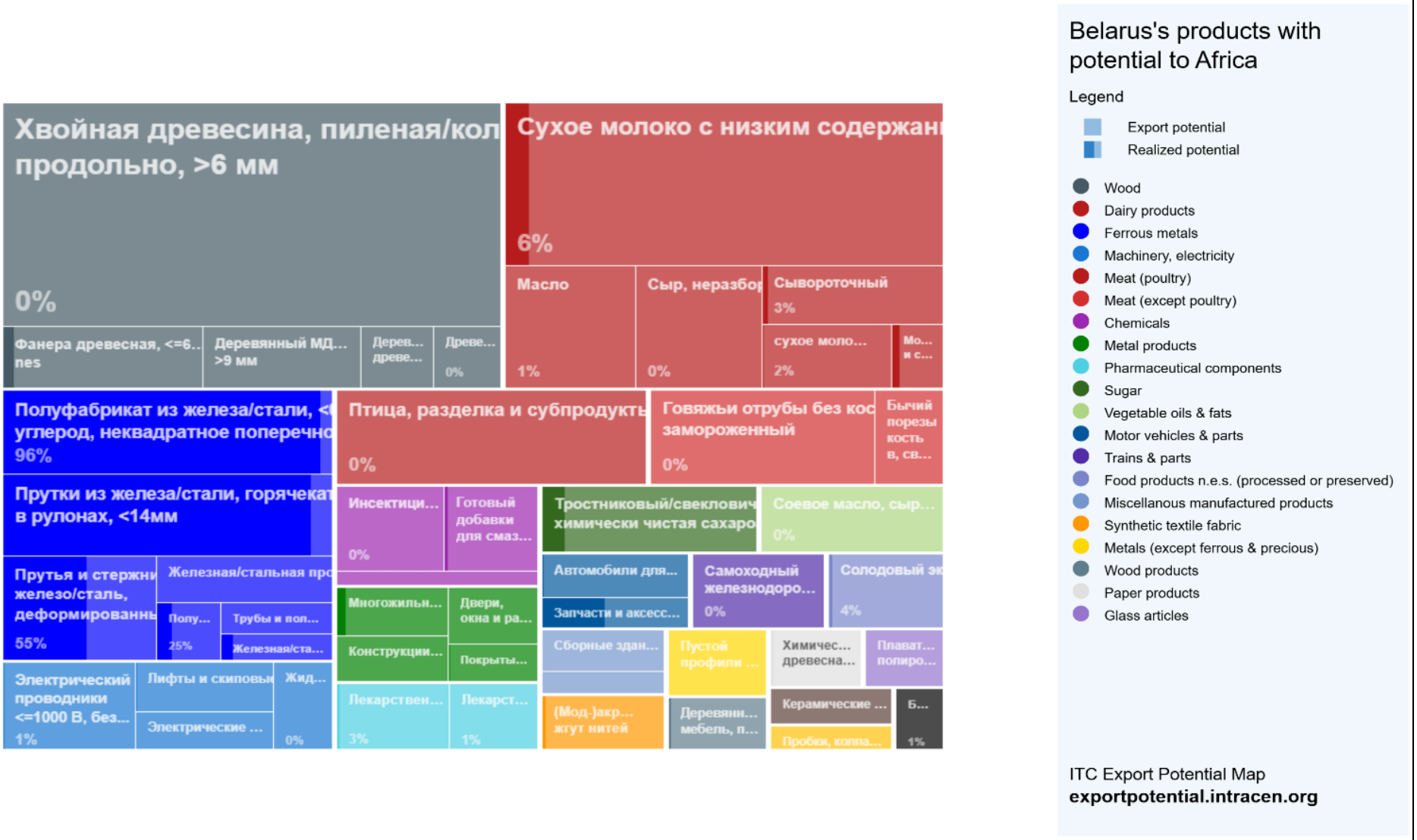


Рисунок 7 – Номенклатура товаров и процент реализованного экспортного потенциала на 2023 год

Источник: составлено автором на основе данных https://exportpotential.intracen.org/en/products/tree-map?fromMarker=i&exporter=112& toMarker=re&market=1&whatMarker=k

Индекс концентрации. Индекс Херфиндаля – Хиршмана измеряет разброс объемов торговли между партнерами экспортера. Значение индекса страны, чья торговля (экспорт или импорт) сосредоточена на очень небольшом количестве рынков, близко к единице. Аналогично, значение индекса страны с идеально диверсифицированным торговым портфелем близко к нулю.

По данным Всемирного банка (рисунок 8) индекс концентрации для Беларуси снижался на анализируемом интервале с 2017 по 2021 гг., что говорит о достаточной диверсификации экспорта в мировом разрезе.

На конец 2021 года географическая структура экспорта характеризуется значительным присутствием Беларуси на мировых товарных рынках (рисунок 9). Ключевым потребителем белорусского экспорта выступает Россия.

Товарная структура экспорта (рисунок 10) достаточно диверсифицирована, включает товары с высоким значением индекса сложности продуктов.

После введения санкций и ряда ограничений к концу 2024 года происходит переориентация некоторых экспортных потоков в Азию, в качестве перспективного рассматривается также и Африканский рынок. На рисунке 11 представлена диверсификация экспорта на основе зеркальной статистики на 2024 году.

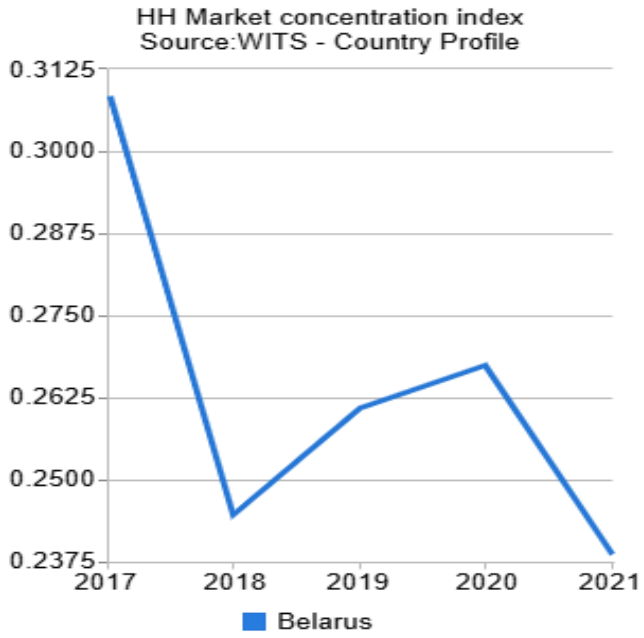


Рисунок 8 – Динамика индекса Херфиндаля – Хиршмана для Беларуси

Источник: составлено автором на основе данных https://wits.worldbank.org/countryprofile/en/country/BLR/startyear/2017/endyear/2021/indicator/HH-MKT-CNCNTRTN-NDX

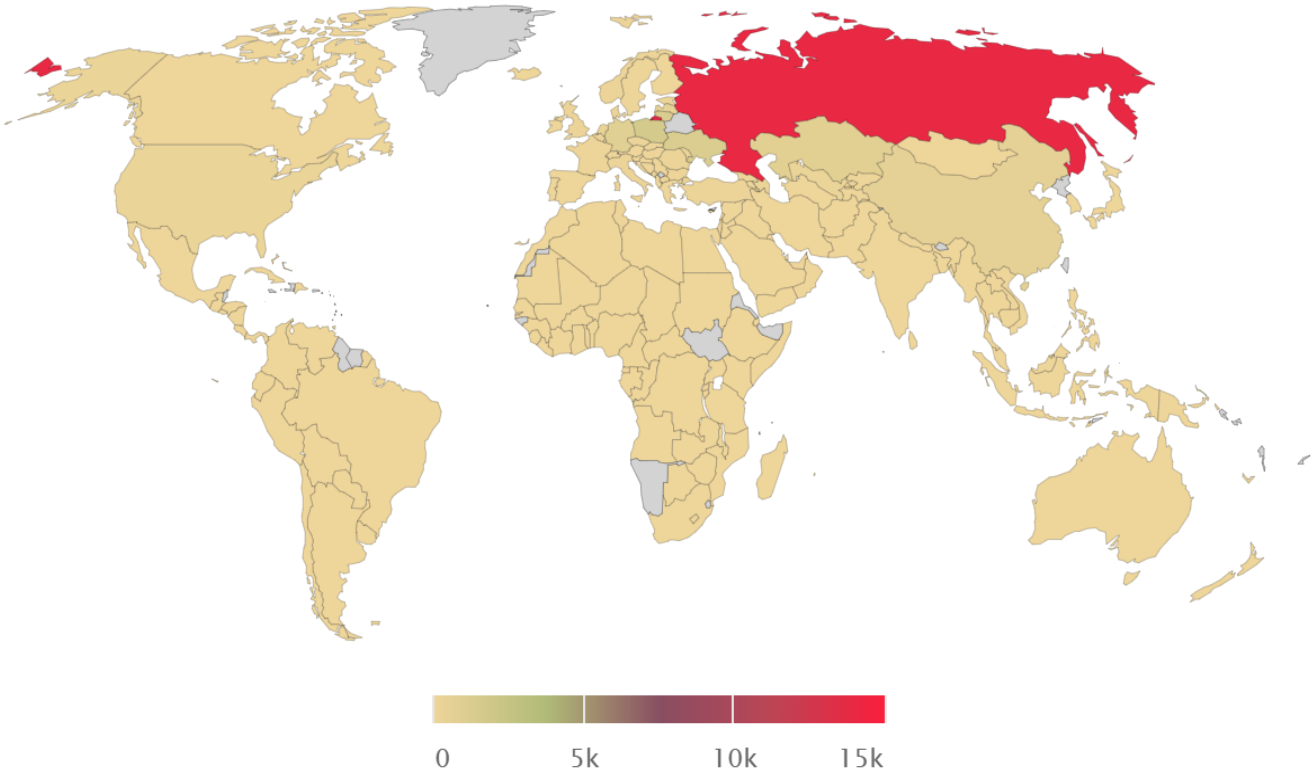


Рисунок 9 – Экспорт из Беларуси в 2021 году, млн долл. США

Источники: UN COMTRADE; Всемирная торговая организация и Всемирный банк: https://frsabido.shinyapps.io/COMTRADE

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-270-282

2-значная классификация HS	
99 Товары, не указанные по виду	16 042 40 %
04 Молочные продукты; яйцо птиц; натуральный мед; пищевые продукты животного происхождения, в другом месте не поименованные или не включенные	2 714 7 %
44 Древесина и изделия из нее; древесный уголь	2 330 6 %
84 Ядерные реакторы, котлы, машины и механические устройства; их части	1 841 5 %
85 Электрические машины и оборудование, их части; звукозаписывающая и звуковоспроизводящая аппаратура; телевизионные устройства для записи и воспроизведения изображения и звука, их части и принадлежности	1 419 4 %
72 Железо и сталь	1 337 3 %
73 Изделия из железа или стали	1 117 3 %
94 Мебель; постельные принадлежности, матрацы, основания для матрацев, подушки и аналогичные набивные предметы мебели; лампы и осветительное оборудование, не включенные в другие группировки; световые вывески, световые таблички и аналогичные изделия; сборные здания	1 042 3 %
39 Пластмассы и изделия из них	1 001 3 %
02 Мясо и съедобные мясные субпродукты	961

Рисунок 10 – Топ-10 экспортируемых в мир товаров из Беларуси в 2021 году, объем торговли в млн долл. США
Источники: UN COMTRADE; Всемирная торговая организация и Всемирный банк: https://frsabido.shinyapps.io/COMTRADE

Диверсификация экспорта. В работе [20] показано как сравнительное преимущество (корзина экспортной специализации страны) влияет на темпы и структуру роста экспорта страны в будущем. Для этого вводится понятие «продуктовое пространство», отражающее тесноту связей между товарами. Концепция продуктового пространства основана на существовании взаимосвязи между продуктами, имеющими сходные технологии. Структура экспорта характеризуется «близостью» товаров, которая измеряет вероятность того, что страна экспортирует продукт. Близость производства формализует интуитивную идею о том, что способность страны производить продукт можно оценить, изучив, какие другие продукты она может производить. Развивая идеи [19], авторам удалось на практике реализовать свой подход. Несколько позже возможность использования концепции «продуктового пространства» для анализа перспектив диверсификации экспорта подтвердили специалисты Всемирного банка и Всемирной торговой организации [21–23]. Данный подход взят за основу в этой статье. Используя визуализацию Центра международной торговли, рассмотрим возможные направления диверсификации. Под последней понимается потенциальное изменение товарной структуры экспорта.

Наиболее перспективными вариантами для диверсификации экспорта Беларуси в Африку являются карбамид, аммиачная селитра и минеральные/химические удобрения с азотом, фосфором и калием (рисунок 12). Самым доступным для Беларуси вариантом является карбамид. Кукуруза – продукт с наибольшим потенциалом спроса в Африке.

Исследования Гарвардской Лаборатории роста показывают, что страны, экспорт которых сложнее, с учетом их уровня дохода, растут быстрее[5] . Следовательно, рост может быть обусловлен диверсификацией технологий для производства более широкого и все более сложного набора товаров и услуг.

[5] https://atlas.hks.harvard.edu/countries/112/export-complexity.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-270-282

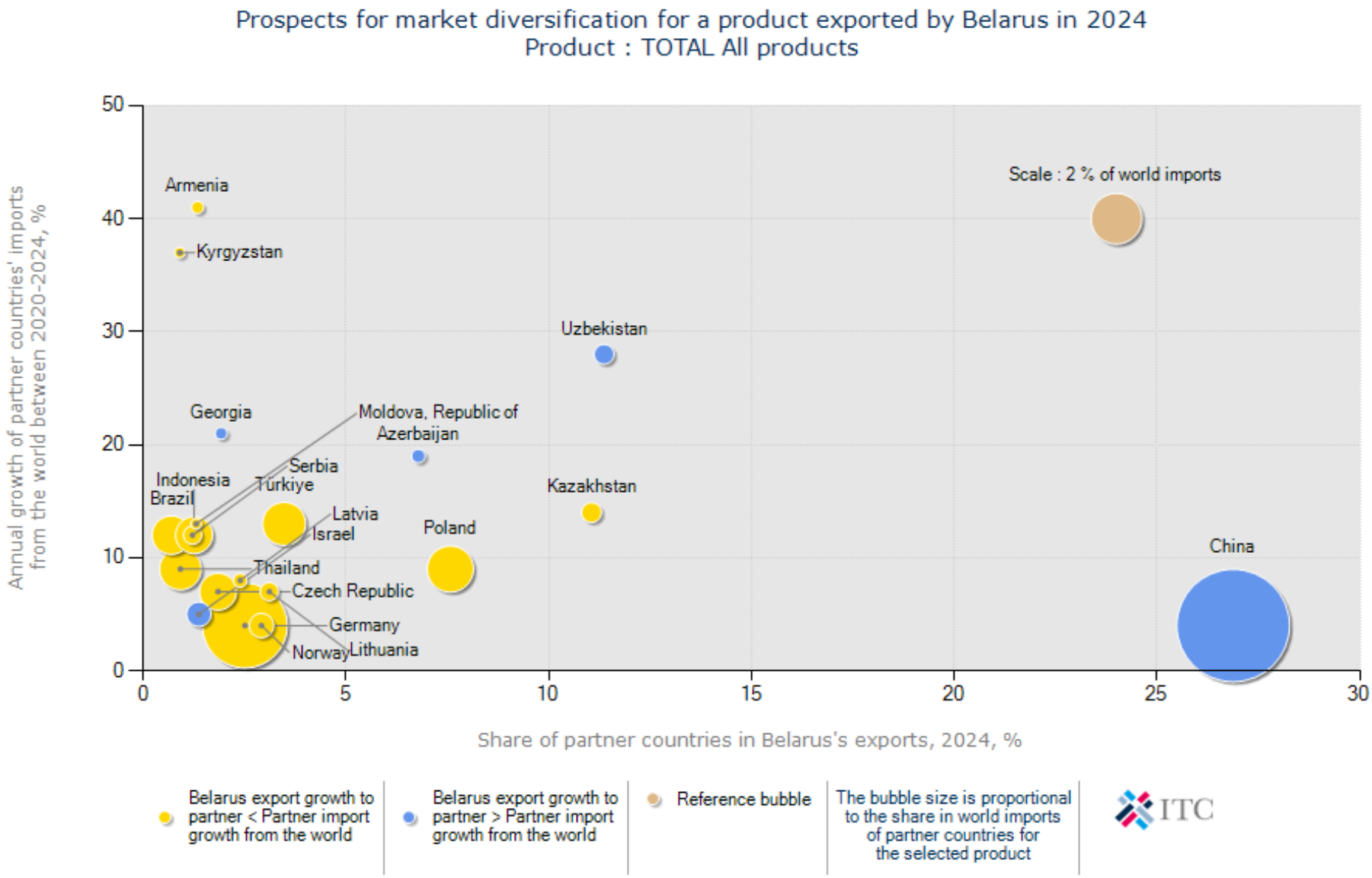


Рисунок 11 – Страновая диверсификация экспорта Беларуси в 2024 (за исключением Российской Федерации)

Источник: составлено автором на основе данных https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry_Graph.aspx?nvpm=1%7c112% 7c%7c%7c%7cTOTAL%7c%7c%7c2%7c1%7c2%7c2%7c1%7c%7c2%7c1%7c1%7c2

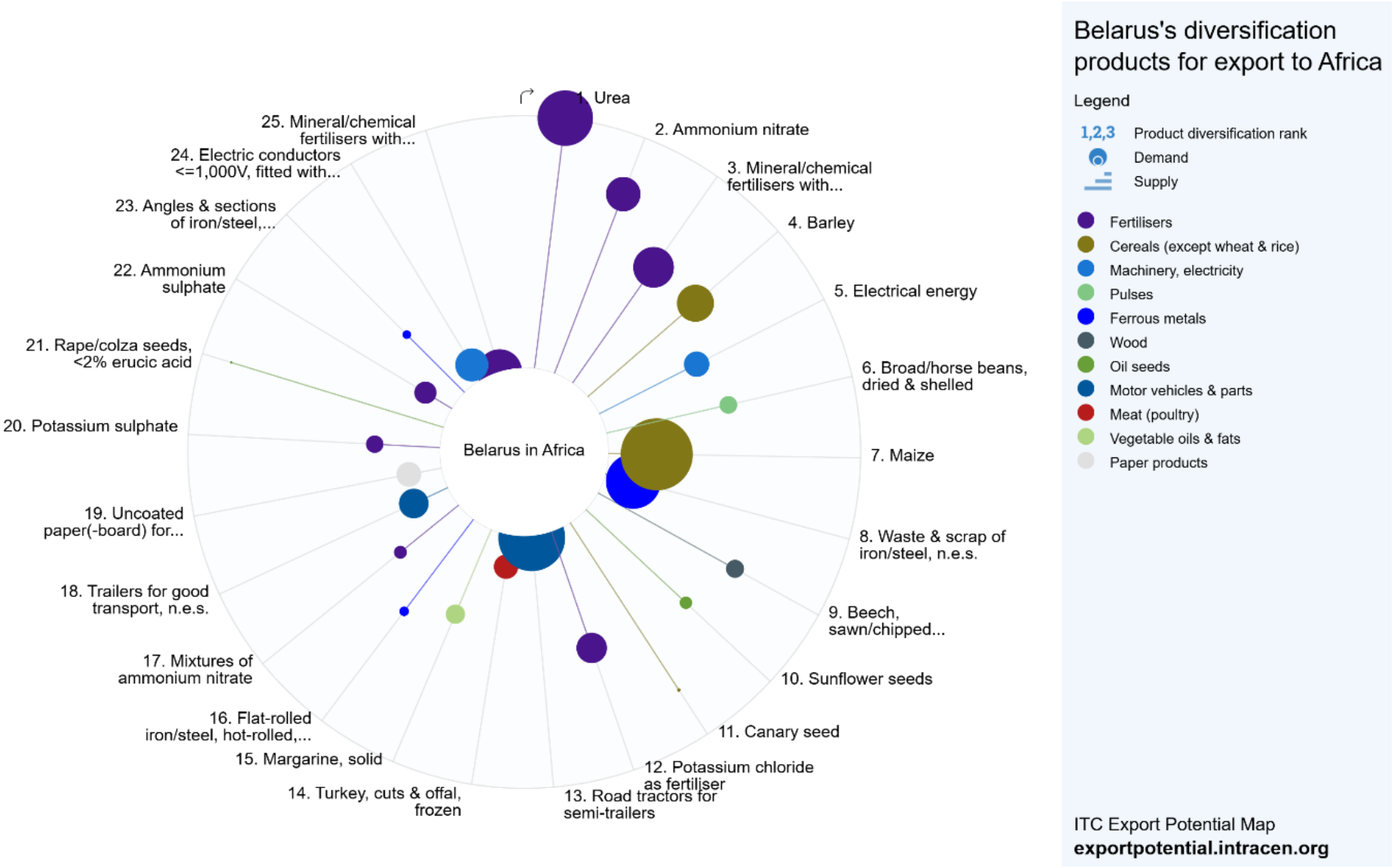


Рисунок 12 – Перспективная товарная диверсификация экспорта Беларуси в Африку
Источник: составлено автором на основе данных https://exportpotential.intracen.org/en/diversification/products?fromMarker=i&exporter=112& toMarker=re&market=1

Заключение

Крупнейшими позициями белорусского экспорта в Африку являются товары высокой сложности, сельскохозяйственная и химическая продукция. В Беларуси наибольший вклад в рост экспорта вносят продукты средней сложности, в частности, животные или растительные жиры, масла/воски и древесина. Как правило, экономический рост обусловлен диверсификацией производства новых, постепенно усложняющихся продуктов. Страны обычно диверсифицируют производство, ориентируясь на смежные и сопутствующие продукты или на продукты, требующие схожих знаний и опыта для развития существующих возможностей. Учитывая текущий экспорт, к секторам с высоким потенциалом для диверсификации в Беларуси относятся: промышленное машиностроение и производство пластмасс.

Список цитированных источников

1. Perrings, C. Resilience and Sustainable Development / C. Perrings // Environment and Development Economics. – 2006. – No. 4. – P. 417–427.
2. Кристиневич, С. А. Экономическая безопасность в теоретической экономике: методологические подходы и поиск содержания / С. А. Кристиневич // Белорусский экономический журнал. – 2024. – No. 3. – С. 4–18.
3. Martin, R. Regional Economic Resilience, Hysteresis and Recessionary Shocks / R. Martin // Journal of Economic Geography. – 2012. – Vol. 12, Iss. 1. – P. 1–32.
4. Hallegatte, S. Economic Resilience: Definition and Measurement / S. Hallegatte / The World Bank. Climate Change Group. Office of the Chief Economist // Policy Research Working Paper. – 2014. – No. 6852. – 44 p.
5. OECD, SIDA. Resilience systems analysis: Learning and recommendations report. – Paris : OECD Publishing, 2017.
6. OECD. A systemic resilience approach to dealing with COVID-19 and future shocks. OECD Policy Responses to Coronavirus (COVID-19), 2020.
7. Філіпцоў, А. М. Рэзільентнасць нацыянальнай эканомікі / А. М. Філіпцоў // Вестник Белорусского государственного экономического университета. – 2025. – No. 1 – P. 5–14.
8. Mikić, M. Trade Statistics in Policymaking: A Handbook of Commonly Used Trade Indices and Indicators / M. Mikić, J. Gilbert. – UN, 2007. – 112 p.
9. Макроэкономические аспекты обеспечения сбалансированности национальной экономики / А. И. Лученок, О. Л. Шулейко, Е. В. Преснякова [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2015. – 371 с.
10. Клейнер, Г. Б. Системная сбалансированность экономики России: региональный разрез / Г. Б. Клейнер, М. А. Рыбачук // Экономика региона. – 2019. – Т. 15. – Вып. 2. – С. 309–323.
11. Кристиневич, С. А. Теоретическая экономика в поисках научных стандартов и отражения экономической реальности / С. А. Кристиневич // Белорусский экономический журнал. – 2022. – № 1. – С. 4–16.
12. Shannon, C. E. A mathematical theory of communication / C. E. Shannon // The Bell System Technical Journal. – 1948. – No. 4 (27). – P. 623–656.
13. Michaely, M. Concentration of Exports and Imports: An International Comparison / M. Michaely // The Economic Journal. – 1958. – No. 272 (68). – P. 722.
14. Balassa, B. Trade Liberalization and Revealed Comparative Advantage / B. Balassa // Manchester School of Economic and Social Studies. – 1965. – No. 33 (2). – P. 99–123.
15. Bowen, H. On the Theoretical Interpretation of Indices of Trade Intensity and Revealed Comparative Advantage / H. Bowen // Review of World Economics. – 1983. – No. 119 (3). – P. 464–472.
16. Hidalgo, C. A. The building blocks of economic complexity / C. A. Hidalgo, R. Hausmann // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. – 2009 – No. 106 (26). – P. 10570–10575. – DOI: 10.1073/pnas.0900943106.
17. Theil, H. Statistical Decomposition Analysis / H. Theil. – Amsterdam : North-Holland, 1972. – 124 p.
18. World Trade Organization. Chapter 1: Analyzing trade flows // Export diversification Geneve. – 2012. – P. 23–26.
19. The Product Space Conditions the Development of Nations / C. A. Hidalgo, B. Klinger, A.-L. Barabási, R. Hausmann // Science. – 2007. – No. 5837. – P. 482–487.
20. Hausmann, R. Structural Transformation and Patterns of Comparative Advantage in the Product Space / R. Hausmann, B. Klinger // John F. Kennedy School of Government at Harvard University, 2006. – 39 p.
21. Cadot, O. A Guide to Trade Data Analysis / O. Cadot // The World Bank. – 2010. – Note, August.
22. Reis, J. Trade Competitiveness Diagnostic Toolkit. Washington / J. Reis, T. Farde. – DC : The World Bank, 2012.
23. A Practical Guide to Trade Policy Analysis / M. Bacchetta, C. Beverelli, O. Cadot [et al.]. – Geneva, Switzerland : World Trade Organization, 2012.

References

1. Perrings, C. Resilience and Sustainable Development / C. Perrings // Environment and Development Economics. – 2006. – No. 4. – P. 417–427.
2. Kristinevich, S. A. Ekonomicheskaya bezopasnost' v teoreticheskoj ekonomike: metodologicheskie podhody i poisk soderzhaniya / S. A. Kristinevich // Belorusskij ekonomicheskij zhurnal. – 2024. – No. 3. – S. 4–18.
3. Martin, R. Regional Economic Resilience, Hysteresis and Recessionary Shocks / R. Martin // Journal of Economic Geography. – 2012. – Vol. 12, Iss. 1. – P. 1–32.
4. Hallegatte, S. Economic Resilience: Definition and Measurement / S. Hallegatte / The World Bank. Climate Change Group. Office of the Chief Economist // Policy Research Working Paper. – 2014. – No. 6852. – 44 p.
5. OECD, SIDA. Resilience systems analysis: Learning and recommendations report. – Paris : OECD Publishing, 2017.
6. OECD. A systemic resilience approach to dealing with COVID-19 and future shocks. OECD Policy Responses to Coronavirus (COVID-19), 2020.
7. Filipcoŭ, A. M. Rezil'entnasc' nacyyanal'naj ekanomiki / A. M. Filipcoŭ // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. – 2025. – No. 1 – P. 5–14.
8. Mikić, M. Trade Statistics in Policymaking: A Handbook of Commonly Used Trade Indices and Indicators / M. Mikić, J. Gilbert. – UN, 2007. – 112 p.
9. Makroekonomicheskie aspekty obespecheniya sbalansirovannosti nacional'noj ekonomiki / A. I. Luchenok, O. L. SHulejko, E. V. Presnyakova [i dr.]. – Minsk : Belarus. navuka, 2015. – 371 s.
10. Klejner, G. B. Sistemnaya sbalansirovannost' ekonomiki Rossii: regional'nyj razrez / G. B. Klejner, M. A. Rybachuk // Ekonomika regiona. – 2019. – T. 15. – Vyp. 2. – S. 309–323.
11. Kristinevich, S. A. Teoreticheskaya ekonomika v poiskah nauchnyh standartov i otrazheniya ekonomicheskoj real'nosti / S. A. Kristinevich // Belorusskij ekonomicheskij zhurnal. – 2022. – № 1. – S. 4–16.
12. Shannon, C. E. A mathematical theory of communication / C. E. Shannon // The Bell System Technical Journal. – 1948. – No. 4 (27). – P. 623–656.
13. Michaely, M. Concentration of Exports and Imports: An International Comparison / M. Michaely // The Economic Journal. – 1958. – No. 272 (68). – P. 722.
14. Balassa, B. Trade Liberalization and Revealed Comparative Advantage / B. Balassa // Manchester School of Economic and Social Studies. – 1965. – No. 33 (2). – P. 99–123.
15. Bowen, H. On the Theoretical Interpretation of Indices of Trade Intensity and Revealed Comparative Advantage / H. Bowen // Review of World Economics. – 1983. – No. 119 (3). – P. 464–472.
16. Hidalgo, C. A. The building blocks of economic complexity / C. A. Hidalgo, R. Hausmann // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. – 2009 – No. 106 (26). – P. 10570–10575. – DOI: 10.1073/pnas.0900943106.
17. Theil, H. Statistical Decomposition Analysis / H. Theil. – Amsterdam : North-Holland, 1972. – 124 p.
18. World Trade Organization. Chapter 1: Analyzing trade flows // Export diversification Geneve. – 2012. – P. 23–26.
19. The Product Space Conditions the Development of Nations / C. A. Hidalgo, B. Klinger, A.-L. Barabási, R. Hausmann // Science. – 2007. – No. 5837. – P. 482–487.
20. Hausmann, R. Structural Transformation and Patterns of Comparative Advantage in the Product Space / R. Hausmann, B. Klinger // John F. Kennedy School of Government at Harvard University, 2006. – 39 p.
21. Cadot, O. A Guide to Trade Data Analysis / O. Cadot // The World Bank. – 2010. – Note, August.
22. Reis, J. Trade Competitiveness Diagnostic Toolkit. Washington / J. Reis, T. Farde. – DC : The World Bank, 2012.
23. A Practical Guide to Trade Policy Analysis / M. Bacchetta, C. Beverelli, O. Cadot [et al.]. – Geneva, Switzerland : World Trade Organization, 2012.

Материал поступил 27.08.2025, одобрен 01.09.2025, принят к публикации 02.09.2025

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-270-282

УДК 005.932(075.8)(076.8)

К ВОПРОСУ ФОРМИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЛОГИСТИКИ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕПОЧКАМИ ПОСТАВОК

Н. В. Немогай[1], Н. В. Бонцевич[2]

[1] К. т. н., доцент, доцент кафедры экономики и информационных технологий Гомельского филиала Международного университета «МИТСО», Гомель, Беларусь, e-mail: niknemogay@tut.by

[2] Д. э. н., профессор кафедры экономики и информационных технологий Гомельского филиала Международного университета «МИТСО», Гомель, Беларусь, e-mail: nvbont@mail.ru

Реферат

Сохранение устойчивости работы предприятий в постоянно изменяющейся рыночной среде, в том числе обусловленной внешними санкциями – одна из основных задач современной экономики Республики Беларусь, Союзного государства (СГ) и Содружества Независимых Государств (СНГ).

Исследование данного вопроса с позиции системно-процессного подхода, позволяет выявить существенное влияние на данную проблему конкурентоспособности действующих предприятий, которая в значительной степени обусловлена эффективностью использования систем управления конкурентоспособностью (СУКсп). Анализ исследований, касающихся решения данных аспектов в известных в работах не может быть реализован в полной мере в существующих условиях новой реальности, представляющих собой, вследствие внешних санкций, сложносоставную задачу конкурентного противостояния с постоянно меняющимися переменными. В первую очередь указанное обусловило неактуальность существующих подходов, логистических цепочек поставок и траекторий движения транспорта, применяемых в последние годы в Республике Беларусь, для необходимого поиска новых качественных и эффективных управленческих решений.

Применительно к условиям новой реальности Республики Беларусь, объявившей 2024 г. Годом качества, период 2025–2029 гг. – Пятилеткой качества, предусматривавших жизненную необходимость активизации выхода на новые международные рынки, представляется целесообразным наиболее пристальное внимание уделить повышению качества логистики и управления цепочками поставок (УЦП), являющихся важнейшим элементом управляемой подсистемы действующих СУКсп.

С применением методики тестирования и оценки результатов информационной системой, рассмотрены взаимосвязи и взаимовлияния триадных моделей логистических парадигм, которые позволили разработать усовершенствованную инновационную модель логистики и УЦП (ИМЛиУЦП), обеспечивающую качественную адаптацию к новой реальности. Предлагаемая ИМЛиУЦП представляет собой комбинацию трех усовершенствованных элементов: 1 – сетевая структура цепочек поставок (ЦП); 2 – бизнес-процессы (Б/П); 3 – компоненты управления. Новизной, применительно к первому элементу ИМЛиУЦП, является то, что все члены ЦП (центральная компания, а также поставщики, посредники и потребители) рассматриваются как открытые системы, для которых могут быть построены соответствующие СУКсп. Применительно к элементу второй модели, инновационный подход заключается в том, что управление товарными, финансовыми и информационными потоками, а также ключевыми бизнес-процессами представляет собой цикл Деминга – Шухарта / PDCA: планирование – (P-plan), деятельность – (D-Do), контроль – (C-Check) и усовершенствование – A(Action)/. Базовая инновационная идея, лежащая в основе третьего элемента ИМЛиУЦП, заключается в том, что большинство компонентов управления являются общими для всех бизнес-процессов и участников ЦП, в качестве которых более подробно рассмотрены: стратегия, организационная структура, контроллинг.

Применение ИМЛиУЦП позволяет на более высоком уровне осуществлять интегрирование ключевых бизнес-процессов и оптимизировать главные функции управления с использованием возможностей искусственного интеллекта (ИИ) и информационных технологий, а также облегчают и упрощают образовательный процесс подготовки специалистов в логистической сфере, реализующих качественную адаптацию к условиям новой реальности.

Ключевые слова: логистика, управление цепочками поставок (УЦП), модель, триады, инновационная модель логистики и УЦП (ИМЛиУЦП), пятилетка качества, внешние санкции, новая реальность.

ON THE ISSUE OF FORMING AN INNOVATIVE MODEL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT LOGISTICS

N. V. Nemogay, N. V. Bontsevich

Abstract

Maintaining the sustainability of enterprises in a constantly changing market environment, including that caused by compliance with sanctions, is one of the main tasks of the modern economy of the Republic of Belarus, the Union State (US) and the independent states (CIS). The study of this issue from the perspective of a systems-process approach allows us to identify the significant impact on this problem of the competitiveness of existing enterprises, which is largely due to the use of competitiveness management systems (CMS) at enterprises. The analysis of research related to the solution of these aspects in known works cannot be fully realized in the existing conditions of the new reality, which, due to external sanctions, represent a complex task of competitive confrontation with constantly changing variables. First of all, this has led to the irrelevance of existing approaches, supply chain logistics, and transport routes used in recent years in the Republic of Belarus for the necessary search for new high-quality and effective management solutions.

In relation to the conditions of the new reality of the Republic of Belarus, which declared 2024 the Year of Quality, the period (2025–2029) the Five-Year Plan of Quality, providing for the vital need to activate entry into new international markets, it seems appropriate to pay the closest attention to improving the quality of logistics and supply chain management (SCM), which are the most important element of the controlled subsystem of the existing SCM. Using the methodology of testing and evaluating the results of an information system, the interrelations and mutual influences of triadic models of logistics paradigms were examined, which made it possible to develop an improved innovative model of logistics and SCM (IML&SCM), ensuring high-quality adaptation to the new reality. The proposed IML&UCP is a combination of three improved elements: 1 – network structure of supply chains (SC); 2 – business processes (B/P); 3 – management components. The novelty, in relation to the first element of the IMLiCP, is that all members of the CP (the central company, as well as suppliers, intermediaries and consumers) are considered as open systems for which the corresponding SUCsp can be built. In relation to element 2 of the model, the innovative approach is that the management of product, financial and information flows, as well as key business processes, is based on the Deming-Shewhart cycle /PDCA: planning (P-plan), activity (D-Do), control (C-Check) and improvement (A-Action). The basic innovative idea underlying the third element of the IMLiCP is that most management components are common to all business processes and participants of the CP, which are considered in more detail: strategy, organizational structure, controlling. The use of IMLiUCP allows for a higher level of integration of key business processes and optimization of key management functions using the capabilities of artificial intelligence (AI) and information technology, and also facilitate and simplify the educational process of training specialists in the logistics sector who can effectively adapt to the conditions of the new reality.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-283-289

Keywords: logistics, supply chain management (SCM), model, triads, innovative logistics and SCM model (IMLiSCM), five-year quality plan, external sanctions, new reality.

Введение

В Беларуси устойчивость экономики в условиях современного внешнего санкционного противостояния, в значительной степени обеспечивается развитием и совершенствованием рыночного (маркетинго-логистического) хозяйствования, обуславливающимся преимущественно использованием систем управления конкурентоспособностью (СУКсп) предприятий (организаций) [1–5]. При этом, важнейшая цель республики – обеспечение конкурентоспособности в современной постоянно изменяющейся рыночной среде, в том числе обусловленной внешними санкциями, предопределяется необходимостью эффективного функционирования (для выживания) в рамках различных объединяющих союзов бывших республик СССР (а ныне –независимых государств), наиболее значимые из которых – это Союзное государство (СГ), Содружество Независимых Государств (СНГ) и Евразийский экономический союз (ЕАЭС). Указанное обусловливает необходимость и целесообразность применения в отечественной практике маркетинго-логистической концепции управления цепочками поставок – УЦП (в зарубежной трактовке: SCM – Supply Chain Management), которая призвана обеспечить эффективность всей цепочки поставок (ЦП) в постоянно изменяющейся рыночной среде за счет повышения конкурентоспособности каждого предприятия-участника [6–13].

Несмотря на важность проблемы внедрения концепции УЦП в маркетинго-логистическую деятельность, управленцы в странах бывшего СССР недостаточно профессионально подготовлены к решению трудных задач по ее использованию в современных конкурентных реалиях. Одна из главных задач логистики и УЦП в создавшихся кризисных условиях – быстрое (основанное на достоверной информации и используемых моделях) и качественное реагирование на рыночные изменения, своевременная поставка товаров, отвечающих меняющимся запросам потребителей. Получаемая оперативная информация о местах продаж и быстрая передача ее, обеспечивает предприятиям качественную гибкость производства в сочетании с существенным сокращением сроков реагирования на заказы [11–13].

В этой связи, ниже первостепенное внимание уделено исследованию проблем, а также направлений их решения применительно к рассмотрению следующих аспектов: ретроспективе взаимосвязи и взаимовлияния теоретических моделей, используемых в логистике и УЦП; разработке (на основе выявленной взаимосвязи) инновационной модели логистики и УЦП (ИМЛиУЦП), обеспечивающей качественную адаптацию и активизацию выхода на новые международные рынки, применительно к условиям новой реальности Республики Беларусь, объявившей 2024 г. Годом качества и период 2025–2029 гг. Пятилеткой качества [11–14].

Исследования, предусматривающие использование SWOT-анализа [1, 2, 17], осуществлялись в рамках функционирования студенческих научных кружков «Логистика», «Качество» и «Конкурентоспособность», а также проведения курсов подготовки (переподготовки) специалистов в сфере маркетинго-логистической деятельности по хозяйственным договорам с предприятиями. За основу брались методические рекомендации [1, 2, 13], предусматривающие применение методики тестирования и оценки результатов автоматизированной информационной системой, обеспечивающей обработку и визуализацию результатов опросов. Сформированная целостная система обратной связи с участниками исследований, позволяла обеспечить разработчиков данными для оценки анализируемой проблемы, а также выбора направлений ее совершенствования. Элементы критериев использовались в вопросах анкет, которые были разработаны для каждой группы участников исследований разных уровней (предприятий). Организация электронного анкетирования и обработки данных осуществлялась с использованием автоматизированной информационной системой (АИС) «Анкетирование», включающей подсистемы онлайн-анкетирования и предварительной обработки данных.

1 Ретроспектива взаимосвязи и взаимовлияния теоретических моделей, используемых в логистике и управлении цепочками поставок (УЦП)

Модельные представления в логистике и УЦП обуславливаются, в первую очередь, парадигмами (фундаментальными научными представлениями), связанными с ключевыми компетенциями и идеологией формирования взаимоотношений партнеров, способствующих качественному продвижению потоков по всей цепочке поставок (ЦП) [6–10]. Как показали исследования, наибольшее применение (по доступности, наглядности и системному пониманию) находят парадигмы (модели) в виде триад (единство, образуемое тремя взаимосвязанными частями). Краткая качественная характеристика и взаимозависимость (взаимосвязь) передовых логистических триад [6–13], которые могут быть использованы в создавшихся условиях, представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Краткая качественная характеристика и взаимосвязь логистических триад

Логистические триады	Краткая качественная и взаимосвязь характеристика
A. Единого экономико-логистического пространства	Основные качественные компоненты: общественное разделение труда, экономическая обособленность производителей, свобода деятельности
B. Производственно-финансового равновесия	Каждый участник ЦП действует так, чтобы максимизировать свои результаты, минимизировать расход ресурсов, оптимизировать результаты
C. Автономности	Каждый участник ЦП должен выявлять спрос потребителя, увязывать ресурсы с требованиями рынка, реализовывать продукцию по рыночным ценам
D. Экономических основ	Предусматривается изменение ориентации рынка (от рынка продавца к рынку потребителя), интеграция и глобализация экономики, развитие информационных и коммуникационных технологий
F. Экономических отношений	Основные положения: 1) логистика направлена на удовлетворение спроса потребителя; 2) переход от локальных хозяйственных систем к интегрированным структурам; 3) координированное управление материальными, финансовыми и информационными потоками
G. Экономического пространства	Осуществляется анализ таких характеристик, как плотность (валового продукта, ресурсов, основного капитала на единицу площади пространства); связанность (интенсивность связей между частями пространств); экономическое расстояние (определяемого транспортными и транзакционными издержками). Обязательными признаками являются: общее экономическое законодательство, единство денежно-кредитной и таможенной системы
H. Цена – объем продаж – рентабельность	Одним из способов достижения конкурентоспособности участника ЦП являются низкие издержки, в том числе логистические. Расходы на логистику характеризуются разбросом «единичных расходов» и, как правило, не являются необходимыми для собственно производства, в связи с чем, их не учитывают в окончательной стоимости продукции. Поэтому обычно используется постоянная цена продаж при изменяющихся «единичных расходах» (от конкурентного уменьшения объема продаж). В этой связи производство в определенные периоды начинает приносить убытки, для устранения которых предприятия повышают цены. Это приводит к снижению спроса (объема продаж), а затем, соответственно, и прибыли. Возникающая ситуация, так называемая «триада смерти», проявляется тем сильнее, чем больше доля «единичных расходов» входит в постоянные расходы

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-283-289

Продолжение таблицы 1

Логистические триады	Краткая качественная и взаимосвязь характеристика
J. Время – запасы – информация	В условиях новой реальности «время» становится критическим информационно-зависимым фактором, во многом определяющем объемы «запасов» в ЦП. Взаимосвязь информационных и материальных ресурсов и времени представляется в виде, когда первые два элемента «запасы» **и** «время» разрешаются лишь с помощью элемента «информация». Дефицит операционного «времени» приводит к созданию избыточных материальных «запасов», что может быть ликвидировано лишь путем использования информационных ресурсов. В случае информационной неопределенности, надежность ЦП обеспечивается созданием больших «запасов», либо резервированием «времени»
K. Три стороны логистики предприятия	Используемые в ЦП партнеры и контрагенты образуют «три стороны» в логистике центральной компании (ЦК): 1) поставщики, 2) потребители, 3) 3PL-провайдеры (третья сторона)
L. Интеграция – координация – SC-оптимизация	«Интеграция» определяется как состояние (связанность отдельных частей в целое), так и процесс (направленный на достижение целостности представлений о сложной системе). «Координация» понимается как соподчинение (понятий, действий, функций и т. д.). «SC-оптимизация» – это, в первую очередь, оптимизация в ЦП между всеми контрагентами, направленная на повышение качества всей цепочки
M. Нелинейность – когерентность – открытость	Нелинейность связана с динамикой структур ЦП и предполагает переход от аналитических представлений (анализ – декомпозиция) к развитию на основе последовательного синтеза новых, более эффективных и адекватных рынку структур. Когерентность – согласованное взаимодействие и кооперация контрагентов в ЦП. Открытость бизнеса обусловливается использованием внешних информационных, интеллектуальных, и других ресурсов. Новые интернет-технологии – от электронного фрахта до виртуальных ЦП – проявление конструктивной идеологии открытости для современной логистики и УЦП
N. Сетевая структура – бизнес-процессы – компоненты управления	Модель, включает следующие элементы: 1) структуру ЦП; 2) бизнес-процессы, происходящие в ЦП; 3) компоненты управления ЦП

Выполненный в таблице 1 качественный анализ свидетельствует о существенном влиянии на методологию логистики и УЦП триадных моделей, представляемых в виде:

A) единого экономико-логистического пространства;
B) производственно-финансового равновесия;
C) автономности;
D) экономических основ;
F) экономических отношений;
G) экономических пространств;
H) цена – объем продаж – рентабельность;
J) время – запасы – информация;
K) три стороны логистики предприятия;
L) интеграция – координация – оптимизация;
N) нелинейность – когерентность – открытость;
N) Сетевая структура – бизнес-процессы – компоненты управления.

По нашему мнению, качественное развитие концепции логистики и УПЦ может быть связано с общей моделью (триадой N), включающей следующие элементы:

1 – сетевую структуру цепочек поставок (ЦП);
2 – бизнес-процессы, происходящие в ЦП;
3 – компоненты управления ЦП (рисунок 1).

Данная модель, предложенная авторами Д. Р. Стоком и Д. М. Ламбертом [5] для стабильных рыночных экономических отношений, достаточно проста и наглядна. Однако детального рассмотрения модели, применительно к практическому использованию, авторы не приводят.

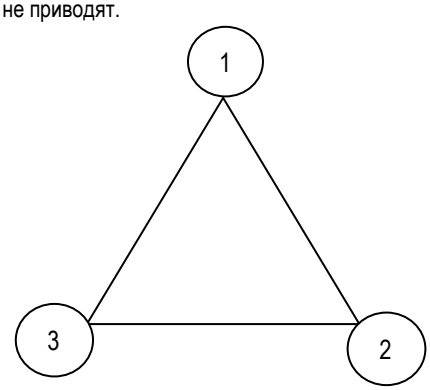


Рисунок 1 – Модель логистики и УПЦ, предложенная Д. Р. Стоком и Д. М. Ламбертом

В этой связи В. И. Сергеев и В. В. Дыбская предложили видоизмененную модель логистики и УПЦ в виде «пирамиды») (рисунок 2) для российских экономических условий [6, 7].

Как видно из рисунка 2, модель данных специалистов представляет собой более подробную (детализированную) модель Д. Р. Стока и Д. М. Ламберта в виде иерархической структуры «пирамиды». Она была также разработана и ориентирована на стабильные (классические) рыночные отношения и не предполагала использования в условиях новой реальности, связанных с международной конфронтации. Поэтому данная модель достаточно сложна для восприятия и интерпретации при изучении, обучении и практической реализации применительно к условиям новой реальности. Кроме того, она не обеспечивает новых подходов к логистике и УПЦ, обусловленных следующим:

1) возрастанием роли инвестиций и инноваций в бизнесе и экономике в целом вследствие ускорения процессов жизненного цикла продукции и одновременного увеличения неопределенности (рисков);

2) появлением огромных объемов информации, новых подходов к ее получению, хранению, обработке и обмену с использованием искусственного интеллекта (ИИ), подключения к интернету машин, механизмов и производственных процессов [18–20];

3) углублением отношений «производитель – потребитель», меняющим отношения участников процесса на основе новых информационных и логистических аспектов (например, интернет-торговли);

4) реализацией в отношениях «потребитель – поставщик» принципа «поставляйте нам только ценности, проблемы (по доставке, хранению, сервису и т. п.) оставьте себе»;

5) совершенствованием уровней производственных отношений, организации производства, управления цепочками поставок (создания ценности), предусматривающих баланс интересов заинтересованных сторон;

7) обострением проблем в развитии логистики и УПЦ (в первую очередь, в Республике Беларусь, СГ и СНГ) из-за существующих инфраструктурных ограничений, а также различных фискально-административных и технических барьеров, что не позволяет эффективно реализовать транзитный потенциал региона (участников) с использованием международных транспортных коридоров.

Современная ситуация, бросающая вызов ученым и специалистам, работающим в области повышения качества (а, следовательно, и конкурентоспособности) логистики и УПЦ, заставляет пересмотреть старые и сформулировать новые, адекватные появляющимся вызовам и трендам. В этой связи нами предоставляется методология разработки инновационной модели логистики и УЦП (ИМЛиУЦП), позволяющей нивелировать отмеченные недостатки.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-283-289

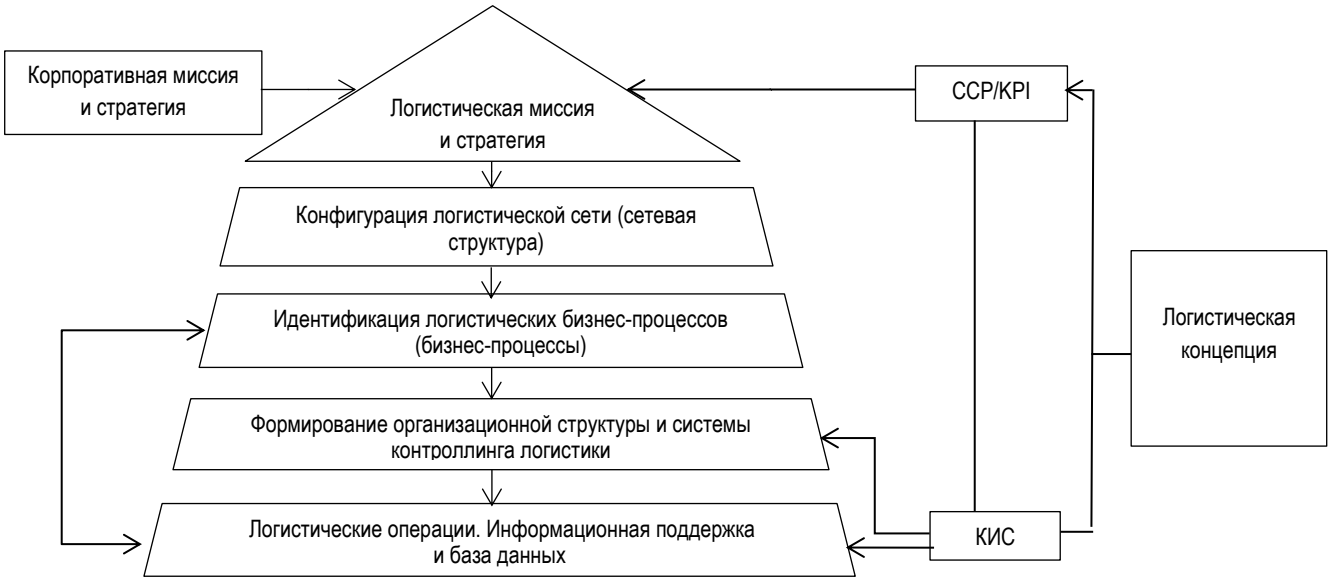


Рисунок 2 – Модель логистики и УПЦ в виде иерархической структуры (пирамиды)

2 Разработка инновационной модели логистики и УЦП (ИМЛиУЦП), обеспечивающей качественную адаптацию к условиям новой реальности

Анализ взаимосвязи исследуемых парадигм, позволил разработать инновационную (усовершенствованную по отношению к известным) модель логистики и УЦП (ИМЛиУЦП), обеспечивающую качественную адаптацию к новой реальности. Предлагаемая ИМЛиУЦП представляет собой комбинацию трех усовершенствованных элементов: 1 – сетевой структуры ЦП; 2 – бизнес-процессов (Б/П); 3 – компонентов управления (рисунок 3). Возможность использования новой инновационной модели рассматривалась применительно к практике функционирования ведущих предприятий Республики Беларусь: ОАО «СтанкоГомель», ОАО «Гомельжелезобетон», ОАО «Гомсельмаш», ОАО «БМЗ», ОАО «Амкадор» и др. в рамках договоров о сотрудничестве. Эти предприятия реализуют поставки продукции в Россию, а также другие страны СНГ и Евразийского экономического союза (ЕАЭС) [21]. В Беларуси 2024 год был объявлен Годом качества, а период 2025–2029 гг. – Пятилеткой качества, поэтому качество всех элементов логистики и УЦП становится главным приоритетом предприятий [15, 16].

Следуя хрестоматийной схеме проводимых исследований и SWOT-анализа [17], кратко охарактеризуем элементы предлагаемой ИМЛиУЦП.

1.Ключевым элементом предлагаемой ИМЛиУЦП является сетевая структура ЦП (рисунок 4). Все члены ЦП (центральная компания (ЦК), а также поставщики, посредники и потребители) рассматриваются нами, как открытые системы [1, 11, 13].

Это позволяет обеспечить четкое понимание того, как осуществляется качественное конфигурирование (построение) сетевой структуры ЦП.

Тремя базовыми аспектами сетевой структуры предприятия являются:

1) участники ЦП;

2) структурные координаты сети;

3) различные типы связей между процессами внутри ЦП.

Они оказывают существенное влияние на структурные координаты сети, а также различные типы связей между процессами внутри ЦП в условиях новой реальности [11, 12, 14–17].

2. Бизнес-процессы (Б/П) или второй элемент предлагаемой ИМЛиУЦП – это управление сертифицированными (прошедшими сертификацию) видами деятельности, предоставляющими потребителям конкретную ценность. При этом, управление продуктовыми (товарными), финансовыми и информационными потоками, а также ключевыми Б/П представляет собой цикл Деминга – Шухарта /PDCA: планирование – (P-plan), деятельность – (D-Do), контроль – (C-Check) и усовершенствование – A(Action). Иными словами, управление обеспечивается следующими восьмью ключевыми Б/П: 1) взаимоотношениями с потребителями; 2) обслуживанием потребителей; 3) спросом; 4) выполнением заказов; 5) производственными потоками; 6) снабжением; 7) разработкой продукции и доведением ее до коммерческого использования; 8) возвратными потоками.

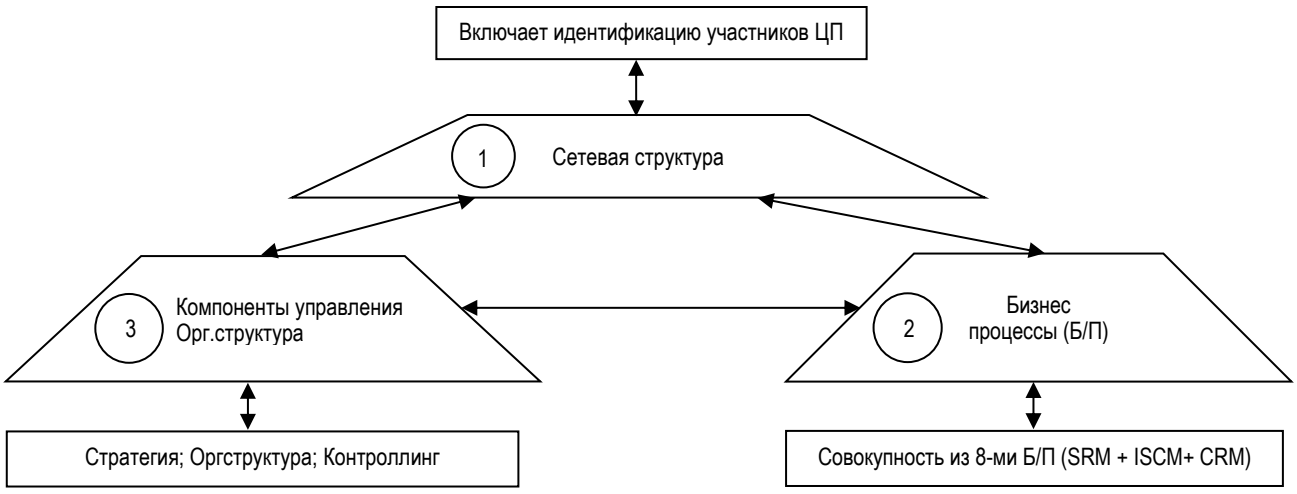


Рисунок 3 – Вариант предлагаемой ИМЛиУЦП, обеспечивающей качественную адаптацию к условиям новой реальности

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-283-289

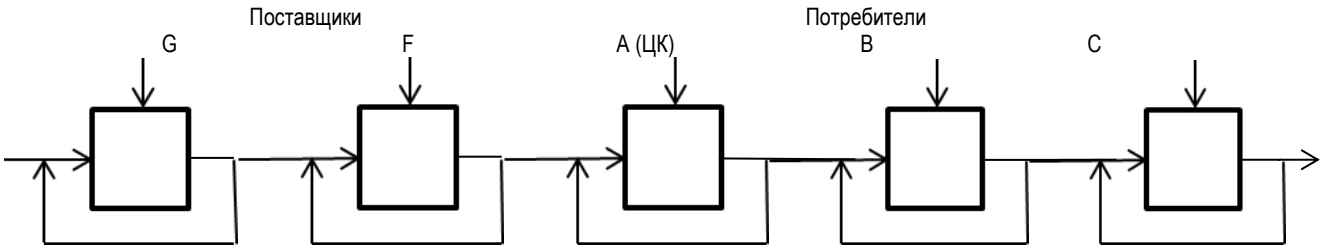


Рисунок 4 – Сетевая структура ЦП (поз. 1 в предлагаемой ИМЛиУЦП)

Для более качественного осмысления изложенной информации, осуществлено графологическое распределение совокупности из указанных (качественно адаптированных и сертифицированных) восьми ключевых Б/П на три макропроцесса ЦП, что представлено на рисунке 5**:** SRM (Supplier Relationship Management) – Управление взаимодействиями с поставщиками (Б/П № 6); ISCM (Internal Supply Chain Management) – Внутрифирменное управление цепочками поставок (Б/П № 5, 7); CRM (Customer Relationship Management) – Управление взаимодействиями с потребителями (Б/П № 1, 2, 3, 4, 8).

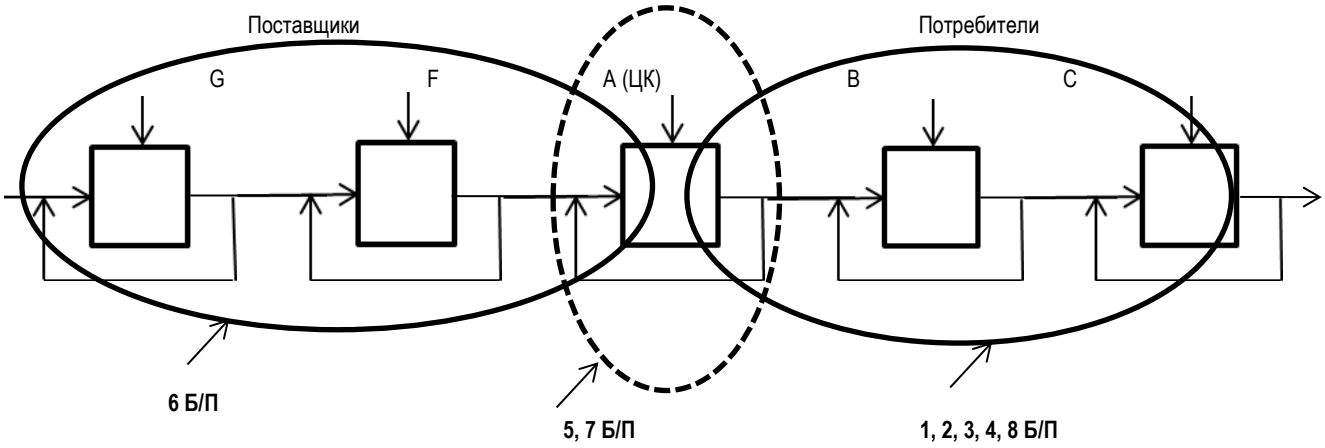


Рисунок 5 – Распределение восьми бизнес-процессов (Б/П) в предлагаемой ИМЛиУЦП, качественно адаптированной к условиям новой реальности

3. Особенностью третьего элемента предлагаемой ИМЛиУЦП является то, что большинство компонентов управления являются общими для всех участников ЦП и Б/П, при этом каждый компонент может иметь несколько составляющих (или субкомпонентов), важность которых варьируется в зависимости от управляемого процесса. В качестве первичных компонентов обычно выделяются физические и технические компоненты управления, а также компоненты управления и поведения, краткое рассмотрение которых осуществлено нами в [11, 12]. Подробнее уделим внимание компонентам, оказывающим определяющее влияние на качественную адаптацию деятельности к условиям новой реальности (сертифицированных в первую очередь и выделенных в таблице 2): стратегии; оргструктуре; контроллингу.

Таблица 2 – Компоненты предлагаемой ИМЛ и УЦП, существенно влияющие на качественную адаптацию деятельности к условиям новой реальности

Компоненты управления	Краткая характеристика компонента
Стратегия	Под логистической *стратегией* понимаются решения, которые направлены на качественную адаптацию деятельности к условиям новой реальности: минимизация логистических издержек и повышение уровня обслуживания путем предоставления услуг очень высокого качества в самых выгодных местах для заказчика. Субъектом управления обычно являются структурируемые элементы и отдельные исполнители, реализующие логистические функции в ЦП
Оргструктура	Качественный анализ свидетельствует, что наибольшее применение находят три варианта организации управления логистикой и УЦП: централизованный; децентрализованный; специализированный (аутсорсинг логистических функций). По первому (централизованному) варианту организации вся деятельность сосредоточена в одном управлении (подразделении) и подчиняется непосредственно высшему руководству предприятия через заместителя директора (вице-президента) по логистике. При децентрализованном способе логистические функции разобщены по разным структурным подразделениям, отсутствует централизация управления. *Аутсорсинг* – предполагает передачу сторонней организации (аутсорсеру) функций по логистическому обслуживанию ЦП
Контроллинг	Традиционно объединяет первые три функции управления (планирование, деятельность, контроль) и направлен на подготовку *с помощью корпоративных информационных систем (КИС),* сведений для принятия управленческих решений при использовании в качестве основного инструмента анализа и регулирования эффективности деятельности, системы сбалансированных показателей (ССП), своеобразного механизма взаимосвязи стратегических замыслов и решений с ежедневными задачами, способ направленного на достижение качественной (конкурентоспособной) деятельности предприятия. На уровне Б/П контроль осуществляется через так называемые, ключевые (качественные) показатели деятельности (в англ. варианте – Key Performance Indicator – KPI)

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-283-289

Практика свидетельствует, что предлагаемая ИМЛиУЦП может быть эффективно использована в условиях новой реальности [11, 13], т. к. позволяет:

– обеспечить новые подходы к получению, обработке и хранению информации, глубже исследовать понимание ценности для потребителей, их мотивы и чувства;

– широко использовать ИИ;

– ускорять процессы создания и обслуживания продукции, заменяя линейные модели моделями с обратными связями;

– заменять натурные эксперименты моделированием, что сокращает потери и повышает эффективность;

– способствовать более глубокому проникновению производителей в процессы потребителя,

– обеспечивать новые отношения по повышению качество логистики и УЦП между заинтересованными сторонами по трем объектам: продукции, системе процессов, системе менеджмента;

– создавать комплексную систему, соответствующую мировой практике логистического обеспечения рынка товародвижения;

– адаптировать инфраструктуры логистической системы и субъектов хозяйствования к необходимым объемам национальной и международной экономики;

– эффективно использоваться в условиях новой реальности [11] за счет интегрирования сертифицированных ключевых Б/П по всем ЦП и управления этими процессами, а также оптимизации главных функций управления с использованием возможностей ИИ и информационных технологий;

– облегчают и упрощают образовательный процесс подготовки специалистов в сфере логистики, реализующих качественную адаптацию к условиям новой реальности.

Заключение

Применительно к условиям новой реальности Республики Беларусь, объявившей 2024 г. Годом качества, период 2025–2029 гг. – Пятилеткой качества, предусматривающим жизненную необходимость противостояния внешним санкциям и активизации выхода на новые международные рынки, представляется целесообразным наиболее пристальное внимание уделить разработке методологии повышения качества логистики и управления цепочками поставок (УЦП), являющихся важнейшим элементом управляемой подсистемы действующих СУКсп предприятий – участников ЦП.

С применением методики тестирования, оценки результатов информационной системой и SWOT-анализа, рассмотрены взаимосвязи и взаимовлияния триадных моделей логистических парадигм, которые позволили разработать инновационную модель логистики и УЦП (ИМЛиУЦП), обеспечивающую качественную адаптацию к новой реальности.

Предлагаемая ИМЛиУЦП представляет собой комбинацию трех усовершенствованных элементов: 1 – сетевой структуры цепочек поставок (ЦП); 2 – бизнес-процессов (Б/П); 3 – компонентов управления. Особенностью инновационного подхода является то, что все члены ЦП (центральная компания, а также поставщики, посредники и потребители) рассматриваются как открытые системы, для которых могут быть построены соответствующие СУКсп; управление товарными, финансовыми и информационными потоками, а также ключевыми бизнес-процессами представляет собой цикл Деминга – Шухарта (PDCA); большинство компонентов управления являются общими для всех бизнес-процессов и участников ЦП, важнейшими из которых являются: стратегия, организационная структура, контроллинг.

Применение ИМЛиУЦП позволяет на более высоком уровне осуществлять интегрирование ключевых бизнес-процессов и оптимизировать главные функции управления с использованием возможностей искусственного интеллекта (ИИ) и информационных технологий, а также (за счет простаты восприятия и изучения) облегчают и образовательный процесс подготовки специалистов в сфере логистики и УЦП, реализующих качественную адаптацию к условиям новой реальности.

Список цитированных источников

1. Немогай, Н. В. Модель системы управления конкурентоспособностью предприятия / Н. В. Немогай, С. Д. Колесников // Стандарты и качество. – 2020. – № 6. – С. 88–93.
2. Немогай, Н. В. Роль подсистемы научного сопровождения в системе управления конкурентоспособностью предприятия / Н. В. Немогай, С. Д. Колесников // Стандарты и качество. – 2021. – № 4. – С. 78–82.
3. Немогай, Н. В. Роль целевой подсистемы в управлении конкурентоспособностью предприятия / Н. В. Немогай, С. Д. Колесников // Стандарты и качество. – 2022. – № 4. – С. 58–62.
4. Фатхутдинов, Р. А. Управление конкурентоспособностью организации : учебник / Р. А. Фатхутдинов. – 3-е изд. – М. : Маркет ДС, 2008. – 432 с.
5. Головачев, А. С. Конкурентоспособность организации : учеб. пособие / А. С. Головачев. – Минск : Выш. шк., 2012. – 319 с.
6. Дыбская, В. В. Логистика: учебник / В. В. Дыбская, В. И. Сергеев. – М. : Эксмо, 2011. – 944 с.
7. Сергеев, В. И. Управление цепями поставок : учебник / В. И. Сергеев. – М. : Юрайт, 2014. – 479 с.
8. Сток, Д. Р. Стратегическое управление логистикой / Д. Р. Сток, Д. М. Ламберт. – М. : ИНФРА-М, 2005. – 520 с.
9. Лукинский, В. С. Модели и методы теории логистики : учеб. пособие / В. С. Лукинский ; под ред. В. С. Лукинского. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2008. – 448 с.
10. Моисеева, Н. К. Экономические основы логистики : учебник / Н. К. Моисеева. – М. : ИНФРА-М, 2014. – 528 с.
11. Немогай, Н. В. Логистика. Управление цепочками поставок: ответы на экзаменационные вопросы / Н. В. Немогай. – Минск : Тетралит, 2013. – 224 с.
12. Немогай, Н. В. Контроллинг в логистике / Н. В. Немогай ; Гомельский филиал Междунар. ун-та «МИТСО». – Минск : Право и экономика, 2019. – 154 с.
13. Немогай, Н. В. Конкурентоспособность предприятия: учебник / Н. В. Немогай, Н. В. Бонцевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – Минск : РИВШ, 2023. – 524 с.
14. Концепция национальной безопасности Республики Беларусь. – URL: https://www.mil.by/ru/military_policy/basic/koncep (дата обращения: 25.09.25).
15. Об объявлении 2024 года Годом качества : Указ Президента Респ. Беларусь от 27 нояб. 2023 г. № 375. – URL: https://etalonline.by/document/?regnum=p32300375 (дата обращения: 25.09.25).
16. Об объявлении 2025–2029 гг. Пятилеткой качества : Указ Президента Респ. Беларусь от 17 янв. 2025г. № 31. – URL: https://pravo.by/novosti/obshchestvenno-politicheskie-i-v-oblasti-prava/2025/january/80289 (дата обращения: 25.09.25).
17. Коваленко, С. А. Swot-анализ национальной экономики Республики Беларусь / С. А. Коваленко, А. А. Минченко // Труд. Профсоюзы. Общество. – 2016. – № 1(51). – С. 27–33.
18. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации : Указ Президента Росс. Федерации от 10 окт. 2019 г. № 490. – URL: http://prezident.org/articles/ukaz-prezidenta-rf-490-ot-10-oktjabrja-2019-goda-11-10-2019.html (дата обращения: 25.09.25).
19. О разработке стратегии развития искусственного интеллекта в Союзном государстве : итоговый документ 10-го форума Совета Федерации Росс. Федерации и Совета Республики Нац. собрания Респ. Беларусь, Москва, 29 июня 2023 г. – URL: http://council.gov.ru/media/files/XXYLsupLBCmlH4FySzw5l8CwBFr4Xjgx.pdf (дата обращения: 25.09.25).
20. Президент Росс. Федерации обновил стратегию развития искусственного интеллекта. – URL: https://www.comnews.ru/content/231631/2024-02-19/2024-w08/1008 (дата обращения: 25.09.25).
21. Министерство промышленности Респ. Беларусь : [сайт] – URL: http://minprom.gov.by (дата обращения: 25.09.25).

References

1. Nemogaj, N. V. Model' sistemy upravleniya konkurentosposobnost'yu predpriyatiya / N. V. Nemogaj, S. D. Kolesnikov // Standarty i kachestvo. – 2020. – № 6. – S. 88–93.
2. Nemogaj, N. V. Rol' podsistemy nauchnogo soprovozhdeniya v sisteme upravleniya konkurentosposobnost'yu predpriyatiya / N. V. Nemogaj, S. D. Kolesnikov // Standarty i kachestvo. – 2021. – № 4. – S. 78–82.
3. Nemogaj, N. V. Rol' celevoj podsistemy v upravlenii konkurentosposobnost'yu predpriyatiya / N. V. Nemogaj, S. D. Kolesnikov // Standarty i kachestvo. – 2022. – № 4. – S. 58–62.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-283-289

4. Fathutdinov, R. A. Upravlenie konkurentosposobnost'yu organizacii : uchebnik / R. A. Fathutdinov. – 3-e izd. – M. : Market DS, 2008. – 432 s.
5. Golovachev, A. S. Konkurentosposobnost' organizacii : ucheb. posobie / A. S. Golovachev. – Minsk : Vysh. shk., 2012. – 319 s.
6. Dybskaya, V. V. Logistika: uchebnik / V. V. Dybskaya, V. I. Sergeev. – M. : Eksmo, 2011. – 944 s.
7. Sergeev, V. I. Upravlenie cepyami postavok : uchebnik / V. I. Sergeev. – M. : YUrajt, 2014. – 479 s.
8. Stok, D. R. Strategicheskoe upravlenie logistikoj / D. R. Stok, D. M. Lambert. – M. : INFRA-M, 2005. – 520 s.
9. Lukinskij, V. S. Modeli i metody teorii logistiki : ucheb. posobie / V. S. Lukinskij ; pod red. V. S. Lukinskogo. – 2-e izd. – SPb. : Piter, 2008. – 448 s.
10. Moiseeva, N. K. Ekonomicheskie osnovy logistiki : uchebnik / N. K. Moiseeva. – M. : INFRA-M, 2014. – 528 c.
11. Nemogaj, N. V. Logistika. Upravlenie cepochkami postavok: otvety na ekzamenacionnye voprosy / N. V. Nemogaj. – Minsk : Tetralit, 2013. – 224 s.
12. Nemogaj, N. V. Kontrolling v logistike / N. V. Nemogaj ; Gomel'skij filial Mezhdunar. un-ta «MITSO». – Minsk : Pravo i ekonomika, 2019. – 154 s.
13. Nemogaj, N. V. Konkurentosposobnost' predpriyatiya: uchebnik / N. V. Nemogaj, N. V. Boncevich. – 3-e izd., pererab. i dop. – Minsk : RIVSH, 2023. – 524 s.
14. Koncepciya nacional'noj bezopasnosti Respubliki Belarus'. – URL: https://www.mil.by/ru/military_policy/basic/koncep (data obrashcheniya: 25.09.25).
15. Ob ob"yavlenii 2024 goda Godom kachestva : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 27 noyab. 2023 g. № 375. – URL: https://etalonline.by/document/?regnum=p32300375 (data obrashcheniya: 25.09.25).
16. Ob ob"yavlenii 2025–2029 gg. Pyatiletkoj kachestva : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 17 yanv. 2025g. № 31. – URL: https://pravo.by/novosti/obshchestvenno-politicheskie-i-v-oblasti-prava/2025/january/80289 (data obrashcheniya: 25.09.25).
17. Kovalenko, S. A. Swot-analiz nacional'noj ekonomiki Respubliki Belarus' / S. A. Kovalenko, A. A. Minchenko // Trud. Profsoyuzy. Obshchestvo. – 2016. – № 1(51). – S. 27–33.
18. O razvitii iskusstvennogo intellekta v Rossijskoj Federacii : Ukaz Prezidenta Ross. Federacii ot 10 okt. 2019 g. № 490. – URL: http://prezident.org/articles/ukaz-prezidenta-rf-490-ot-10-oktjabrja-2019-goda-11-10-2019.html (data obrashcheniya: 25.09.25).
19. O razrabotke strategii razvitiya iskusstvennogo intellekta v Soyuznom gosudarstve : itogovyj dokument 10-go foruma Soveta Federacii Ross. Federacii i Soveta Respubliki Nac. sobraniya Resp. Belarus', Moskva, 29 iyunya 2023 g. – URL: http://council.gov.ru/media/files/XXYLsupLBCmlH4FySzw5l8CwBFr4Xjgx.pdf (data obrashcheniya: 25.09.25).
20. Prezident Ross. Federacii obnovil strategiyu razvitiya iskusstvennogo intellekta. – URL: https://www.comnews.ru/ content/231631/2024-02-19/2024-w08/1008 (data obrashcheniya: 25.09.25).
21. Ministerstvo promyshlennosti Resp. Belarus' : [sajt] – URL: http://minprom.gov.by (data obrashcheniya: 25.09.25).

Материал поступил 06.11.2025, одобрен 10.11.2025, принят к публикации 21.11.2025

УДК 338.242.2

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А. С. Новиков

Соискатель кафедры экономического развития и менеджмента, Академия управления при Президенте Республики Беларусь, Минск, Беларусь, e-mail: novikov25@tut.by

Реферат

В данной научной статье исследованы различные подходы в области оценки состояния научно-технологической безопасности. Для этих целей анализу подверглась значительная теоретическая и нормативная база. Проводится анализ научной литературы на предмет исследования различных аспектов оценивания научно-технологического развития и (или) научно-технологической безопасности, в том числе на региональном уровне. Выделены общие критерии, которым должны соответствовать показатели, используемые для оценки научно-технологического и (или) образовательного потенциалов. Определены соответствующие показатели. Приведены методологические подходы, которые могут быть использованы для установления пороговых значений показателей состояния научно-технологической безопасности. Установлены пороговые значения на 2025 год с учетом практического опыта Республики Беларусь. Разработана методика оценки показателей, позволяющей комплексно оценить состояние научно-технологической безопасности, в том числе провести уровневую оценку.

Актуальность представлена важностью обеспечения научно-технологической безопасности для развития национальной экономики Республики Беларусь, что невозможно без проведения ее оценки. Сегодня вопросы обеспечения технологического развития выступают одним из основных ориентиров экономического развития страны.

Цель исследования: разработать методику оценки состояния научно-технологической безопасности, допускающую возможность проведения уровневой оценки.

Материалы и методы: в процессе подготовки статьи использовалась научная литература, официальная статистическая информация, нормативные правовые акты, определяющие содержание государственных программ в области социально-экономического развития, инноваций и науки.

Результаты и выводы: выделены общие подходы к оценке научно-технологической безопасности. Определен алгоритм такой оценки. Разработана методика оценки научно-технологической безопасности, представляющая собой определенную последовательность действий, применяемых в отношении конкретных объектов или процессов, определяющих НТБ. Методика включает такие логически связанные между собой этапы, как: определение предмета оценки, выделение показателей, которые будут использованы для ее проведения, установление пороговых значений соответствующих показателей, разработку методики их оценки, которая будет предоставлять возможность комплексной оценки состояния НТБ; а также анализ полученных результатов.

Назначение исследования состоит в разработке методики оценки состояния научно-технологической безопасности.

Ключевые слова: методика оценки, научно-технологическое развитие, научно-технологическая безопасность, научно-технологический потенциал, образовательный потенциал, инновационное развитие, государственные программы.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE STATE OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL SECURITY

A. S. Novikov

Abstract

This research article examines various approaches to assessing the state of scientific and technological security. A significant theoretical and regulatory framework was analyzed for these purposes. The article examines the scientific literature for various aspects of assessing scientific and technological development and/or scientific and technological security, including at the regional level. General criteria are identified that must be met by indicators used to assess scientific, technological and/or educational potential. Corresponding indicators are defined. Methodological approaches that can be used to establish threshold values for scientific and technological security indicators are presented. These threshold values are established for 2025, taking into account the practical experience of the Republic of Belarus. A methodology for assessing indicators has been developed that allows for a comprehensive assessment of the state of scientific and technological security, including a tiered assessment.

Relevance: The importance of ensuring scientific and technological security for the development of the national economy of the Republic of Belarus is recognized, and this cannot be achieved without its assessment. Today, issues of technological development are one of the main guidelines for the country's economic development.

Research Objective: Develop a methodology for assessing the state of scientific and technological security that allows for a tiered assessment.

Materials and Methods: Scientific literature, official statistical information, and regulatory legal acts defining the content of state programs in the field of socio-economic development, innovation, and science were used in preparing this article.

Results and Conclusions: General approaches to assessing scientific and technological security are identified. An algorithm for such an assessment is defined. A methodology for assessing scientific and technological security has been developed, representing a specific sequence of actions applied to specific objects or processes that determine scientific and technological security.

The methodology includes logically interconnected steps such as: defining the subject of the assessment, identifying the indicators that will be used for its implementation, establishing threshold values for the relevant indicators, developing an assessment methodology that will enable a comprehensive assessment of the state of scientific and technological security; and analyzing the obtained results.

The purpose of this study is to develop a methodology for assessing the state of scientific and technological security.

Keywords: assessment methodology, scientific and technological development, scientific and technological security, scientific and technological potential, educational potential, innovative development, government programs.

Введение

Влияние современных технологий на все процессы, происходящие в обществе, и в первую очередь, на экономические отношения, предопределило необходимость проведения оценки состояния научно-технологической безопасности (сокр. НТБ). В качестве одной из главных целей законодательного закрепления данного термина

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-290-297

с сопутствующим введением в сферу административных отношений можно обозначить получение возможности оценки составляющих НТБ – а именно, образовательного и (или) научно-технологического потенциалов – для того, чтобы воздействовать на них в случае признания их состояния неудовлетворительным.

Методические подходы к оценке состояния научно-технологической безопасности

Важность научно-технологической безопасности для развития национальной экономики обусловила значительный интерес исследователей к оценке различных аспектов в области ее обеспечения и научно-технологического развития в целом.

Существенный вклад в разработку методических основ оценивания НТБ внес А. Е. Варшавский [1–3]. А. И. Ладынину удалось разработать систему индикаторов оценки НТБ России [4], в том числе с использованием биржевых индексов, в целях прогнозирования ее изменений [5.] И. М. Алиев и И. В. Батарин рассмотрели научно-технологический потенциал в качестве основы роста уровня жизни населения [6]. О. Ю. Кожукалова исследовала научно-технологический потенциал для определения направления его повышения [7]. А. Е. Николаев разработал методику оценки состояния научно-технологического потенциала на основании исследования оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации [8].

Значительное внимание уделяется научным сообществом исследованию и оценке научно-технологического развития не только на национальном, но и на региональном уровне. В частности, А. Н. Сенько на основе прогнозирования оценила научно-технологическое развитие регионов Республики Беларусь [9]. А. Н. Гончарова проанализировала имеющиеся методические подходы к научно-технологическому и инновационному развитию региона [10]. П. Н. Захаров рассматривает оценку научно-технического потенциала регионов как один из способов повышения эффективности его управления [11]. Н. Н. Волкова и Э. И. Романюк использовали рейтинговую систему в целях оценки регионального научно-технологического развития [12]. Рейтинговая система также использовалась Т. В. Усковой и К. А. Устиновой как инструмент оценки научно-технологического потенциала [13]. М. Р. Гафаров применил дихотомический подход в качестве основы анализа и оценки регионального развития [14].

Вместе с тем, необходимо отметить, что специфика научно-технологического развития Республики Беларусь не в полной мере отражена в научных публикациях.

Исходя из содержания определения научно-технологической безопасности, закрепленного в Концепции национальной безопасности Республики Беларусь (сокр. КНБ), [15] можно выделить не менее двух подходов к ее оценке. Они различаются предметом:

1) в качестве приоритета рассматриваются научно-технологический и (или) образовательный потенциалы. Главная задача в рамках данного подхода – достижение такого уровня выше указанных потенциалов, при котором заявленные в КНБ угрозы не приведут к значительным негативным последствиям для них или национальной экономики;

2)обозначение в качестве главной цели оценки угроз, препятствующих проведению научной деятельности, технологическому развитию, созданию и внедрению инноваций в производственный процесс. В данном случае деятельность по обеспечению НТБ сводится, в основном, к противодействию прежде всего внешним угрозам безопасности в научно-технологической сфере, например, снижению эффективности санкционных ограничений.

Первый подход в большей степени ориентирован на борьбу с внутренними угрозами в научно-технологической сфере, второй на нейтрализацию внешних угроз, обозначенных в КНБ.

В процессе практического обеспечения научно-технологической безопасности целесообразно применять два подхода одновременно, т. к. анализ внешних и внутренних угроз в научно-технологической сфере указывает на недостаточность только одного подхода. При этом считаем целесообразным разработать методику оценки состояния научно-технологической безопасности на основе первого подхода, поскольку:

1) он основан на укреплении научно-технологического и образовательных потенциалов, стимулирующих экономический рост страны;

2) его проще реализовать на практике, поскольку он в значительной степени зависит от усилий участников; 3) может выступить в качестве основы достижения не только НТБ, но и обеспечения научно-технологического развития страны в целом, что окажет комплексное воздействие на национальную экономику.

Общий порядок действий (алгоритм), который, который можно использовать в целях оценки НТБ и последующего воздействия на ее предметную область включает следующие этапы:

1) определение объектов воздействия, которые подлежат оценке. Руководствуясь определением НТБ как состояния защищенности научно-технологического и образовательного потенциалов от угроз, препятствующих развитию научной деятельности, созданию и внедрению инноваций и передовых технологий в реальный сектор экономики и другие сферы можно сделать вывод о том, что такими объектами будут научно-технологический и (или) образовательный потенциалы;

2) анализ объектов воздействия с целью определения присущих им признаков (характеристик). Необходимо установить конкретные свойства, качества, черты, по которые можно будет оценить объекты оценки;

3) выделение показателей оценки объектов воздействия, с помощью которых можно зафиксировать их характерные признаки;

4) разработка методики оценки на основе обозначенных показателей. Такая методика должна объективно и комплексно отражать состояние научно-технологического и (или) образовательных потенциалов;

5) проведение оценки состояния НТБ, анализ результатов;

6) в случае необходимости воздействие на объекты оценки в целях изменения их характеристик исходя из имеющихся средств.

Проведение оценки состояния научно-технологической безопасности исходя из оценки состояния научно-технологического и (или) образовательного потенциалов предполагает возможность использования не менее двух соответствующих подходов: базовый (стандартный) подход и соответствующая методика и комплексный (более сложный) подход, предполагающий применение большего количества показателей оценки, а также возможность мониторинга. В рамках обоих подходов возможно проведение качественной оценки по результатам количественной с применением различных методов, в частности, метода аналогии, экспертных оценок и др.

Базовая методика кажется наиболее подходящей при проведении оценки НТБ уполномоченными государственными органами в первую очередь вследствие тех преимуществ, которые она предоставляет. К таким преимуществам относятся: простота оценки, скорость, конкретный результат.

Базовая методика оценки предполагает использование ограниченного набора показателей, которые комплексно характеризуют состояние научно-технологического и (или) образовательного потенциалов.

В рамках более сложного (комплексного) подхода к оценке НТБ предполагается применение большего количества показателей оценки, способных оценить состояние научно-технологической сферы в целом. Такой подход целесообразно применять в первую очередь в научных целях, поскольку научно-технологическая сфера характеризуется большим количеством субъектов, значительно различающихся между собой в том числе исходя из подчиненности. Это делает затруднительным возможность влияния на данные субъекты.

Авторская методика оценки состояния научно-технологической безопасности представляет собой определенную последовательность действий, применяемых в отношении конкретных объектов или процессов, определяющих научно-технологическую безопасность. Методика включает следующие этапы:

1) определение предмета оценки. Предметом оценки выступят научно-технологический и (или) образовательный потенциал;

2) определение показателей НТБ, которые будут использованы для оценки ее состояния. Такие показатели должны характеризовать предметную область научно-технологической безопасности;

3) установление пороговых значений индикаторов (показателей) состояния НТБ. Данные пороговые значения индикаторов (показателей) будут являться пороговыми для определения состояния научно-технологического и (или) образовательного потенциалов;

4) разработка методики оценки показателей НТБ, позволяющей провести ее комплексную оценку; анализ результатов.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-290-297

По результатам оценки состояния НТБ компетентные государственные органы при необходимости могут принять решение о применении соответствующих мер, направленных на ее обеспечение.

Раскроем содержание вышеуказанных этапов (этапов разработки и применения методики НТБ) с использованием научных методов анализа, синтеза, индукции, дедукции.

1. Определение предмета оценки.

В процессе проведения оценки научно-технологической безопасности ее предметом целесообразно определить научно-технологический и (или) образовательный потенциалы. Вместе с тем, относительно вопроса оценки образовательного потенциала в рамках оценки НТБ необходимо отметить, что вопрос о такой оценке носит дискуссионный характер. В процессе обеспечения НТБ образовательный потенциал удовлетворяет потребность субъектов, создающих научно-технологический потенциал, в компетентных кадрах, способных проводить исследования, создавать новые и развивать имеющиеся технологии. Вместе с тем, необходимо обозначить ряд причин, по которым оценка образовательного потенциала в рамках оценки НТБ, нецелесообразна. К таким причинам относятся следующие:

1) основное предназначение образовательных учреждений в виде предоставления образования не связано с созданием научно-технологического потенциала. Оно направлено на формирование его кадровой основы;

2) наличие большого количества специалистов, способных проводить научные исследования, не приведет к автоматическому росту научно-технологического потенциала. Возможности реализации образовательного потенциала таких специалистов ограничены материальными и иными ресурсами работодателей;

3) задача по организации образовательного процесса решается компетентными государственными органами в рамках других направлений, не связанных с НТБ. Здесь можно отметить обеспечение плана набора абитуриентов на определенные специальности, подготовку специалистов по конкретным направлениям для заказчиков и др.

Таким образом, в условиях решения задачи по поддержанию необходимого уровня образовательного потенциала за счет иных, не связанных с НТБ, направлений государственной политики, делает ее обеспечение в рамках НТБ избыточной.

В рамках данной базовой методики ориентация исключительно на научно-технологический потенциал повысит ее эффективность.

При этом необходимо отметить, что оценка образовательного потенциал возможна в рамках комплексного подхода, а также в процессе проведения научных исследований в целях разработки методологии оценки НТБ.

Таким образом, при проведении оценки НТБ оцениваться будет научно-технологический потенциал. Поскольку он имеет нематериальную форму, необходимо исследовать положение и деятельность создающих его субъектов [16].

2. Определение показателей оценки.

С учетом содержания пункта 1 показатели оценки НТБ будут определены на основании положения и деятельности субъектов научно-технологического комплекса и иных участников процесса создания научно-технологического потенциала страны. В число таких участников входят научные и иные организации, которые проводят фундаментальные и (или) прикладные научные исследования, научно-исследовательские, опытно-конструкторские и опытно-технологические работы (сокр. НИОК(Т)Р), предприятия реального сектора экономики, создающие или внедряющие инновации, резиденты научно-технологических парков, свободных экономических зон и др.

Для оценки научно-технологического потенциала можно использовать достаточно большое количество показателей [17]. При этом не все показатели, отражающие состояние научно-технологического потенциала, могут быть использованы для оценки НТБ.

Посредством теоретических методов научного исследования выделим критерии (условия), которым должны соответствовать показатели оценки научно-технологического и (или) образовательного потенциалов для оценки НТБ.

1. Доступность. Информация по применяемым показателям, в том числе их фактические величины, должны быть доступны исследователю.

2. Реализуемость. Отобранные исследователем показатели должны предоставлять возможность проведения практической оценки.

3. Объективность. Используемые для оценки показатели должны объективно отражать состояние НТБ и (или) научно-технологического и (или) образовательных потенциалов.

4. Достаточность. Применяемые показатели должны в полной мере отражать состояние НТБ и (или) обозначенных потенциалов.

5. «Местный» характер. Используемые показатели должны учитывать специфику национальной экономики, особенности государственной политики в области социально-экономического развития, научной сферы, технологий и инноваций и т. д.

6. Тесная связь с национальной экономикой. Отобранные показатели должны комплексно отражать состояние национальной экономики посредством анализа состояния научно-технологического и (или) образовательного потенциалов.

Данный критерий обусловлен всеобъемлющим характером научно-технологического развития и связанной с ней научно-технологической безопасности по отношению к национальной экономике.

Необходимо обязательно указать на дополнительный критерий, соблюдение которого необходимо именно для оценки научно-технологической безопасности – управляемость. Применение данного критерия по отношению к показателям оценки НТБ обусловлено целью ее нормативного закрепления, а именно, возможностью управления НТБ через воздействие на научно-технологический и (или) образовательный потенциалы.

В рамках использования базовой методики оценки НТБ выбор показателей для ее проведения значительно ограничен. Такие показатели широко известны, они содержатся в программных документах, связанных с обеспечением социально-экономического и инновационного развития Республики Беларусь, в частности, Концепции национальной безопасности Республики Беларусь (сокр. КНБ), Программе социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы (сокр. ПСЭР 2021-2025) и проекте аналогичной программы на 2026–2030 годы (сокр. ПСЭР 2026-2030), Государственной программе инновационного развития Республики Беларусь (сокр. ГПИР 2021-2025 или ГПИР 2026-2030), Программе деятельности Правительства на 2025–2029 годы (сокр. ПДП 2025-2029), Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года (сокр. НСУР 2035).

Выбор программных документов, определяющих социально-экономическое и инновационное развитие Республики Беларусь, обусловлен наличием тесной связи между экономической и научно-технологической безопасностью [18].

При этом все обозначенные программные документы кроме НСУР 2035 утверждаются соответствующими нормативными правовыми актами и таким образом они вводятся в сферу административных отношений [19].

Показатели, которые могут быть использованы в упрощенной методике оценки состояния НТБ указаны в таблице 1.

Выбор обозначенных в таблице 1 показателей оценки научно-технологической безопасности определяется следующими обстоятельствами:

1) показатели соответствуют применяемым к ним общим критериям вследствие чего они предоставляют возможность проведения оценки НТБ;

2) комплексно оценивают состояние научно-технологического потенциала, и прежде всего наиболее важной для национальной экономики его части – результативной;

3) показатели исходя из своей специфики отражают состояние национальной экономики, и в первую очередь ее реального сектора, наиболее значимого для жизнедеятельности современного общества;

4) содержаться в официальных программных документах, то есть нормативно закреплены;

5) вследствие нормативного закрепления являются обязательными к исполнению (обеспечению) соответствующими государственными органами, и иными субъектами;

6) в соответствии с пунктами 3 и 4, данные показатели управляемы.

Необходимо отметить, что главным обстоятельством, обусловившим выбор данного конкретного набора показателей, было их нормативное закрепление в официальных программных документах Республики Беларусь.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-290-297

Таблица 1 – Показатели оценки состояния НТБ

№ п/п	Наименование показателя	Значение	Источник
1.	Удельный вес организаций обрабатывающей промышленности, осуществляющих затраты на инновации, в общем числе организаций обрабатывающей промышленности	Используется для определения процентного соотношения осуществляющих затраты на инновации организаций обрабатывающей промышленности от их общего количества	ПСЭР 2021-2025, ГПИР 2026-2030, ПДП 2025-2029
2.	Доля организаций, осуществляющих инновации бизнес-процессов, в общем количестве организаций обрабатывающей промышленности, осуществляющих затраты на инновации	Используется для выделения среди организаций обрабатывающей промышленности, осуществляющих затраты на инновации, те организации, которые осуществляли инновации бизнес-процессов	ГПИР 2026-2030, ПДП 2025-2029
3.	Доля отгруженной инновационной продукции новой для внутреннего или мирового рынка в общем объеме отгруженной инновационной продукции (работ, услуг) организаций обрабатывающей промышленности*	Используется для определения среди отгруженной инновационной продукции (работ, услуг) организаций обрабатывающей промышленности той части, которая является новой для внутреннего или мирового рынка	ГПИР 2026-2030, НСУР 2035
4.	Доля экспорта наукоемкой и высокотехнологичной продукции в общем объеме белорусского экспорта**	Позволяет выделить в белорусском экспорте часть, являющуюся наукоемкой и высокотехнологичной продукции	-//-
5.	Удельный вес отгруженной инновационной продукции (работ, услуг) в общем объеме отгруженной продукции (работ, услуг) организаций обрабатывающей промышленности)	Используется для определения процентного соотношения инновационной продукции (работ, услуг) в общем объеме отгруженной продукции организаций обрабатывающей промышленности	ПСЭР 2021-2025, ГПИР 2021-2025
6.	Внутренние затраты на НИОК(Т)Р, в % от ВВП	Используется для определения наукоемкости ВВП как соотношения затрат на НИОК(Т)Р к объему ВВП	КНБ, ПСЭР 2026-2030, НСУР 2035

** С учетом новой или значительно улучшенной продукции для внутреннего или мирового рынка.*

*** С учетом высокотехнологичных и среднетехнологичных товаров высокого уровня, наукоемких высокотехнологичных, финансовых и рыночных услуг.*

Источник: разработка автора на основании [20–24].

3. Установление пороговых значений показателей (индикаторов) состояния научно-технологической безопасности.

Установление пороговых значений показателей состояния НТБ является ключевым этапом при последующем создании и использовании методики оценки НТБ. Наличие пороговых значений позволяет произвести разграничение состояния научно-технологического потенциала и за счет этого определить наличие НТБ.

На установление конкретных пороговых значений показателей влияют различные обстоятельства, обусловленные внешними и внутренними факторами, такими как текущая ситуация в экономике, ее особенности, имеющийся опыт экономического развития, действия внешних игроков, наблюдаемые тенденции и др.

В целом, исходя из опыта Республики Беларусь и других стран, в том числе исторического, можно выделить следующие методические подходы к определению пороговых величин показателей состояния научно-технологического потенциала и (или) научно-технологической безопасности:

1) использование в качестве основы для проведения оценки экономического и иного потенциала исключительно собственного опыта, что наряду с использованием общеизвестных требовало разработку собственных показателей оценки. Это исторически первый подход, ориентированный на построение независимой национальной экономической системы. В качестве примера можно привести Советский Союз, экономическая система которого полностью отличалась от систем капиталистических стран, были введены в оборот показатель «трудодень», понятие «пятилетка» и др.;

2) ориентация на других участников международных экономических отношений, в том числе на международные организации, специализирующиеся на конкретной области, например, на технологическом развитии. Такой подход предполагает использование зарубежного опыта оценки, в том числе по показателям, связанным с научной деятельностью. Примером такого подхода является показатель «внутренние затраты на НИОК(Т)Р» (наукоемкость ВВП), его общепризнанное пороговое значение, необходимое для воспроизведения научно-технологического потенциала страны, составляет 1 % [25].

Необходимо также отметить, что членство в составе какого-либо над- или межгосударственного объединения, налагает на государство определенные обязательства в части конкретных пороговых значений показателей, например, ставки таможенных пошлин или уровня поддержки определенной отрасли экономики [26];

3) смешанный подход, основанный на использовании собственного опыта экономического развития, с использованием внешних практик, признанных наиболее успешными.

Данный подход является наиболее распространенным среди национальных государств. Он применяется в том числе в Республике Беларусь. При таком подходе пороговые значения показателей в области социально-экономического развития устанавливаются исходя из фактически достигнутого результата предыдущих периодов с учетом международного опыта. Примером являются ПСЭР 2021-2025 и 2026-2030, ГПИР за аналогичные периоды. Международный опыт заимствуется, как правило, за счет адаптации международных стандартов и отраженных в них величин показателей.

В данной связи применение смешанного подхода к определению пороговых значений показателей из таблицы 1 представляется наиболее целесообразным.

Анализ вариантов такого определения с учетом практики по достижению указанных показателей позволяет выделить следующие возможные теоретические подходы к определению пороговых значений показателей:

А) применение наименьшей величины показателя, фактически достигнутого за определенный период. В данном случае наименьшее значение показателя можно определить, как пороговое. Падение ниже него будет являться критическим;

Б) применение наибольшей величины показателя, фактически достигнутого за определенный период. Необходимость достижения такой величины показателя будет стимулировать исполнителей к действиям;

В) установление величины показателя, превышающего фактически достигнутый за определенный период. В таком случае показатель можно охарактеризовать как «напряженный», требующий активных действий;

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-290-297

Г) установление среднеарифметического значения величины показателя исходя из определенного периода времени, например, пятилетнего;

Д) установление «динамического» порогового значения показателя, предполагающего определенный рост, в некоторых случаях непостоянный. В таком случае пороговое значение можно рассчитать, как фактически достигнутое за предыдущий период + рост на n-количество процентов.

При этом предполагается рост показателя, возможно, непостоянный (отсутствует падения показателя).

N-процент рассчитывается посредством анализа динамики фактически достигнутых величин показателя за определенный период, а также с использованием внешней связанной с процессом величины.

За основу расчета пороговых значений величин показателей был взят подход Д, являющийся, по нашему мнению, наиболее целесообразным, поскольку он предполагает рост значений показателей, обеспечивает возможность их достижения и одновременно стимулирует исполнителей к активной деятельности.

Авторская методика расчета показателей предполагает следующее:

Основой выступит фактически достигнутое значение показателя за предыдущий год, к которому прибавляется n-процент от этого значения. По общему правилу (в случае роста ВВП) N – процент соответствует годовому процентному росту ВВП по сравнению с предыдущим годом с округлением до целого числа.

В случае, если по итогам года не удалось достичь роста значения показателя на n-процент и при этом имелся какой-то рост, тогда на следующий год за основу берется фактически достигнутый результат этого года и прибавляется n-процент этого года.

Если как рост, так и падение фактического значения показателя в отчетном году отсутствовали, тогда в следующем году берется за основу фактически достигнутый результат этого года и прибавляется n-процент этого года.

В случае, если по результатам отчетного периода произошло падение фактического значения показателя по отношению к прошлогоднему, на следующий год сохраняется значение показателя для этого года и прибавляется n-процент этого года.

В случае, если по результатам отчетного года роста ВВП не наблюдалось или отмечается его падение, тогда n-процент рассчитывается как среднеарифметическое роста показателя за предыдущие периоды (пять лет). Если такого роста не было, тогда n-процент не прибавляется.

Общее правило применения методики расчета порогового значения показателей: пороговые значения величин показателей, установленных для оценки НТБ, не могут существенно (более 10 %) превышать плановые значения для показателей, установленных профильными нормативными правовыми актами (ПСЭР, ГПИР).

Данное правило вводится в связи с отсутствием механизмов, обеспечивающих достижение значений показателей, выше установленных программными документами.

Рассчитанные в соответствии с авторской методикой пороговые значения показателей состояния НТБ на 2025 год на основе статистических данных за 2024 год (по показателю «внутренние затраты на НИОК(Т)Р, в % от ВВП» за 2023 год) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Пороговые значения показателей состояния НТБ на 2025 год

№ п/п *	Пороговое значение показателя, % *
1.	31,4
2.	33,3
3.	54
4.	38,1
5.	24,3
6.	0,6

** соответствует номеру и наименованию показателя в таблице 1.*

Источник: разработка автора с учетом [27, 28].

4. Разработка и применение методики оценки показателей, оценка результатов.

По результатам определения показателей оценки и установления их пороговых значений необходимо приступить к разработке методики оценки состояния научно-технологической безопасности посредством оценки состояния научно-технологического потенциала.

Для определения степени достижения порогового значения показателей оценки НТБ предлагается использовать сравнение фактически достигнутых величин показателей и плановых, установленных соответствующим нормативным правовым актом. В данном случае будет иметь место количественная оценка (оценка эффективности показателя), применяется формула

$$Ef1=\frac{R1}{P1},$$

где 1 – порядковый номер оцениваемого показателя;

R – фактически достигнутая величина показателя;

P – нормативно установленная величина показателя.

Источник: разработка автора на основе [22].

По общему правилу эффективность показателя должна быть равна единице (1), то есть фактические (достигнутые) величины показателей и нормативно установленные (плановые) должны совпадать.

Если фактические (достигнутые) величины превышают плановые, тогда тоже будет единица (1).

Приравняем 1 к 100 для облегчения расчетов, исходя из порогового значения показателей НТБ из таблицы 2.

Состояние научно-технологического потенциала, соответствующее НТБ как комплексному явлению, в таком случае должно представлять собой достижение плановых значений всех шести показателей, то есть в сумме равняться 600 (суммирование процентной эффективности (R/P * 100 %) по каждому из шести показателей).

Таким образом, НТБ должна соответствовать формуле Ef1 + Ef2 + Ef3 + Ef4 + Ef5 + Ef6 = 600.

В других случаях, кроме достижения 600, итоговый результат необходимо каким-либо образом интерпретировать (оценивать).

При этом необходимо провести дифференциацию состояния научно-технологической безопасности, то есть проводится выделение соответствующих уровней.

За основу такой оценки и выделения уровней по отношению к индивидуальным достигнутым показателям, а также итоговому результату суммы фактически достигнутых величин показателей целесообразно взять функцию желательности Е. Харрингтона [29, с. 7]. Ее стандартные отметки представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Стандартные отметки на шкале желательности Е. Харрингтона

Желательность	Отметки на шкале желательности
Очень хорошо	1,00–0,80
Хорошо	0,80–0,63
Удовлетворительно	0,63–0,37
Плохо	0,37–0,20
Очень плохо	0,20–0,00

Источник: [30, с. 55].

Исходя из практики достижения в Республики Беларусь указанных в таблице 1 показателей адаптируем содержание таблицы 3 в таблице 4.

Данная адаптация стандартных отметок на шкале желательности Е. Харрингтона необходима в связи с тем, что фактическое достижение показателей из таблицы 1 в Республике Беларусь никогда не опускалось ниже 0,7.

В связи с вероятностью возникновения ситуации, когда один или более показатель оценки НТБ из таблицы 1 будут находиться на критическом уровне, количественную уровневую оценку состояния научно-технологической безопасности, отраженную в таблице 4, необходимо дополнить качественной уровневой оценкой состояния НТБ.

В таблице 5 приведен один из возможных вариантов проведения качественной уровневой оценки состояния НТБ на основе (не)достижения пороговых значений показателей.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-290-297

Таблица 4 – Адаптированные отметки на шкале желательности Е. Харрингтона для оценки состояния НТБ

Желательность	Отметки на шкале желательности	Уровневая оценка состояния показателя, в %	Уровневая оценка состояния научно-технологической безопасности (сумма баллов)
Удовлетворительно	1,00–0,80	100–80	600–480
Не удовлетворительно	0,79–0,60	79–60	479–360
Критический уровень	0,59–0,00	59–0	359–0

Источник: собственная разработка автора.

Таблица 5 – Качественная уровневая оценка состояния НТБ

№ п/п показателя	1	2	3	4	5	6	Уровневая оценка состояния НТБ	Правило применения и порог состояния уровня НТБ
Значение показателя согласно таблице 4	У	У	У	У	НУ	НУ	У	Состояние НТБ оценивается как удовлетворительное при следующих значениях показателей: от шести до трех включительно У, остальные не ниже, чем НУ.
	У	У	НУ	НУ	К	К	НУ	Состояние НТБ оценивается как неудовлетворительное при следующих значениях показателей: от шести до четырех включительно не ниже НУ.
	НУ	НУ	НУ	К	К	К	К	Состояние НТБ оценивается как критическое (опасное) при следующих значениях показателей: от трех до шести К.

** У – удовлетворительно, НУ – неудовлетворительно, К – критический уровень (опасно)*

Источник: собственная разработка автора.

В зависимости от результатов проведения уровневой оценки состояния научно-технологической безопасности возможно применение следующих рекомендаций (мер) по воздействию на научно-технологический потенциал с целью обеспечения НТБ в зависимости от ее уровня.

Таблица 6 – Рекомендации (меры) по воздействию на научно-технологический потенциал с целью обеспечения НТБ в зависимости от ее уровня

Уровневая оценка состояния научно-технологической безопасности (сумма баллов)	Меры по воздействию на научно-технологический потенциал
Удовлетворительно	Предлагается несущественная корректировка действующих программ и мероприятий, которые направлены на повышение научно-технологического потенциала, с целью повышения их эффективности: перераспределение финансирования, выделение его на новые направления, расширение круга исполнителей, их замена и др.
Не удовлетворительно	Возможна существенная корректировка действующих программ и мероприятий, которые направлены на повышение научно-технологического потенциала, в части перераспределения финансирования, выделения средств по новым направлениям развития. Целесообразна разработка и реализация новых средств и методов в рамках действующего курса
Критический уровень	Необходима существенная корректировка действующих программ и мероприятий, которые направлены на повышение научно-технологического потенциала, в том числе перераспределение финансирования, выделение средств на иные перспективные направления развития. Возможна корректировка действующего курса, в том числе поиск дополнительных источников повышения научно-технологического потенциала

Источник: собственная разработка автора.

В заключение необходимо отметить, что методика оценки состояния научно-технологической безопасности, представляющая собой определенную последовательность действий, применяемых в отношении конкретных объектов или процессов, определяющих НТБ, включает такие логически связанные между собой этапы, как: определение предмета оценки, выделение показателей, которые будут использованы для ее проведения, установление пороговых значений соответствующих показателей, разработку методики их оценки, которая будет предоставлять возможность комплексной оценки состояния НТБ; а также анализ полученных результатов.

Фактическая реализация каждого этапа зависит от значительного количества обстоятельств, в том числе состояния национальной экономики, характера государственной политики в области социально-экономического развития, науки, технологий, инноваций, действий других участников международных экономических отношений и т. д.

Список цитированных источников

1. Варшавский, А. Е. Методические принципы оценивания научно-технологической безопасности России / А. Е. Варшавский // Вестник Московского университета. Серия 25: Международные отношения и мировая политика. – 2015. – Т. 7, № 4. – С. 73–100.
2. Анализ показателей развития и распространения высокотехнологичной продукции (на примере робототехники и мобильных устройств / А. Е. Варшавский, Т. А. Комкина, Е. В. Кочеткова [и др.] // Экономический анализ: теория и практика. – 2022. – № 21 (10). – С. 1951–1978.
3. Варшавский, А. Е. Пространственное неравенство и центростремительное движение населения России: угрозы экономической, научно-технологической и национальной безопасности / А. Е. Варшавский // Концепции. – 2018. – № 1 (37). – С. 3–27.
4. Ладынин, А. И. Система индикаторов научно-технологической безопасности России / А. И. Ладынин // Мир экономики и управления. – 2022. – № 2. – С. 23–35.
5. Ладынин, А. И. Краткосрочные биржевые индексы как инструмент оценки и прогнозирования научно-технологической безопасности / А. И. Ладынин // Russian Technological Journal. – 2024. – № 12 (6). – С. 113–126.
6. Алиев, И. М. Наращивание научно-технологического потенциала как основа роста уровня и качества жизни населения / И. М. Алиев, И. В. Батарин // Beneficium. – 2022. – № 2 (43). – С. 6–14.

7. Кожукалова, О. Ю. Механизм повышения инновационного и научно-технологического потенциала страны / О. Ю. Кожукалова // Инновационные аспекты развития науки и техники. – 2021. – № 9. – С. 118–131.
8. Николаев, А. Е. Методика оценки состояния научно-технологического потенциала оборонно-промышленного комплекса России с использованием функции желательности Харрингтона / А. Е. Николаев // Экономический анализ: теория и практика. – 2013. – № 30 (333). – С. 22–33.
9. Сенько, А. Н. Прогнозирование научно-технологического развития регионов Республики Беларусь / А. Н. Сенько // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D. Экономические и юридические науки. – 2016. – № 13. – С. 2–9.
10. Гончарова, А. Н. Методические подходы к оценке научно-технологического и инновационного развития региона / А. Н. Гончарова // Вестник науки. – 2021. – № 6-1 (39). – С. 99–107.
11. Предпосылки повышения эффективности управления научно-техническим потенциалом территории / П. Н. Захаров, Д. Ю. Фраймович, В. Н. Смирнов, К. А. Власенко // Журнал прикладных исследований. – 2021. – № 6. – С. 925–930.
12. Волкова, Н. Н. Рейтинг научно-технологического развития субъектов Российской Федерации / Н. Н. Волкова, Э. И. Романюк // Вестник Института экономики Российской академии наук. – 2023. – № 2. – С. 50–72.
13. Ускова, Т. В., Рейтинг научно-технологического потенциала российских регионов / Т. В. Ускова, К. А. Устинова // Ars Administrandi. – 2025. – № 1. – С. 133–157.
14. Гафаров, М. Р. Научно-технологическое развитие региона: дихотомический подход к оценке эффективности / М. Р. Гафаров // Региональная и отраслевая экономика. – 2023. – № 3. – С. 28–37.
15. Об утверждении Концепции национальной безопасности Республики Беларусь : решение Всебелорусского народного собрания, 25 апр. 2024 г., № 5 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P924v0005 (дата обращения: 01.12.2025).
16. Новиков, А. С. Элементы научно-технологической безопасности в национальной экономике / А. С. Новиков // Вестник Белорусского государственного экономического университета. – 2024. – № 6 – С. 5–15.
17. Власова, М. С. Показатели экономической безопасности в научно-технологической сфере / М. С. Власова, О. С. Степченкова // Вопросы статистики. – 2019. – № 26 (10). – С. 5–17.
18. Новиков, А. С. Связь научно-технологической и экономической безопасности / А. С. Новиков // Вестник Белорусского государственного экономического университета. – 2025. – № 1. – С. 25–36.
19. Новиков, А. С. Связь научно-технологической и экономической безопасности / А. С. Новиков // Вестник Белорусского государственного экономического университета. – 2025. – № 1. – С. 25–36.
20. Интернет-портал Президента Республики Беларусь : [сайт]. – Минск, 1998–2025. – URL: https://president.gov.by (дата обращения: 05.12.2025).
21. Министерство экономики Республики Беларусь : [сайт]. – Минск, 1998–2025. – URL: http://economy.gov.by (дата обращения: 17.11.2025).
22. О Государственной программе инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы : Указ Президента Респ. Беларусь от 15 сент. 2021 г. № 348 : в ред. от 25 окт. 2022 г. № 381 // ilex : информ. правовая система (дата обращения: 04.12.2025).
23. Об утверждении Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы : Указ Президента Респ. Беларусь от 29 июля 2021 г. № 292 : в ред. от 23 июня 2023 г. № 180 // ilex : информ. правовая система (дата обращения: 04.12.2025).
24. Об утверждении Программы деятельности Правительства Республики Беларусь на 2025–2029 годы : постан. Совета Министров Респ. Беларусь от 8 мая 2025 г. № 254 // ilex : информ. правовая система (дата обращения: 05.12.2025).
25. Карловская, Г. В. Детерминанты финансового обеспечения научно-технологического развития Республики Беларусь на современном этапе / Г. В. Карловская // Научные труды Бел. гос. экономич. ун-та. Вып. 17 / Мин-во образования Респ. Беларусь, Белорусский гос. экономич. ун-т ; редкол.: А. В. Егоров (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Колорград, 2024. – С. 152–160.
26. The EU Common Agricultural Policy, its reform and future in brief // European Parlament. – URL: https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20210916STO12704/the-eu-common-agricultural-policy-its-reform-and-future-in-brief (date of access 06.12.2025).
27. Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь : [сайт]. – Минск, 1998–2025. – URL: https://pravo.by (дата обращения: 06.12.2025).
28. Национальный статистический комитет Республики Беларусь : [сайт]. – Минск, 1998–2025. – URL: http://belstat.gov.by (дата обращения: 06.12.2025).
29. Шлычков, С. В. Научно-технологическая сфера национальной безопасности Республики Беларусь: методологические аспекты обеспечения / С. В. Шлычков // Новости науки и технологий. – 2022. – № 3 (62). – С. 3–10.
30. Булгакова, И. К. Использование «Функции желательности» для формализации комплексного показателя конкурентоспособности промышленного предприятия / И. К. Булгакова, А. Н. Морозов // Вестник ВГУ. Серия: Экономика и управление. – 2009. – № 2. – С. 54–56.

References

1. Varshavskij, A. E. Metodicheskie principy ocenivaniya nauchno-tekhnologicheskoj bezopasnosti Rossii / A. E. Varshavskij // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 25: Mezhdunarodnye otnosheniya i mirovaya politika. – 2015. – T. 7, № 4. – S. 73–100.
2. Analiz pokazatelej razvitiya i rasprostraneniya vysokotekhnologichnoj produkcii (na primere robototekhniki i mobil'nyh ustrojstv / A. E. Varshavskij, T. A. Komkina, E. V. Kochetkova [i dr.] // Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika. – 2022. – № 21 (10). – S. 1951–1978.
3. Varshavskij, A. E. Prostranstvennoe neravenstvo i centrostremitel'noe dvizhenie naseleniya Rossii: ugrozy ekonomicheskoj, nauchno-tekhnologicheskoj i nacional'noj bezopasnosti / A. E. Varshavskij // Koncepcii. – 2018. – № 1 (37). – S. 3–27.
4. Ladynin, A. I. Sistema indikatorov nauchno-tekhnologicheskoj bezopasnosti Rossii / A. I. Ladynin // Mir ekonomiki i upravleniya. – 2022. – № 2. – S. 23–35.
5. Ladynin, A. I. Kratkosrochnye birzhevye indeksy kak instrument ocenki i prognozirovaniya nauchno-tekhnologicheskoj bezopasnosti / A. I. Ladynin // Russian Technological Journal. – 2024. – № 12 (6). – S. 113–126.
6. Aliev, I. M. Narashchivanie nauchno-tekhnologicheskogo potenciala kak osnova rosta urovnya i kachestva zhizni naseleniya / I. M. Aliev, I. V. Batarin // Beneficium. – 2022. – № 2 (43). – S. 6–14.
7. Kozhukalova, O. YU. Mekhanizm povysheniya innovacionnogo i nauchno-tekhnologicheskogo potenciala strany / O. YU. Kozhukalova // Innovacionnye aspekty razvitiya nauki i tekhniki. – 2021. – № 9. – S. 118–131.
8. Nikolaev, A. E. Metodika ocenki sostoyaniya nauchno-tekhnologicheskogo potenciala oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii s ispol'zovaniem funkcii zhelatel'nosti Harringtona / A. E. Nikolaev // Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika. – 2013. – № 30 (333). – S. 22–33.
9. Sen'ko, A. N. Prognozirovanie nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya regionov Respubliki Belarus' / A. N. Sen'ko // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya D. Ekonomicheskie i yuridicheskie nauki. – 2016. – № 13. – S. 2–9.
10. Goncharova, A. N. Metodicheskie podhody k ocenke nauchno-tekhnologicheskogo i innovacionnogo razvitiya regiona / A. N. Goncharova // Vestnik nauki. – 2021. – № 6-1 (39). – S. 99–107.
11. Predposylki povysheniya effektivnosti upravleniya nauchno-tekhnicheskim potencialom territorii / P. N. Zaharov, D. YU. Frajmovich, V. N. Smirnov, K. A. Vlasenko // ZHurnal prikladnyh issledovanij. – 2021. – № 6. – S. 925–930.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-290-297

12. Volkova, N. N. Rejting nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya sub"ektov Rossijskoj Federacii / N. N. Volkova, E. I. Romanyuk // Vestnik Instituta ekonomiki Rossijskoj akademii nauk. – 2023. – № 2. – S. 50–72.
13. Uskova, T. V., Rejting nauchno-tekhnologicheskogo potenciala rossijskih regionov / T. V. Uskova, K. A. Ustinova // Ars Administrandi. – 2025. – № 1. – S. 133–157.
14. Gafarov, M. R. Nauchno-tekhnologicheskoe razvitie regiona: dihotomicheskij podhod k ocenke effektivnosti / M. R. Gafarov // Regional'naya i otraslevaya ekonomika. – 2023. – № 3. – S. 28–37.
15. Ob utverzhdenii Koncepcii nacional'noj bezopasnosti Respubliki Belarus' : reshenie Vsebelorusskogo narodnogo sobraniya, 25 apr. 2024 g., № 5 // Nac. pravovoj Internet-portal Resp. Belarus'. – URL: https://pravo.by/document/?guid=12551& p0=P924v0005 (data obrashcheniya: 01.12.2025).
16. Novikov, A. S. Elementy nauchno-tekhnologicheskoj bezopasnosti v nacional'noj ekonomike / A. S. Novikov // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. – 2024. – № 6 – S. 5–15.
17. Vlasova, M. S. Pokazateli ekonomicheskoj bezopasnosti v nauchno-tekhnologicheskoj sfere / M. S. Vlasova, O. S. Stepchenkova // Voprosy statistiki. – 2019. – № 26 (10). – S. 5–17.
18. Novikov, A. S. Svyaz' nauchno-tekhnologicheskoj i ekonomicheskoj bezopasnosti / A. S. Novikov // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. – 2025. – № 1. – S. 25–36.
19. Novikov, A. S. Svyaz' nauchno-tekhnologicheskoj i ekonomicheskoj bezopasnosti / A. S. Novikov // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. – 2025. – № 1. – S. 25–36.
20. Internet-portal Prezidenta Respubliki Belarus' : [sajt]. – Minsk, 1998–2025. – URL: https://president.gov.by (data obrashcheniya: 05.12.2025).
21. Ministerstvo ekonomiki Respubliki Belarus' : [sajt]. – Minsk, 1998–2025. – URL: http://economy.gov.by (data obrashcheniya: 17.11.2025).
22. O Gosudarstvennoj programme innovacionnogo razvitiya Respubliki Belarus' na 2021–2025 gody : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 15 sent. 2021 g. № 348 : v red. ot 25 okt. 2022 g. № 381 // ilex : inform. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 04.12.2025).
23. Ob utverzhdenii Programmy social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na 2021–2025 gody : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 29 iyulya 2021 g. № 292 : v red. ot 23 iyunya 2023 g. № 180 // ilex : inform. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 04.12.2025).
24. Ob utverzhdenii Programmy deyatel'nosti Pravitel'stva Respubliki Belarus' na 2025–2029 gody : postan. Soveta Ministrov Resp. Belarus' ot 8 maya 2025 g. № 254 // ilex : inform. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 05.12.2025).
25. Karlovskaya, G. V. Determinanty finansovogo obespecheniya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na sovremennom etape / G. V. Karlovskaya // Nauchnye trudy Bel. gos. ekonomich. un-ta. Vyp. 17 / Min-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Belorusskij gos. ekonomich. un-t ; redkol.: A. V. Egorov (gl. red.) [i dr.]. – Minsk : Kolorgrad, 2024. – S. 152–160.
26. The EU Common Agricultural Policy, its reform and future in brief // European Parlament. – URL: https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20210916STO12704/the-eu-common-agricultural-policy-its-reform-and-future-in-brief (date of access 06.12.2025).
27. Nacional'nyj pravovoj internet-portal Respubliki Belarus' : [sajt]. – Minsk, 1998–2025. – URL: https://pravo.by (data obrashcheniya: 06.12.2025).
28. Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus' : [sajt]. – Minsk, 1998–2025. – URL: http://belstat.gov.by (data obrashcheniya: 06.12.2025).
29. SHlychkov, S. V. Nauchno-tekhnologicheskaya sfera nacional'noj bezopasnosti Respubliki Belarus': metodologicheskie aspekty obespecheniya / S. V. SHlychkov // Novosti nauki i tekhnologij. – 2022. – № 3 (62). – S. 3–10.
30. Bulgakova, I. K. Ispol'zovanie «Funkcii zhelatel'nosti» dlya formalizacii kompleksnogo pokazatelya konkurentosposobnosti promyshlennogo predpriyatiya / I. K. Bulgakova, A. N. Morozov // Vestnik VGU. Seriya: Ekonomika i upravlenie. – 2009. – № 2. – S. 54–56.

Материал поступил 06.12.2025, одобрен 16.12.2025, принят к публикации 16.12.2025

УДК 338.242.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ КАК ИНСТРУМЕНТА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

А. С. Новиков

Соискатель кафедры экономического развития и менеджмента, Академия управления при Президенте Республики Беларусь, Минск, Беларусь, e-mail: novikov25@tut.by

Реферат

В данной научной статье исследованы направления совершенствования Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь как средства обеспечения научно-технологической безопасности Республики Беларусь.

Для этих целей анализу подверглась значительная теоретическая и нормативная база, статистическая информация.

Проводится анализ научной литературы на предмет исследования различных аспектов создания и реализации государственных программ, оценки их эффективности.

Установлена связь между научно-технологической безопасностью и инновационным развитием национальной экономики. Определены принципы, которые используются при разработке государственных программ инновационного развития Республики Беларусь. Представлен экономический эффект от реализации таких программ. Изучен алгоритм включения в них инновационных проектов. Исследованы предоставляемые в рамках программы льготы и преференции. Определен компенсаторный механизм, направленный на восполнение соответствующих потерь бюджета. Определены основные направления совершенствования механизмов Госпрограммы.

Актуальность представлена важностью обеспечения научно-технологической безопасности для развития национальной экономики Республики Беларусь, ролью Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь в данном процессе.

Цель исследования: определить и раскрыть механизмы совершенствования Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь как источника обеспечения научно-технологической безопасности Республики Беларусь.

Материалы и методы: в процессе подготовки статьи использовалась научная литература, нормативные правовые акты, статистическая информация, определяющие содержание государственных программ в различных областях социально-экономического развития, в первую очередь, Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь.

Результаты и выводы

Подробно исследован организационно-экономический механизм Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы. Определены и раскрыты основные направления совершенствования ее механизмов на 2026–2030 годы.

Назначение исследования состоит в определении и раскрытии механизмов совершенствования Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь.

Ключевые слова: научно-технологическая безопасность, государственная программа инновационного развития Республики Беларусь, научно-технологический потенциал, инновационное развитие, инновационный проект, стимулирование, научная деятельность.

DEVELOPMENT OF THE MECHANISMS OF THE STATE PROGRAMM FOR INNOVATIVE DEVELOPMENT OF THE REPUBLIC OF BELARUS AS A TOOL FOR ENSURING SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL SECURITY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

A. S. Novikov

Abstract

This research article examines areas for improving the mechanisms of the State Program for Innovative Development of the Republic of Belarus as a means of ensuring scientific and technological security of the Republic of Belarus.

For these purposes, a significant theoretical and regulatory framework, as well as statistical information, was analyzed.

This article contains an analysis of the scientific literature to examine various aspects of the creation and implementation of state programs and an assessment of their effectiveness.

The relationship between scientific and technological security and the innovative development of the national economy is identified. The principles used in developing State Programs for Innovative Development of the Republic of Belarus are defined. The economic impact of implementing such programs is presented. An algorithm for incorporating innovative projects into them is examined. The benefits and preferences provided with in the program are analyzed. A compensatory mechanism aimed at replenishing the corresponding budget losses is defined. The main areas for improving the mechanisms of the State Program are identified.

Relevance. The importance of ensuring scientific and technological security for the development of the national economy of the Republic of Belarus and the role of the State Program for Innovative Development of the Republic of Belarus in this process are highlighted.

The purpose of this study is to identify and elucidate mechanisms for improving the State Program for Innovative Development of the Republic of Belarus as a source of scientific and technological security for the country.

Materials and Methods. In preparing this article, scientific literature, regulatory legal acts, and statistical information defining the content of state programs in various areas of socio-economic development, primarily the State Program for Innovative Development of the Republic of Belarus were used.

Results and Conclusions. The organizational and economic mechanism of the State Program for Innovative Development of the Republic of Belarus for 2021–2025 was examined in detail. The main areas for improving its mechanisms for 2026–2030 were identified and elucidated.

The purpose of this study is to identify and elucidate mechanisms for improving the State Program for Innovative Development of the Republic of Belarus.

Keywords: scientific and technological security, State Program for Innovative Development of the Republic of Belarus, scientific and technological potential, innovative development, innovation project, incentives, scientific activity.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-298-304

Введение

Обеспечение научно-технологической безопасности (НТБ) на должном уровне предполагает целенаправленную деятельность, включающую установление определенных направлений и способов, которые будут применены для ее обеспечения. Одним из основных условий, применяемых по отношению к таким направлениям и способам, является их способность воздействовать на научно-технологический и (или) образовательный потенциалы с целью их увеличения.

Основная часть. Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь как инструмент обеспечения научно-технологической безопасности Республики Беларусь

Содержание определения НТБ как состояния защищенности научно-технологического и образовательного потенциалов от угроз, препятствующих развитию научной деятельности, созданию и внедрению инноваций и передовых технологий в реальный сектор экономики и другие сферы [1] указывает на то, что создание и внедрение инноваций и передовых технологий в реальный сектор экономики и другие сферы является одним из целей и одновременно направлений обеспечения НТБ.

Анализ процесса обеспечения научно-технологической безопасности и инновационного развития национальной экономики указывает на наличие тесной связи между ними, которая проявляется в следующем.

1. Нормативное закрепление. Исследование содержания норм Концепции национальной безопасности Республики Беларусь (КНБ), в частности, пп. 10, 11, 22, 29, 33, 54, 55, 70 – отражает то, что инновационному развитию отводится приоритетная роль в процессе обеспечения НТБ. Обозначенные положения КНБ затрагивают вопросы оценивания состояния национальной безопасности Республики Беларусь, основные угрозы для нее, ключевые национальные интересы в экономической и научно-технологической сферах, внутренние источники угроз в научно-технологической сфере и основные направления их нейтрализации.

КНБ является базовым документом, на основе которого разрабатываются все программные документы в республике, в том числе связанные с научно-технологической безопасностью и инновационным развитием. При этом некоторые из них содержат нормы, обуславливающие связь НТБ и инновационного развития по конкретным направлениям деятельности. Например, цель Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2026–2030 годы (ГПИР 26–30) определена как устойчивое развитие национальной инновационной системы, направленное на обеспечение научно-технологической безопасности посредством внедрения инноваций и передовых технологий в реальный сектор экономики [2]. Следовательно, содержащиеся в ГПИР 26–30 программные элементы направлены на обеспечение НТБ.

2. Фактическое содержание и механизмы обеспечения. Содержание мероприятий в области инновационного развития, в частности, инновационных проектов Государственной программы инновационного развития на 2021–2025 годы (ГПИР 21–25) указывает на то, что такие проекты, кроме основной своей цели, например, организации производства высокотехнологичных, инновационных аналитических и инспекционных комплексов, оптико-механических изделий двойного и специального назначения в ОАО «Оптоэлектронные системы», служат также повышению уровня научно-технологического потенциала за счет создания и применения новой технологии по производству соответствующих комплексов и деталей.

3. Научное подтверждение. Необходимо отметить значительный интерес научного сообщества к обеспечению научно-технологической безопасности, в том числе за счет инновационного развития национальной экономики. Например, такие исследователи, как Н. В. Зайцева, И. Н. Кандричина, А. Д. Старовойтова, Е. Б. Ленчук, В. И. Филатов в своих работах уделяли значительное внимание инновационному развитию и его вкладу в обеспечение необходимого уровня научно-технологического потенциала [3–5].

Также, с учетом разработанной автором методики оценки состояния НТБ, большинство показателей которой относятся к инновационному развитию национальной экономики, целесообразно уделить внимание именно ему, как направлению обеспечения научно-технологической безопасности.

Необходимо отметить, что управление национальной экономической системой Республики Беларусь основано на программно-целевом принципе (методе). Данный выбор обусловлен такими причинами, как эффективность метода, сложившаяся практика, наличие значительного государственного сектора и др.

Основываясь на таких характеристиках, как цели, охват участников, объемы финансирования, планируемые результаты и т. п. государственные программы можно рассматривать как основной инструмент, применяемый для развития конкретных отраслей национальной экономики, что верно в том числе и по отношению к инновационному развитию.

Также необходимо указать на значительное внимание со стороны исследователей по отношению к процессам разработки, реализации и оценки государственных программ. В частности, значительное количество авторов исследуют государственные программы с различных сторон, изучают их влияние на социально-экономическое развитие государства. Например, В. К. Гираев в своих работах анализирует мировой опыт использования государственных программ как источника экономического роста [6]. П. С. Звягинцев рассматривает госпрограммы в качестве инструмента управления экономическим развитием [7], оценивает их роль и значение в инновационном развитии Российской Федерации [8], оценивает экономическую эффективность таких программ [9]. Ю. И. Мхитарян проводит общую оценку эффективности государственных программ [10], изучает способы повышения их эффективности [11], возникающие в процессе проблемы [12]. А. Г. Бреусова также проводит исследования различных направлений реализации госпрограмм [13], в том числе в целях управления изменениями в региональных [14] и муниципальных госпрограммах [15]. Р. А. Тория исследует общие подходы к разработке государственных программ [16], акцентирует внимание на возникающих в процессе препятствиях правового и финансового характера [17], Г. А. Борщевский исследует опыт реализации государственных программ в Российской Федерации. И. А. Кириченко рассматривает госпрограммы в качестве базиса стратегического управления [19]. Т. К. Гоманова принимает финансовую составляющую за основу оценки региональных государственных программ [20]. Исследования А. А. Кораблевой посвящены разработке методических основ оценки эффективности муниципальных программ [21]. Г. Н. Гродская и Е. С. Валяева изучают государственные программы с позиций их возможной системной интеграции [22].

Исходя из доказанности связи научно-технологической безопасности и инновационного развития, целесообразно приступить к изучению основных средств обеспечения инновационного развития национальной экономики в контексте их применимости для обеспечения НТБ. Принимая во внимание масштаб, возможности, сферу действия, участников, наибольшую значимость из таких средств представляет Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь (ГПИР), принимаемая на пятилетний период.

Посредством анализа ГПИР на 2021–2025 годы, ее предшественников, а также ГПИР на 2026–2030 годы можно установить основные принципы, которые используются в процессе разработки подобных программ:

1) предметная ориентированность – реализация структурных элементов государственной программы направлена исключительно на инновационное развитие национальной экономики, в первую очередь ее реального сектора;

2) адресность – реализуемые в государственной программе механизмы поддержки применяются только при условии выполнения конкретных критериев включения в программу, а также последующей реализации проекта или мероприятия;

3) непрерывность – разработка ГПИР на следующую пятилетку обусловлена достигнутыми результатами текущего пятилетнего периода с учетом складывающихся тенденций в национальной экономике, места государства в международных экономических отношениях и др.;

4) системный подход – разработка государственной программы обусловлена соблюдением принципа системности, предполагающего комплексное содействие ее участникам по различным направлениям, в том числе по вопросам финансирования, предоставления льгот и преференций и др.;

5) эволюционное развитие – каждая последующая ГПИР содержит важные нововведения, направленные на повышение ее эффективности, в первую очередь за счет расширения круга участников, совершенствования механизма включения в программу, упрощения возможности получения бюджетных средств и т. д.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-298-304

В ходе изучения процесса реализации государственной программы можно отметить многоплановость ролей ГПИР, в частности, она выступает в качестве:

1) инструмента инновационного развития – ГПИР рассматривается одним из основных инструментов, применяемых в целях повышения инновационного и связанного с ним научно-технологического потенциала страны. Заложенные в программе на 2026–2030 годы объемы финансирования в размере 7 млрд белорусских рублей и предполагаемый эффект в виде отгруженной инновационной продукции на сумму не менее 17 млрд белорусских рублей доказывают ее роль как ключевого инструмента технологического развития страны;

2) механизма инновационного развития – государственная программа выступает в качестве комплексного механизма обеспечения инновационного развития страны. Программу можно рассматривать как систему, состоящую из нескольких взаимоувязанных компонентов, каждый из которых связан с инновационным развитием. ГПИР создает базовые условия для инновационного развития предприятий посредством реализации ими инновационных проектов. Применяемые в рамках государственной программы средства также указывают на возможность ее анализа как механизма.

Основными функциями ГПИР являются:

а) комплексное содействие экономическому развитию страны за счет реализации инновационных проектов и мероприятий в конкретных отраслях национальной экономики;

б) поддержка высокотехнологического сектора. Одним из условий участия в программе выступает соответствие проекта основным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности. Данные направления на период 2021–2025 гг. утверждены Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156 [23], и соответствующим Указом – на текущую пятилетку [24]. Вышеуказанные направления являются приоритетными для реализации в целях обеспечения технологического суверенитета страны;

в) поддержка малого и среднего предпринимательства (МСП). Поддержка инновационных малых и средних предприятий является одной из главных целей ГПИР. Инновационное МСП в процессе основной деятельности создает, внедряет и активно применяет инновации. В целях его поддержки в государственной программе наряду с общими средствами предусмотрены определенные механизмы, призванные стимулировать инновационную деятельность.

Анализ процесса реализации инновационных проектов и мероприятий Государственной программы инновационного развития на 2021–2025 годы позволяет сделать вывод о наличии мультипликативного экономического эффекта от реализации компонентов программы, который затрагивает как предприятие, являющееся исполнителем, так и потребителя, государство и общество в целом. Основные направления такого влияния указаны в таблице 1.

Одним из наиболее существенных последствий реализации инновационного проекта выступает повышение конкурентоспособности исполнителя и производимой им продукции на внешнем и внутреннем рынке. Это достигается вследствие необходимости соблюдения критериев входа в программу, выделения финансирования, а также непосредственно в процессе реализации проекта.

Анализ ГПИР позволяет выделить в ее составе инновационные проекты и мероприятия по развитию инновационной инфраструктуры (мероприятие). Соответственно, участие в ГПИР возможно или в целях реализации инновационного проекта и (или) соответствующего мероприятия.

Алгоритм включения в Государственную программу на 2021–2025 годы инновационного проекта указан на рисунке 1.

Таблица 1 – Экономический эффект от реализации инновационных проектов и мероприятий ГПИР

№ п/п	Сфера воздействия	Содержание
1	Продукция	Производимая в процессе реализации проекта продукция является инновационной, обладающей новыми или улучшенными характеристиками в сравнении с аналогами
2	Налоги	По результатам реализации проекта после выхода его на проектную мощность производство продукции продолжается. Производственный процесс обусловлен необходимостью уплаты налогов, в том числе, на прибыль, добавленную стоимость, заработную плату и др.
3	Занятость	Процесс реализации инновационного проекта зачастую связан с созданием новых высокопроизводительных рабочих мест и (или) модернизацией имеющихся
4	Экспорт	Одним из условий участия в программе является экспортоориентированность проекта, соответственно, производимая продукция экспрортоориентирована
5	Технологии	Применяемые при реализации проекта технологии производства являются инновационными, вследствие этого повышается его технологичность
6	Наука	В рамках инновационного проекта могут проводится научно-исследовательские, опытно-конструкторские и опытно-технологические работы (НИОК(Т)Р), в результате чего происходит рост научно-технологического потенциала

Источник: разработка автора на основе [25].



Рисунок 1 – Алгоритм включения инновационных проектов в ГПИР 21–25

Источник: разработка автора на основании [25]

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-298-304

В целях более глубокого изучения различных аспектов разработки и реализации ГПИР раскроем содержание рисунка 1:

1.Разработка бизнес-плана инновационного проекта выступает отправной точкой процесса. Бизнес-план должен соответствовать строгим, нормативно установленным правилам и содержать детальную информацию, отражающую процесс реализации проекта, в том числе, источники финансирования, рынки сбыта, сроки реализации, срок окупаемости и др. [26].

2.Ведомственная научно-техническая экспертиза проводится в соответствии с принципом подчиненности исполнителя. Данная экспертиза выступает в качестве первого барьера, на котором оценивается соответствие бизнес-плана критериям участия в государственной программе, реализуемость проекта, его предполагаемая эффективность.

3.Государственная научно-техническая экспертиза (ГНТЭ) предполагает оценку экспертами целесообразности и реализуемости проекта, его научный и (или) технический уровень, возможные последствия. Прохождение ГНТЭ является важнейшим этапом для включения проекта в программу, т. к. предполагает его оценку со стороны государства.

4.Финансово-экономическая оценка проекта требуется в случае использования в процессе реализации проекта бюджетных средств, в том числе, средств республиканского бюджета, направляемых Белорусскому инновационному фонду (БИФ). В ходе оценки проводится анализ реализуемости проекта с учетом финансового состояния организации.

5.В случае получения положительного заключения по результатам финансово-экономической оценки конкурсная комиссия под руководством заместителя Премьер-министра Республики Беларусь принимает решение о выделении финансирования из средств республиканского централизованного инновационного фонда (РЦИФ), если это предусмотрено проектом *.

6.Утверждение заказчиком, по согласованию с ответственным заказчиком, плана-графика реализации и объемов финансирования проекта. Данные документы используются в дальнейшем в ходе мониторинга процесса реализации проекта.

7.Включение проекта в государственную программу посредством принятия решения уполномоченным государственным органом, например, в форме постановления Совета Министров Республики Беларусь.

* Этап обязателен в случае, если инновационным проектом предусмотрено выделение бюджетных средств.

Непосредственно от момента разработки бизнес-плана до включения проекта в ГПИР проходит период в несколько месяцев. Это обусловлено необходимостью соблюдения требований законодательства в области инновационного развития, а также бюджетного законодательства, обеспечения эффективности программы.

Общая характеристика инновационных проектов Государственной программы на 2021–2025 годы представлена в таблице 2.

Анализ структуры и содержания ГПИР позволяет выделить набор механизмов, которые используются в целях содействия исполнителям в процессе реализации инновационных проектов и мероприятий. Исполнители получают право на определенные виды поддержки после включения в государственную программу.

Виды поддержки, применяемые по отношению к исполнителям, можно разделить на прямые и косвенные, они представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Инновационные проекты ГПИР

Наименование	Инновационные проекты
Критерии участия	Инновационность (создание и внедрение новых технологий и (или) производство новой для Республики Беларусь и (или) мировой экономики продукции); экспортная ориентированность (превышение экспорта над импортом); уровень валовой добавленной стоимости (ВДС) на одного работающего по виду деятельности проекта должен соответствовать аналогичному уровню в Европейском Союзе
Заказчики	Республиканские органы государственного управления, концерны, НАН Беларуси, облисполкомы и Мингорисполком
Исполнители	Юридические лица, определенные в качестве исполнителей по результатам включения в программу
Механизм принятия, внесения изменений	Постановление Совета Министров Республики Беларусь об утверждении перечня проектов с последующим внесением изменений в данный в перечень

Источник: разработка автора на основе [25, 27, 28].

Таблица 3 – Направления (механизмы) поддержки инновационных проектов и мероприятий в рамках ГПИР

Прямые направления поддержки	Косвенные направления поддержки
Выделение финансирования из средств РЦИФ (на безвозвратной основе)	Освобождение от ввозных таможенных пошлин и налога на добавленную стоимость технологического оборудования, комплектующих и запасных частей к нему, сырья и материалов
Выделение финансирования из средств местных инновационных фондов (на безвозвратной основе)	Освобождение от земельного налога или арендной платы за земельные участки, используемых для возведения объектов строительства в рамках реализации проектов ГПИР
Выделение финансирования из средств БИФ (на возвратной основе)	Повышенный инвестиционный вычет по налогу на прибыль в размере до 150 процентов от объема капитальных затрат
Предоставление кредитных ресурсов (на возвратной основе)	

Источник: разработка автора на основе [2].

Необходимо отметить, что исполнение в целях реализации инновационных проектов и мероприятий государственной программы указанных механизмов поддержки не формирует исключительно издержки (потери) для государственного бюджета.

В государственной программе имеется особый компенсаторный механизм, направленный на восполнение соответствующих потерь бюджета. Изучение данного механизма позволяет выделить в нем два направления.

1. В случае успешной реализации проекта компенсация происходит за счет восстановления налоговых платежей в полном объеме, при этом продолжается производство продукции с сопутствующим экономическим эффектом, указанным в таблице 1.

2. В случае окончания проекта по иным основаниям, чем выход на проектную мощность, исполнитель обязан вернуть бюджетные средства, перечисленные ему в целях реализации проекта, а также суммы предоставленных льгот, которыми он воспользовался в ходе реализации проекта.

Основываясь на принципе эволюционного развития ГПИР, которую можно представить, как развивающийся механизм, в целях формирования подходов по ее совершенствованию и их использования в процессе разработки и реализации государственной программы, необходимо выделить определенные направления ее развития.

Такие направления взаимосвязаны. Они обусловлены структурой и содержанием программы, ее целями и направлены на повышение ее результативности и эффективности в целом.

1. Более широкая профилизация ГПИР.

Анализ Государственной программы на 2021–2025 годы позволяет выделить в ней одноуровневую структуру, допускающую реализацию

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-298-304

республиканских проектов и мероприятий. Включение в программу производилось два раза в год соответствующим постановлением Совета Министров Республики Беларусь.

В данной связи, в целях совершенствования процесса исполнения государственной программы, повышения эффективности ее компонентов, целесообразно предусмотреть возможность введения дополнительных уровней для проектов за счет увеличения количества их видов с сопутствующим формированием организационно-экономического механизма их реализации.

Введение иных видов инновационных проектов исходя из принципа максимальной эффективности предполагает определенную профилизацию видов, связанную с введением некоторых ограничений для участия. Это необходимо в целях формирования структуры государственной программы, в которой каждый вид проектов будет разработан под определенных заказчиков и исполнителей, а также в целях стимулирования к участию в конкретном виде проекта.

Введение в структуру ГПИР новых видов проектов покажет наибольшую эффективность в случае, если для каждого вида будет разработан отдельный механизм их утверждения, например, отдельный нормативный правовой акт, соответствующий уровню проекта. Это обеспечит независимость процесса и увеличит скорость включения и исключения всех видов проектов.

2. Расширение круга заказчиков государственной программы.

Заказчики государственной программы наряду с исполнителями являются ее неотъемлемым элементом. Наличие заказчика обязательно в случае, если проектом предусмотрено бюджетное финансирование. Заказчик контролируют процесс реализации проекта, согласовывает вносимые в него изменения, содействует исполнителю в случае возникновения каких-либо препятствий в реализации проекта, взаимодействует с ответственным заказчиком. Программой не предусмотрены какие-либо ограничения по количеству проектов в ведении заказчика. Анализ практики реализации инновационных проектов программы на 2021–2025 годы указывает на возможность разделения заказчиков на республиканские органы государственного управления и областные исполнительные комитеты вместе с Минским городским исполнительным комитетом [28]. Негосударственные организации не могли участвовать в качестве заказчиков в ГПИР на 2021–2025 годы и аналогичных программах на предыдущие периоды.

Профилизации государственной программы, также, как и повышению ее общей эффективности, в значительной степени будет способствовать предоставление возможности выступать заказчиками иным категориям организаций, в первую очередь, не исключительно государственным.

По аналогии с государственными органами, среди таких организаций наибольший интерес представляют те, которые способны оказывать влияние в форме прямого подчинения или другими способами на иные субъекты, главным образом, субъекты предпринимательской деятельности (СПД).

В частности, к таким потенциальным заказчикам относятся администрации свободных экономических зон (СЭЗ), научно-технологические парки (технопарки), в уставном фонде которых доля собственности государства и (или) организаций республиканской и (или) коммунальной форм собственности составляет более 50 процентов, государственное учреждение «Администрация Китайско-Белорусского индустриального парка «Великий камень» (Великий камень).

3. Расширение круга исполнителей проектов Государственной программы.

Анализ Государственной программы на 2021–2025 годы [28] позволяет выделить среди ее исполнителей предприятия республиканской и коммунальной формы собственности, учреждения, открытые и закрытые акционерные общества, общества с ограниченной ответственностью. Расширение круга заказчиков госпрограммы обусловлено распространением права участвовать в ней в качестве исполнителей на те организации, деятельность которых направлена, в первую очередь, на инновационное развитие национальной экономики.

К таким организациям относятся резиденты СЭЗ, технопарков, Великого камня. Выбор данных юридических лиц обусловлен характером их деятельности, которая обязана быть инновационной (резиденты технопарков) или фактически является такой в целях повышения конкурентоспособности производимой продукции (резиденты СЭЗ и Великого камня). Принимая во внимание, что обозначенные потенциальные исполнители гопрограммы являются коммерческими организациями, бюджетное финансирование им целесообразно предоставлять только на возвратной основе.

Участие СПД в ГПИР будет содействовать их основной деятельности за счет роста производственного и научно-технологического потенциалов.

4. Стимулирование научной деятельности, укрепление связей с наукой.

Современное производство характеризуется все возрастающей ролью технологического фактора, который является одним из основных наряду с дешевыми ресурсами, рабочей силой и др., повышающими конкурентоспособность продукции. При этом в соответствии с наметившимися тенденциями именно возможность создавать и внедрять в производство новые технологии, в первую очередь, относящиеся к высшим технологическим укладам, определит положение государства в будущем, его роль в международных экономических отношениях.

В данной связи, с учетом наметившихся перспектив, целесообразно создать дополнительные механизмы поддержки и обеспечения научной деятельности, которая является движущей силой процесса создания технологий в производстве.

В данном случае в структуре программы необходимо предусмотреть механизм, позволяющий проводить научные исследования в виде научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ с последующим внедрением их результатов на производстве. Это может быть реализовано, например, в форме отдельного вида инновационных проектов с собственным механизмом реализации.

Данный подход будет содействовать развитию научной деятельности организаций-исполнителей, росту научно-технологического потенциала и производству в целом.

Выше указанные проекты будут существенно отличаться от реализуемых в настоящее время. Их собственный организационный механизм предполагает многокомпонентность. Структурные элементы проекта будут представлять собой самостоятельные проекты или мероприятия в логически сформированной последовательности действий с конечным результатом в виде нового наукоемкого продукта.

Такие «сложные», «комплексные» проекты могут быть реализованы в случае применения иных способов оценки их эффективности по сравнению с использованными в рамках ГПИР на 2021–2025 годы. Например, эффективность всего проекта можно оценивать по финальному этапу, связанному с конечным продуктом.

В целях предоставления дополнительных стимулов к осуществлению научной деятельности целесообразно также предоставить льготные условия участия в программе для проектов, основанных на наиболее важных для технологического и экономического развития страны технологиях.

Соответствующие технологии могут быть импортозамещающими или экспортоориентированными. Они относятся к высшим технологическим укладам, например, роботостроение, беспилотные системы, новые материалы с заданными свойствами, технологии искусственного интеллекта и др. [24].

Льготные условия участия для проектов, связанных с обозначенными технологиями, может включать облегченные критерии их финансирования [27], например, снижение требований по отношению к уровню валовой добавленной стоимости на одного работающего, неприменение критерия по экспортоориентированности и др.

5. Совершенствование механизмов оценки эффективности государственной программы.

Применяемая для оценки эффективности ГПИР на 2021–2025 годы методика основана на сравнении фактически достигнутых величин показателей с плановыми, установленными в программе. Такой подход является базовым, широко применяемым в Республике Беларусь в процессе разработки государственных программ.

С учетом предлагаемых масштабных изменений целесообразно рассмотреть вопрос об ужесточении применяемых подходов в отношении оценки эффективности программы и ее проектов. Это связано, в том числе, с возможным дефицитом средств бюджетных фондов

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-298-304

вследствие значительного изменения архитектуры программы в первую очередь за счет новых видов проектов, их заказчиков и исполнителей.

В условиях необходимости сохранения действующих подходов целесообразно внести в методику оценки изменения, предполагающие применение дополнительных показателей, например, полноты использования выделенных в отчетном году на проект средств, соблюдения сроков реализации проекта. При этом необходимо исключить элементы методики, искажающие результат, в частности, коэффициент соотношения планового значения бюджетных расходов на научную, научно-техническую и инновационную деятельность в процентах от валового внутреннего продукта и фактического значения бюджетных расходов.

Таким образом, оценка целевых и дополнительных показателей будет производиться исходя из сравнения фактических и плановых значений в сумме, определяющих показатель эффективности. При этом, с учетом результатов предыдущих программ и ГПИР на 2021–2025 годы, программа будет считаться неэффективной в случае достижения показателя эффективности 0,7 и ниже.

Заключение

Необходимо отметить роль Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь в процессе обеспечения научно-технологической безопасности.

В настоящее время ГПИР выступает действенным инструментом повышения научно-технологического потенциала, являющегося образующим элементом НТБ. Дальнейшее совершенствование механизмов программы, в первую очередь, ее структурных элементов, поможет повысить ее эффективность и результативность, а также будет содействовать экономическому развитию страны в целом.

Список цитированных источников

1. Об утверждении Концепции национальной безопасности Республики Беларусь : решение Всебелорусского народного собрания, 25 апреля 2024 г. № 5 // ilex : информ. правовая система (дата обращения: 12.02.2026).
2. О Государственной программе инновационного развития Республики Беларусь на 2026–2030 годы : Указ Президента Респ. Беларусь от 21 дек. 2021 г. № 448 // ilex : информ. правовая система (дата обращения: 12.02.2026).
3. Ленчук, Е. Б. Проекты технологического суверенитета как инструмент инновационного развития российской экономики / Е. Б. Ленчук, В. И. Филатов // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2024. – № 3. – С. 68–81.
4. Старовойтова, А. Д. Стимулирование экономического роста с помощью мер государственной инновационной политики: опыт Республики Беларусь / А. Д. Старовойтова // Восемнадцатая годичная научная конференция. Социально-гуманитарные науки. – 2025. – Ч. 2. – С. 370–376.
5. Зайцева, Н. В. История становления Концепции инновационного развития Республики Беларусь // Н. В. Зайцева, И. Н. Кандричина // Труды БГТУ. Серия 6: История, философия. – 2022. – № 1 (257). – С. 98–101.
6. Гираев, В. К. Государственное регулирование экономического роста: мировой опыт и выводы для России / В. К. Гираев, Ф. А. Куцулова, Х. М. Хаджалова // Региональные проблемы преобразования экономики. – 2024. – № 11 (169). – С. 1–18.
7. Звягинцев, П. С. Государственные программы как инструмент управления социально-экономическим развитием России / П. С. Звягинцев // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2018. – № 13–1. – С. 54–58.
8. Звягинцев, П. С. Роль государственных программ в модернизации, инновационном и технологическом развитии и импортозамещении Российской экономики / П. С. Звягинцев // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2017. – № 12–2. – С. 591–596.
9. Звягинцев, П. С. Государственные программы Российской Федерации и их экономическая эффективность / П. С. Звягинцев // Вестник Института экономики Российской академии наук. – 2016. – № 6. – С. 171–183.
10. Мхитарян, Ю. И. Особенности оценки эффективности государственных программ Российской Федерации / Ю. И. Мхитарян // Век качества. – 2018. – № 2. – С. 7–19.
11. Мхитарян, Ю. И. Повышение эффективности реализации государственных программ Российской Федерации / Ю. И. Мхитарян // Век качества. – 2019. – № 1. – С. 8–18.
12. Мхитарян, Ю. И. Проблемы повышения эффективности государственных программ Российской Федерации / Ю. И. Мхитарян // Век качества. – 2018. – № 1. – С. 7–19.
13. Бреусова, А. Г. Оценка эффективности государственных программ / А. Г. Бреусова // Вестник ОмГУ. Серия: Экономика. – 2015. – № 2. – С. 128–136.
14. Бреусова, А. Г. Управление изменениями в государственных (муниципальных) программах / А. Г. Бреусова // Вестник ОмГУ. Серия: Экономика. – 2016. – Ч. 1, № 3. – С. 153–161.
15. Бреусова, А. Г. Управление изменениями в программах на основе оценки эффективности (часть 2) / А. Г. Бреусова, А. А. Кораблева // Вестник ОмГУ. Серия: Экономика. – 2016. – Ч. 2, № 4. – С. 147–158.
16. Тория, Р. А. Государственная программа: содержание, источники, процесс внедрения, принципы и проблемы формирования / Р. А. Тория // Проблемы экономики и юридической практики. – 2015. – № 5. – С. 35–38.
17. Тория, Р. А. Финансово-правовые проблемы перехода к программному бюджету / Р. А. Тория // Проблемы экономики и юридической практики. – 2015. – № 5. – С. 102–105.
18. Борщевский, Г. А. Инструменты оценки реализации государственных программ Российской Федерации / Г. А. Борщевский // Государственное управление. Электронный вестник. – 2018. – № 67. – С. 6–30.
19. Совершенствование стратегического управления на основе оценки макроэкономической эффективности государственных программ / И. А. Кириченко, С. Б. Коляров, Т. Н. Маршова, А. М. Помялов // Государственное управление. Электронный вестник. – 2018. – № 67. – С. 181–202.
20. Гоманова, Т. К. Региональные особенности оценки эффективности государственных программ: финансовый аспект / Т. К. Гоманова // Вопросы управления. – 2018. – № 6 (36). – С. 52–59.
21. Кораблева, А. А. Методические основы оценки эффективности муниципальных программ / А. А. Кораблева // Региональная экономика: теория и практика. – 2017. – № 4 (439). – С. 691–705.
22. Гродская, Г. Н. Государственные программы в системе стратегического планирования: механизм интеграции и реализация принципов проектного управления / Г. Н. Гродская, Е. С. Валяева // Вестник ВУиТ. – 2019. – № 3. – С. 31–41.
23. О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы : Указ Президента Респ. Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156 // ilex : информ. правовая система (дата обращения: 12.02.2026).
24. О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2026–2030 годы : Указ Президента Респ. Беларусь от 1 апр. 2025 г. № 135 // ilex : информ. правовая система (дата обращения: 14.02.2026).
25. О Государственной программе инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы : Указ Президента Респ. Беларусь от 15 сент. 2021 г. № 348 : в ред. от 25 октября 2022 г. № 381 // ilex : информ. правовая система (дата обращения: 18.02.2026).
26. Об утверждении Правил по разработке бизнес-планов инвестиционных проектов : постан. Министерства экономики Респ. Беларусь от 31 авг. 2005 г. № 158 : в ред. от 10 мая 2018 г. № 15 // ilex : информ. правовая система (дата обращения: 18.02.2026).
27. О порядке формирования и использования средств инновационных фондов : Указ Президента Респ. Беларусь от 7 авг. 2012 г. № 357 : в ред. от 21 дек. 2025 г. № 448 // ilex : информ. правовая система (дата обращения: 13.02.2026).
28. О реализации Указа Президента Республики Беларусь от 15 сентября 2021 г. № 348 : постан. Совета Министров Респ. Беларусь от 12 ноя. 2021 г. № 642 : в ред. от 13 ноя. 2025 г. № 639 // ilex : информ. правовая система (дата обращения: 18.02.2026).

29. Об утверждении Положения о порядке создания субъектов инновационной инфраструктуры : Указ Президента Респ. Беларусь от 3 января 2007 г. № 1 : в ред. от 1 авг. 2022 г. № 265 // ilex : информ. правовая система (дата обращения: 12.02.2026).

References

1. Ob utverzhdenii Koncepcii nacional'noj bezopasnosti Respubliki Belarus' : reshenie Vsebelorusskogo narodnogo sobraniya, 25 aprelya 2024 g. № 5 // ilex : inform. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 12.02.2026).
2. O Gosudarstvennoj programme innovacionnogo razvitiya Respubliki Belarus' na 2026–2030 gody : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 21 dek. 2021 g. № 448 // ilex : inform. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 12.02.2026).
3. Lenchuk, E. B. Proekty tekhnologicheskogo suvereniteta kak instrument innovacionnogo razvitiya rossijskoj ekonomiki / E. B. Lenchuk, V. I. Filatov // Ekonomicheskie i social'nye peremeny: fakty, tendencii, prognoz. – 2024. – № 3. – S. 68–81.
4. Starovojtova, A. D. Stimulirovanie ekonomicheskogo rosta s pomoshch'yu mer gosudarstvennoj innovacionnoj politiki: opyt Respubliki Belarus' / A. D. Starovojtova // Vosemnadcataya godichnaya nauchnaya konferenciya. Social'no-gumanitarnye nauki. – 2025. – CH. 2. – S. 370–376.
5. Zajceva, N. V. Istoriya stanovleniya Koncepcii innovacionnogo razvitiya Respubliki Belarus' // N. V. Zajceva, I. N. Kandrichina // Trudy BGTU. Seriya 6: Istoriya, filosofiya. – 2022. – № 1 (257). – S. 98–101.
6. Giraev, V. K. Gosudarstvennoe regulirovanie ekonomicheskogo rosta: mirovoj opyt i vyvody dlya Rossii / V. K. Giraev, F. A. Kuculova, H. M. Hadzhalova // Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki. – 2024. – № 11 (169). – S. 1–18.
7. Zvyagincev, P. S. Gosudarstvennye programmy kak instrument upravleniya social'no-ekonomicheskim razvitiem Rossii / P. S. Zvyagincev // Rossiya: tendencii i perspektivy razvitiya. – 2018. – № 13–1. – S. 54–58.
8. Zvyagincev, P. S. Rol' gosudarstvennyh programm v modernizacii, innovacionnom i tekhnologicheskom razvitii i importozameshchenii Rossijskoj ekonomiki / P. S. Zvyagincev // Rossiya: tendencii i perspektivy razvitiya. – 2017. – № 12–2. – S. 591–596.
9. Zvyagincev, P. S. Gosudarstvennye programmy Rossijskoj Federacii i ih ekonomicheskaya effektivnost' / P. S. Zvyagincev // Vestnik Instituta ekonomiki Rossijskoj akademii nauk. – 2016. – № 6. – S. 171–183.
10. Mhitaryan, YU. I. Osobennosti ocenki effektivnosti gosudarstvennyh programm Rossijskoj Federacii / YU. I. Mhitaryan // Vek kachestva. – 2018. – № 2. – S. 7–19.
11. Mhitaryan, YU. I. Povyshenie effektivnosti realizacii gosudarstvennyh programm Rossijskoj Federacii / YU. I. Mhitaryan // Vek kachestva. – 2019. – № 1. – S. 8–18.
12. Mhitaryan, YU. I. Problemy povysheniya effektivnosti gosudarstvennyh programm Rossijskoj Federacii / YU. I. Mhitaryan // Vek kachestva. – 2018. – № 1. – S. 7–19.
13. Breusova, A. G. Ocenka effektivnosti gosudarstvennyh programm / A. G. Breusova // Vestnik OmGU. Seriya: Ekonomika. – 2015. – № 2. – S. 128–136.
14. Breusova, A. G. Upravlenie izmeneniyami v gosudarstvennyh (municipal'nyh) programmah / A. G. Breusova // Vestnik OmGU. Seriya: Ekonomika. – 2016. – CH. 1, № 3. – S. 153–161.
15. Breusova, A. G. Upravlenie izmeneniyami v programmah na osnove ocenki effektivnosti (chast' 2) / A. G. Breusova, A. A. Korableva // Vestnik OmGU. Seriya: Ekonomika. – 2016. – CH. 2, № 4. – S. 147–158.
16. Toriya, R. A. Gosudarstvennaya programma: soderzhanie, istochniki, process vnedreniya, principy i problemy formirovaniya / R. A. Toriya // Problemy ekonomiki i yuridicheskoj praktiki. – 2015. – № 5. – S. 35–38.
17. Toriya, R. A. Finansovo-pravovye problemy perekhoda k programmnomu byudzhetu / R. A. Toriya // Problemy ekonomiki i yuridicheskoj praktiki. – 2015. – № 5. – S. 102–105.
18. Borshchevskij, G. A. Instrumenty ocenki realizacii gosudarstvennyh programm Rossijskoj Federacii / G. A. Borshchevskij // Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyj vestnik. – 2018. – № 67. – S. 6–30.
19. Sovershenstvovanie strategicheskogo upravleniya na osnove ocenki makroekonomicheskoj effektivnosti gosudarstvennyh programm / I. A. Kirichenko, S. B. Kolyarov, T. N. Marshova, A. M. Pomyalov // Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyj vestnik. – 2018. – № 67. – S. 181–202.
20. Gomanova, T. K. Regional'nye osobennosti ocenki effektivnosti gosudarstvennyh programm: finansovyj aspekt / T. K. Gomanova // Voprosy upravleniya. – 2018. – № 6 (36). – S. 52–59.
21. Korableva, A. A. Metodicheskie osnovy ocenki effektivnosti municipal'nyh programm / A. A. Korableva // Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika. – 2017. – № 4 (439). – S. 691–705.
22. Grodskaya, G. N. Gosudarstvennye programmy v sisteme strategicheskogo planirovaniya: mekhanizm integracii i realizaciya principov proektnogo upravleniya / G. N. Grodskaya, E. S. Valyaeva // Vestnik VUiT. – 2019. – № 3. – S. 31–41.
23. O prioritetnyh napravleniyah nauchnoj, nauchno-tekhnicheskoj i innovacionnoj deyatel'nosti na 2021–2025 gody : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 7 maya 2020 g. № 156 // ilex : inform. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 12.02.2026).
24. O prioritetnyh napravleniyah nauchnoj, nauchno-tekhnicheskoj i innovacionnoj deyatel'nosti na 2026–2030 gody : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 1 apr. 2025 g. № 135 // ilex : inform. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 14.02.2026).
25. O Gosudarstvennoj programme innovacionnogo razvitiya Respubliki Belarus' na 2021–2025 gody : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 15 sent. 2021 g. № 348 : v red. ot 25 oktyabrya 2022 g. № 381 // ilex : inform. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 18.02.2026).
26. Ob utverzhdenii Pravil po razrabotke biznes-planov investicionnyh proektov : postan. Ministerstva ekonomiki Resp. Belarus' ot 31 avg. 2005 g. № 158 : v red. ot 10 maya 2018 g. № 15 // ilex : inform. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 18.02.2026).
27. O poryadke formirovaniya i ispol'zovaniya sredstv innovacionnyh fondov : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 7 avg. 2012 g. № 357 : v red. ot 21 dek. 2025 g. № 448 // ilex : inform. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 13.02.2026).
28. O realizacii Ukaza Prezidenta Respubliki Belarus' ot 15 sentyabrya 2021 g. № 348 : postan. Soveta Ministrov Resp. Belarus' ot 12 noya. 2021 g. № 642 : v red. ot 13 noya. 2025 g. № 639 // ilex : inform. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 18.02.2026).
29. Ob utverzhdenii Polozheniya o poryadke sozdaniya sub"ektov innovacionnoj infrastruktury : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 3 yanvarya 2007 g. № 1 : v red. ot 1 avg. 2022 g. № 265 // ilex : inform. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 12.02.2026).

Материал поступил 23.02.2026, одобрен 02.03.2026, принят к публикации 03.03.2026

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-298-304

УДК 656.13:658.7

СОСТОЯНИЕ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ УЗБЕКИСТАН

А. Р. Нормирзаев

К. т. н., доцент, доцент кафедры логистики, Наманганский государственный технический университет, Наманган, Узбекистан, e-mail: nabducaum@mail.ru

Реферат

В статье рассматриваются вопросы транспорно-логистической системы Республики Узбекистан и ее развития, анализ и статистика грузооборота национальных перевозчиков, направления совершенствования транспортных и инновационных решений в логистическом бизнесе, объем международных перевозок грузов и стимулы для увеличения объема транспортно-логистических услуг, основные проблемы, которые возникают при достижении технического перевооружения и модернизации транспортного комплекса в целом. Рассмотрены также вопросы получения высокой экономической эффективности и безопасности обеспечения доступности транспортных услуг, гарантирующей социальную стабильность, развитие межрегиональных связей и национального рынка труда, а также бесперебойный характер предоставления транспортных услуг.

Транспортно-логистическая сфера Узбекистана активно развивается, демонстрируя рост числа компаний, но сталкивается с необходимостью повышения качества услуг 3PL-провайдеров, стандартизации и решения вопросов ответственности национальных экспедиторов. Несмотря на потребность в улучшении инфраструктуры, Узбекистан стремится стать транзитным хабом, привлекая международных игроков, однако местные компании пока отстают от мировых стандартов, что приводит к предпочтению иностранных логистических операторов. Состояние транспортно-логистической системы Республики Узбекистан находится на этапе цифровой трансформации и инфраструктурного расширения. Современное развитие отрасли характеризуется рядом взаимосвязанных ключевых аспектов: наблюдается рост макроэкономических показателей и расширение объёма транспортно-логистического рынка, осуществляется активное развитие транспортной инфраструктуры и обновление подвижного состава, усиливаются процессы цифровизации и внедрения адаптивных систем управления, реализация стратегических реформ в транспортной сфере формирует институциональные условия для устойчивого развития, интеграции в международные транспортные коридоры и повышения конкурентоспособности национальной транспортно-логистической системы.

Развитие транспортного комплекса страны направлено на повышение транспортной безопасности и внедрение цифровых логистических систем, а также на стимулирование национальных транспортных операторов, способных обеспечивать интеграцию мультимодальных перевозок и предоставление услуг уровня 3PL и выше. В целях формирования устойчивого и конкурентоспособного рынка транспортно-логистических услуг предусматривается создание благоприятных условий для развития национальных логистических организаций, работающих по принципам «точно в срок» и «от двери до двери», с возможностью комплексного оказания таможенных, транспортных, складских и информационных услуг. Ключевым фактором реализации стратегических задач является внедрение и стимулирование использования цифровых и инновационных технологий в международных грузоперевозках.

Ключевые слова: логистика, грузооборот, объем, развитие, транспорт, экономика, интегрирование, дороги, регионы, транзит, перевозка, услуга, цифровизация, система.

STATE OF TRANSPORT AND LOGISTICS SERVICES IN THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

A. R. Normirzaev

Abstract

The article examines the current state and development of the transport and logistics system of the Republic of Uzbekistan. It provides an analysis of the sector's performance, including statistical data on cargo turnover of national carriers and trends in international freight transportation. The study highlights key directions for improving transport infrastructure and introducing innovative solutions in the logistics business. The volume of international cargo transportation and transport and logistics services has increased in recent years. However, the sector faces significant challenges related to technical re-equipment, modernization of the transport complex, and improvement of service quality. Particular attention is paid to achieving high economic efficiency, ensuring transport safety and accessibility, maintaining social stability, strengthening interregional cooperation, supporting the national labor market, and guaranteeing uninterrupted transport services.

The transport and logistics sector of Uzbekistan is actively developing, as evidenced by the growing number of companies operating in the market. Nevertheless, there is a need to enhance the quality of 3PL services, standardize logistics operations, and clearly define the responsibility of national freight forwarders. Despite ongoing infrastructure improvements and Uzbekistan's strategic goal of becoming a regional transit hub, domestic logistics companies still lag behind international standards, which leads to a preference for foreign logistics operators. Currently, the transport and logistics system of Uzbekistan is undergoing digital transformation and infrastructure expansion. The modern development of the industry is characterized by several interrelated factors: growth of macroeconomic indicators, expansion of the transport and logistics market, active modernization of transport infrastructure and rolling stock, strengthening of digitalization processes, and implementation of adaptive management systems. Strategic reforms in the transport sector are creating institutional conditions for sustainable development, integration into international transport corridors, and enhancement of the competitiveness of the national transport and logistics system.

The development of the national transport complex is focused on improving transport security, implementing digital logistics systems, and supporting national transport operators capable of integrating multimodal transportation and providing 3PL-level services and higher. To establish a stable and competitive transport and logistics market, it is planned to create favorable conditions for national logistics companies operating under the principles of "just-in-time" and "door-to-door," with comprehensive provision of customs, transport, warehousing, and information services. A key factor in achieving these strategic objectives is the active introduction and promotion of digital and innovative technologies in international cargo transportation.

Keywords: logistics, cargo turnover, volume, development, transport, economy, integration, roads, regions, transit, transportation, service, digitalization, system.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-305-310

Введение

Стратегия развития Узбекистана предусматривает принятие системных и целенаправленных мер по устранению существующих проблем в рамках реализации Стратегии «Узбекистан–2030». В качестве ключевой цели определён дальнейший рост уровня и качества жизни населения, достигаемый за счёт повышения конкурентоспособности национальной экономики и формирования государства, ориентированного на удобство и потребности граждан. Сегодня в условиях снижения темпов роста мировой экономики, усиления конкуренции на внутреннем и внешних рынках республики, повышения требований к качеству выпускаемой продукции и оказываемых услуг транспортный комплекс страны представляет собой неотъемлемый элемент экономической безопасности транспорта, под которой понимается состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства в транспортной сфере от внутренних и внешних угроз, а также состояние защищенности транспортного комплекса от этих угроз [1].

Кабинет Министров Республики Узбекистан обязал разработать программу формирования транспортно-логистической системы Республики Узбекистан до 2030 г. [2].

В общем виде национальные интересы Республики Узбекистан в транспортной сфере состоят в следующем:

- в удовлетворении потребностей личности, общества и государства в современном спектре транспортных услуг;
- достижении путем технического перевооружения и модернизации транспортного комплекса высокой экономической эффективности и безопасности обеспечения доступности транспортных услуг на уровне, гарантирующем социальную стабильность, развития межрегиональных связей и национального рынка труда, а также бесперебойного характера предоставления транспортных услуг;
- приведении транспортной системы Узбекистана к уровню международных стандартов, что является необходимым условием реализации транзитного потенциала транспортного комплекса, развития экспортно-импортных услуг, предупреждения преступлений на транспорте включая терроризм, обеспечения военной безопасности и укрепления позиций Республики Узбекистан на мировой арене [2].

Достижения и основные проблемы для решения в ближайшей перспективе транспортно-логистической системы

В стране осуществляется ряд последовательных мер по дальнейшему развитию транспортно-логистической системы, привлечению инвестиций в улучшение транспортной инфраструктуры, созданию здоровой конкурентной среды на рынке перевозок грузов.

Реализация крупных транспортных инфраструктурных проектов позволила решить задачи обеспечения взаимосвязанности регионов страны и диверсификации транспортных коридоров.

На сегодняшний день протяженность автомобильных дорог общего пользования составляет 42371 км (в том числе дорог международного значения – 3834 км), железных дорог общего пользования – 7400 км (в том числе электрифицированных железных дорог – 3145 км), воздушных трасс – 26 тысяч км, эксплуатируемых внутренних водных путей – 550 км (из них с гарантированными габаритами судовых ходов – 280 км).

В республике функционируют всего 77 пунктов пропуска на государственной границе, открытых для международного сообщения, в том числе 48 – на автомобильных дорогах, 17 – на территории приграничных железнодорожных станций, 11 – в аэропортах и 1 – в речном порту.

За последние три года проведен ряд мероприятий по улучшению инфраструктуры пограничных пунктов пропуска, повышению эффективности таможенного контроля, в частности за счет реконструкции пограничных пунктов пропуска «Яллама» и «Олот», их пропускная способность увеличилась в четыре раза, запущена таможенная информационная система «Единое окно», отвечающая международным рекомендациям и критериям управления рисками.

В республике функционируют 16 крупных мультимодальных логистических центров с общей годовой мощностью обработки грузов в 10,7 млн тонн.

В 2017–2024 годы наблюдалась тенденция устойчивого роста показателей грузоперевозок. Объем международных перевозок грузов увеличился в 1,8 раза и в 2024 году составил 59,6 млн тонн (из них автомобильным транспортом – 16,6 млн тонн, железнодорожным транспортом – 43,0 млн тонн, воздушным транспортом – 83 тыс. тонн). Согласно отчету Всемирного банка за 2023 год, в Индексе эффективности логистики Узбекистан поднялся на 88-е место среди 139 стран (99-е место в 2018 году), заняв пятое место среди государств СНГ и второе место среди государств Центральной Азии. Общий балл: 2,6 из пяти возможных. Показатели по отдельным критериям (2023 г.): таможня: 140-е место (2,6 балла); инфраструктура: 89-е место (2,4 балла); международные перевозки – 91-е место (2,6 балла); качество логистических услуг – 92-е место (2,6 балла); отслеживание грузов – 105-е место (2,4 балла); своевременность поставок – 101-е место (2,8 балла) [3].

В январе 2025 года в Узбекистане принята программа по дальнейшему развитию транспортно-логистической системы с целью войти в Топ-50 мирового рейтинга LPI [2].

Вместе с тем в транспортно-логистической системе сохраняются следующие основные проблемы, которые необходимо решить в ближайшей перспективе:

– неэффективность систем и длительность сроков доставки грузов на внешние рынки, наличие определенных барьеров на внешнеторговых маршрутах, обеспечивающих выход на международные и региональные рынки, в частности, ограничения, вызванные экономическими санкциями, сложности в получении виз и других разрешительных документов, отсутствие полноценного обмена данными между пограничными, таможенными и другими контролирующими органами (отсутствие взаимного признания результатов контроля);

– высокая доля транспортно-логистических затрат в стоимости экспортно-импортных операций, неконкурентоспособность цен на предоставляемые услуги (тарифы, сборы, ставки аренды складских помещений и прочее);

– низкая пропускная способность объектов транспортной инфраструктуры и пограничных пунктов пропуска, а также незадействованность в полной мере имеющегося транзитного потенциала страны (в 2024 году объем транзитных перевозок грузов составил 13,9 млн тонн, а по заключению международных экспертов, за счет запуска крупных региональных проектов существует возможность доведения объема транзитных перевозок грузов до 23 млн тонн);

– низкий уровень присутствия 3PL- и 4PL-операторов на рынке логистических услуг. В настоящее время основная часть транспортно-логистических операций в стране осуществляется в формате 1PL (все процессы в логистике выполняет сам производитель) и 2PL (услуги по перевозке грузов и складированию предоставляются на основе аутсорсинга), лишь некоторые компании предоставляют ограниченный спектр услуг в формате 3PL (оказание всего пакета логистических услуг);

– недостаточный уровень развития сети логистических центров, низкая интеграция существующих в стране логистических объектов в международные схемы поставок, недостаточный уровень автоматизации складских процессов;

– низкий уровень цифровизации в транспортно-логистической сфере, несоответствие системы подготовки, переподготовки и повышения квалификации кадров современным стандартам и требованиям. Нехватка квалифицированных профессиональных кадров в данной сфере оказывает отрицательное влияние на качество предоставляемых услуг.

Необходимым условием интеграции в мировую экономику является качественное развитие транспортного комплекса с оптимальными условиями для внешней торговли, способными привести к снижению издержек, повышению конкурентоспособности национальной экономики и международных транспортных коридоров, обязательной характеристикой которых является высокий уровень транспортной безопасности. Существует ряд важных для страны экономических и политических вопросов, при решении которых транспорт выполняет свою особую роль. В первую очередь относится задача эффективного использования потенциальных экономических и политических возможностей, заложенных в стратегически важном расположении Узбекистана в Центральной Азии.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-305-310

В условиях нарастания процессов глобализации и транснационализации экономики, формирования единого мирового рынка товаров, капиталов и технологий, а также интенсификации международного общения, быстрого роста транспортных услуг превращение внутри государственных транспортных коммуникаций в органическую часть международных транспортных путей способно принести республике огромную экономическую и политическую выгоду [3, 4].

Перевозка грузов Республики Узбекистан

За период с января-сентября 2020 года по аналогичный период 2024 года зафиксирован рост по показателям грузоперевозок. В перевозке грузов среди наблюдаемых видов преобладает доля автомобильного транспорта (1 021,7 млн т). Железнодорожным транспортом было отправлено 55,9 млн т груза. Через трубопроводный транспорт перекачаны 45,5 млн т газа. Относительно низкий показатель грузоперевозок зафиксирован на воздушном транспорте – 9,0 тыс. т (см. рисунок 1) [3].

С 2020 г. по 2024 г. время в республике наблюдается устойчивый рост предоставления транспортных услуг по перевозкам грузов. Спрос на транспортные услуги характеризуется объемом перевезенных грузов и выполненной транспортной работой (тонно-километров). Наибольший удельный вес в объеме перевозок грузов занимает автомобильный (около 70 %) и железнодорожный (около 30 %) транспорт (см. рисунок 2). Значительную роль в перевозке грузов и пассажиров играет автомобильный транспорт. В январе–сентябре 2024 года объем грузооборота автомобильного транспорта увеличился на 1 365,4 млн т-км и составил 16 856,0 млн т-км или стал больше на 8,8 %, чем в аналогичном периоде 2023 года. Несмотря на то, что физически 9/10 всех грузов перевозится грузовиками, основную работу по перемещению грузов на дальние расстояния (грузооборот) делят между собой трубопроводы и железные дороги. При этом экспортные перевозки автотранспортом в конце 2024 года выросли более чем в два раза [3].

По итогам января–сентября 2024 года автомобильным транспортом было перевезено 1021,7 млн тонн грузов, а объем грузоперевозок, по сравнению с аналогичным периодом 2023 года, увеличился на 5,1 % [3]. Данные по итогам января–сентября 2024 года подтверждают, что автомобильный транспорт стал основным драйвером роста: За соответствующий период 2023 года отмечено увеличение объемов грузоперевозок на 4,1 %, за тот же период 2022 и 2020 годов темпы роста составили 106,2 % и 102,0 % соответственно, за январь-сентябрь 2021 года зафиксировано снижение объемов грузоперевозок на 0,7 %. Статистика за 2024 год показывает, что автомобильный транспорт – это «ракета» вашей логистической системы. Если темп роста грузооборота сохранится, Узбекистан имеет все шансы превысить целевые показатели эффективности в 75 % уже к середине 2026 года.

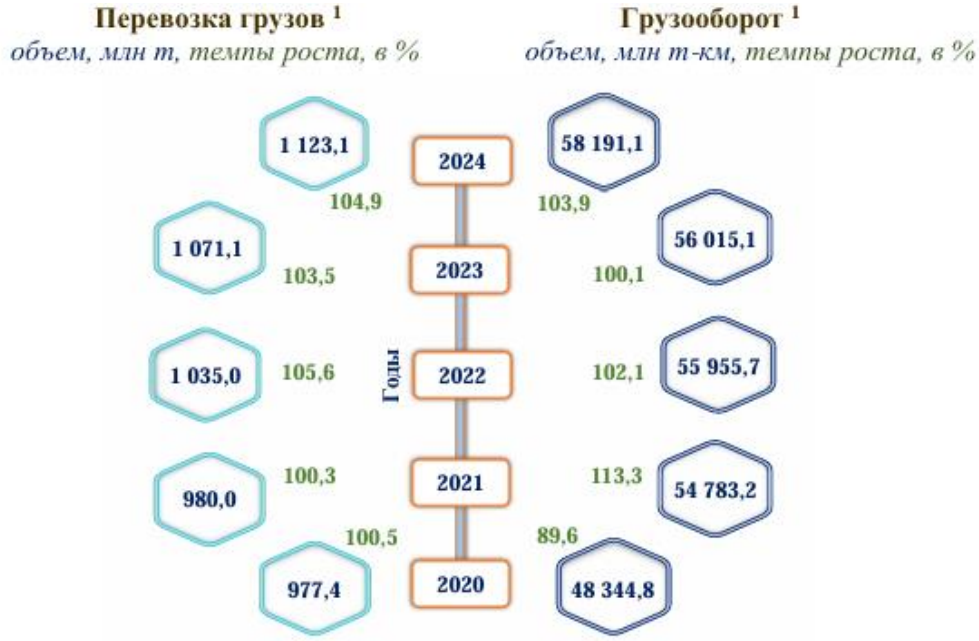


Рисунок 1 – Объем и темпы роста перевозки грузов и грузооборота всеми видами транспорта (за январь-сентябрь, темпы роста к соответствующему периоду предыдущего года) [3]



Рисунок 2 – Объем и прирост (снижение) перевозки грузов и грузооборота на автомобильном транспорте (за январь–сентябрь)

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-305-310

Высокие темпы роста грузооборота автомобильного транспорта были зафиксированы в январе-сентябре 2021 года – 120,2 %, снижение отмечено по итогам января–сентября 2020 года – на 1,6 % [3]. По сравнению с соответствующим периодом 2023 года, в рассматриваемый период наблюдается изменение доли некоторых видов транспорта в общем объеме грузооборота, а именно: трубопроводный и воздушный транспорт остался на уровне, железнодорожный транспорт снизил свои потоки на 1,3 %, в то же время отмечено увеличение доли автомобильного транспорта на 1,3 %.

За январь–сентябрь 2024 года (см. рисунок 3) значительную часть в общем объеме перевозки грузов занимал автомобильный транспорт – 91,0 %, на долю перевозки другими видами транспорта приходятся 9,0 % [3].

По итогам января–сентября 2024 года в общем объеме грузооборота на трубопроводный транспорт пришлись 36,1 %, на железнодорожный – 34,6 %, на автомобильный – 29,0 %, на воздушный – 0,3 % (см. рисунок 4).

С 2023 года идет уверенный рост, достигнув максимума в 29,0 к 2024 году. Это свидетельствует об интенсивном развитии дорожной инфраструктуры и увеличении логистических потоков внутри страны. Воздушный транспорт занимает стабильно малую долю в общем объеме (0,3–0,4). Это характерно для общей структуры транспортных сетей, где авиация берет на себя специфические высокоценные или срочные задачи, не конкурируя по «протяженности» или массовости с наземными видами транспорта. График наглядно подтверждает тезис из предыдущих сообщений: логистическая эффективность системы выросла до 75 % к 2023–2024 годам именно за счет диверсификации и усиления автомобильного и железнодорожного секторов. Наблюдается переход от доминирования трубопроводов к более сбалансированному распределению между трубами, рельсами и дорогами.

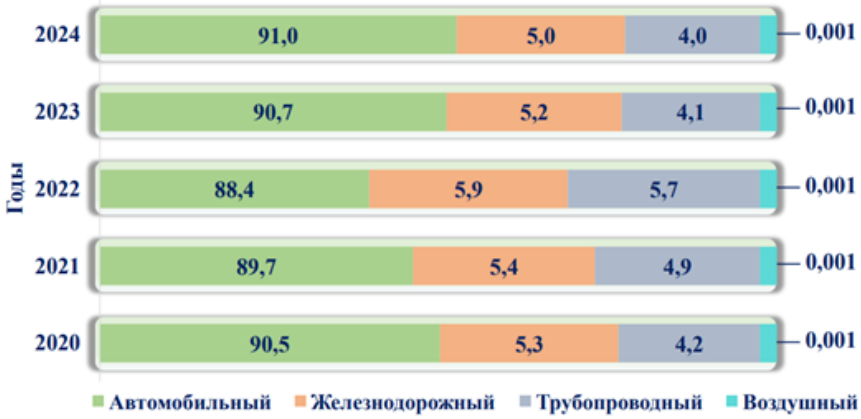


Рисунок 3 – Структура перевозки грузов по видам транспорта (за январь–сентябрь, в %)

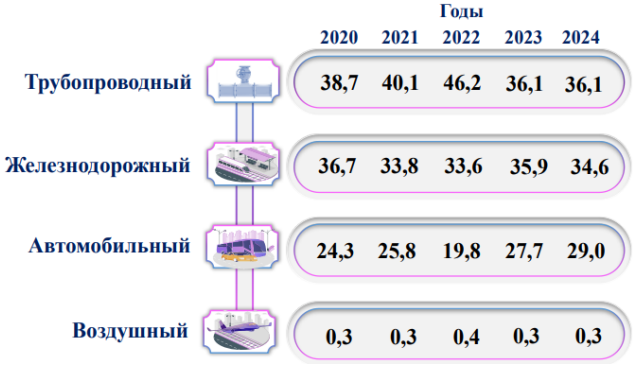


Рисунок 4 – Структура грузооборота по видам транспорта (за январь–сентябрь, в %)

Статистика подтверждает, что в Узбекистане происходит интенсификация автомобильных перевозок. Несмотря на то, что железнодорожные и трубопроводные сети занимают значительную часть инфраструктуры, именно автомобильный транспорт берет на себя более 90 % всего физического объема грузов. Опережающий рост грузооборота (+8,8 %) над объемом (+5,1 %) свидетельствует об интеграции страны в более длинные логистические цепочки, что полностью соответствует стратегии развития до 2030 года.

Дальнейшее развитие транспортно-логистических услуг в Узбекистане тесно переплетено со стратегией «Узбекистан–2030», целью которой является превращение страны в ключевой международный транзитный хаб. Основываясь на динамике 2020–2024 годов, мы можем спроектировать концепцию развития, соответствующую государственным приоритетам. В Узбекистане планируется принять Концепцию по развитию транспортно-логистической системы до 2030 года, планируется организовать работу по пяти направлениям, включая условия по созданию международных перевозок.

Правительству дано указание создать новые маршруты для перевозки экспортных и импортных товаров, а также обеспечить местных перевозчиков условиями для их использования.

Кроме того, Президент поручил увеличить объем транзитных перевозок через Узбекистан, который должен составить 14,6 млн тонн в 2025 году (+13,7 %). Ожидается, что объем транзитных грузов на маршруте Беларусь–Пакистан вырастет до 700 тыс. тонн (+200 тысяч), на маршруте Китай–Европа – до 200 тыс. тонн (+50 тысяч) и на маршруте Китай–Афганистан – до 150 тыс. тонн (+80 тыс.) [4–10].

Роль автомобильных перевозок со временем будет возрастать, поскольку они отличаются высокой оперативностью и надёжностью, а также характеризуются более низким уровнем риска утраты и повреждения грузов по сравнению с альтернативными видами транспорта. Вместе с этим, для ряда скоропортящихся и срочных товаров автоперевозки являются единственным реальным способом транспортировки, так как на время доставки играет основной фактор для клиента. В силу этого, автомобильный транспорт является самим предпочтительным средством перевозки от производителя до двери клиента для сельскохозяйственной продукции, текстильных изделий и других не сырьевых товаров, производимых и экспортируемых из страны [5–7, 10–15].

Развитие транспортного комплекса страны в настоящее время должно осуществляться в направлении транспортной безопасности и внедрения логистических систем. Анализ показывает, стимулирование национальных транспортных операторов, способных наладить эффективное взаимодействие между мультимодальными перевозками, а также оказывать услуги в формате 3PL и выше дает толчок развитию отрасли. Создание условий благоприятных условий для участия национальных транспортно-логистических организаций в формировании рынка транспортно-логистических услуг в мультимодальных перевозках. Развитие логистических предприятий, работающих по принципу «точно в срок» и «от двери до двери» в транспортно-логистической сфере, имеющих возможность оказывать полный комплекс услуг в сфере таможенной, транспортной, складской и информационной логистики. Широкое внедрение и стимулирование использования цифровых и инновационных технологий в международных грузоперевозках [1, 5–7].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-305-310

Заключение

На начало 2026 года транспортно-логистическая система Республики Узбекистан находится в фазе глубокой цифровой трансформации и инфраструктурного расширения.

Состояние отрасли характеризуется следующими ключевыми аспектами.

1. Макроэкономические показатели и объем рынка. В 2025 году количество предприятий в сфере транспорта и хранения достигло 2578 единиц, что подтверждает устойчивый рост предпринимательской активности в секторе. За последние пять лет их число увеличилось на 42,7 %, что свидетельствует о высокой предпринимательской активности в секторе [16]. Общий объем инвестиций в отрасль в 2025 году превысил 25 трлн сумов, что позволило модернизировать ключевые транспортные узлы [16, 17]. К январю 2026 года Узбекистан закрепил за собой статус ключевого логистического хаба Центральной Азии, стремясь достичь 55-го места в международном Индексе эффективности логистики (LPI) к 2030 году [18, 19].

2. Инфраструктура и автопарк. Наблюдается резкий рост автомобилизации населения. На конец 2025 года количество автотранспортных средств в собственности физических лиц превысило 4,7 млн единиц, из которых более 90 % составляют легковые автомобили [16]. Это создает высокую нагрузку на дорожную сеть и требует внедрения интеллектуальных систем управления (ИИ) для оптимизации трафика [19, 20].

3. Цифровизация и адаптивное управление. Для решения проблемы пропускной способности дорог в 2025–2026 гг. активно внедряются модели адаптивного управления на основе нейронных сетей и алгоритмов обучения с подкреплением (Reinforcement Learning) [21, 22]. Внедрение «умных» светофоров и систем видеоаналитики (YOLO v10) позволило сократить среднее время в пути в крупных городах на 15–20 % [21, 24].

4. Стратегические реформы. Согласно принятой государственной концепции развития до 2030 года, с 2026 года в стране внедрена система рейтинга транспортно-логистических компаний [1]. Это направлено на повышение качества обслуживания и прозрачности рынка. Также ведется работа по запуску новых мультимодальных маршрутов, включая ускоренные блок-поезда по коридору «Китай – Центральная Азия – Европа» [17, 18].

Полностью внедрена система E-Logistics, объединяющая электронные транспортные накладные (e-CMR) и цифровые разрешения на перевозку. С 2025 года также запущен национальный рейтинг логистических компаний, повышающий прозрачность рынка [24].

Железнодорожное сообщение: Ведется активное строительство участка железной дороги «Китай – Кыргызстан – Узбекистан», что превращает страну в ключевой транзитный узел Нового Шелкового пути [17].

Складская логистика. По данным на январь 2026 года, Ферганская долина (Андижанская, Наманганская и Ферганская области) демонстрирует темпы роста складских площадей на уровне 12–15 % в год [25, 26, 27, 28]. Это связано с расширением СЭЗ «Коканд» (увеличение на 210 га к 2026 году) и модернизацией аэропортов в Намангане и Андижане.

Электротранспорт: В рамках «зеленой трансформации» 2026 года доля общественного электротраспорта в столице достигла целевых показателей, поддерживаемых сетью «умных» зарядных станций [2].

Список цитированных источников

1. О мерах по дальнейшему развитию транспортно-логистической системы Республики Узбекистан : постановление Президента Республики Узбекистан, от 27.01.2025 г. № ПП-28. – URL: https://base.spinform.ru/show_doc.fwx?rgn=165165 (дата обращения: 21.12.2025).
2. О стратегии «Узбекистан – 2030» : Указ Президента Республики Узбекистан от 11 сентября 2023 года № УП-158. – URL: https://lex.uz/ru/docs/6600404 (дата обращения: 26.12.2025).
3. Социально-экономическое положение Республики Узбекистан. – URL: https://share.google/ObWIYsXiSkzXI7QY9 (дата обращения: 11.12.2025).
4. Концепция развития транспортно-логистической системы Республики Узбекистан до 2030 года. – URL: https://nrm.uz/contentf?doc=771056_koncepciya_razvitiya_transportno-logisticheskoy_sistemy_respubliki_uzbekistan_do_2030_goda_(prilojenie_n_1_k_postanovleniyu_prezidenta_ruz_ot_27_01_2025_g_n_pp-28)&products=3_prakticheskaya_buhgalteriya (дата обращения: 07.01.2026).
5. Махмудов, Я. Реализация эффективных мер транспортной сферы города Намангана = Implementation of effective measures in the transport sector of Namangan city / Я. Махмудов ; науч. рук. А. Р. Нормирзаев // Развитие логистики и управления цепями поставок : материалы IV Международной научно-практической студенческой конференции (в рамках Международного молодежного форума «Креатив и инновации 2023»), г. Минск, 24 ноября 2023 года / редкол.: Т. В. Матюшинец, Р. Б. Ивуть, П. И. Лапковская ; сост. П. И. Лапковская. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 664–669.
6. Ивуть, Р. Б. Роль логистики в развитии страны. The role of logistics in the development of the country / Р. Б. Ивуть, А. Р. Нормирзаев // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сборник научных трудов : в 2 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: Т. В. Матюшинец (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2023. – Т. 2. – С. 108–112.
7. Normirzaev, A. R. Transportda intelektual tizimlarni qo ‘llash / A. R. Normirzaev, B. Tumanboeva // Ta'lim va rivojlanish tahlili onlayn ilmiy jurnali. – 2022. – Т. 2. – №. 7. – С. 150–157.
8. Нормирзаев, А. Анализ текущего состояния транспортной системы Узбекистана / А. Нормирзаев, У. Мамиров, З. Тургунов // Сборник материалов международной научно-практической конференции на тему: «Научные основы применения инновационных технологий в современном машиностроении: опыт и перспективы». NamMQI, 23–24 сентября 2022 года. – Наманган, 2022. – Часть 4. – С. 513–517.
9. Нормирзаев, А. Р. Логистика и его роль в развитие региона / А. Р. Нормирзаев, М. Тухтабаев // Инновации в строительстве, сейсмическая безопасность зданий и сооружений : Международная научная и научно-техническая конференция. – Наманган : НамИСИ, 2022. – С. 1170–1174.
10. Нормирзаев, А. Р. Анализ международной перевозки грузов и тенденции развитие отрасли = Analysis of international cargo transportation and industry development trends / А. Р. Нормирзаев, М. А. Тухтабаев, Б. Туманбаева // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сборник научных трудов: в 2 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: Д. В. Капский (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – Т. 2. – С. 228–235.
11. Нормирзаев, А. Р. Понятие о мультимодальных перевозках / А. Р. Нормирзаев, Х. Б. Атахонов, А. Р. Устабоев // Механика и технология. – 2021. – Т. 1, №. 2. – С. 76–81.
12. Normirzayev, A. R. Development of transportation system control system using geoformation technologies / A. R. Normirzayev, B. S. Egamberdiyev, I. Mekhmonaliyev // Экономика и социум. – 2021. – № 4–1 (83). – С. 245–247.
13. Теоретико-методическое обоснование оценки и развития логистической инфраструктуры / Р. Б. Ивуть, П. В. Попов, П. И. Лапковская, С. В. Прокопов // Наука и техника. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 69–78.
14. Ивуть, Р. Б. Экономические основы развития логистики международных автомобильных перевозок грузов в Республике Беларусь в условиях пандемии коронавируса / Р. Б. Ивуть, А. С. Зиневич // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 3. – С. 242–249.
15. Алгоритм решения задачи проектирования региональной логистической инфраструктуры / Р. Б. Ивуть, П. В. Попов, П. И. Лапковская, Н. Е. Шевелева // Наука и техника. – 2021. – № 4. – С. 352–356.
16. Транспорт и связь в Узбекистане. – URL: https://stat.uz/ru/publikatsii/3672-transport-i-svyaz-v-uzbekistane (дата обращения: 16.12.2025).
17. Ахмедов, А. А. Цифровизация транспортных коридоров ЦА / А. А. Ахмедов // Экономика и финансы. – 2025. – № 2. – С. 18–26.
18. World Bank. Logistics Performance Index (LPI) 2025: Uzbekistan Focus / World Bank. — Washington, DC: World Bank, 2025. – 48 p. – URL: https://lpi.worldbank.org (дата обращения: 15.01.2026).
19. Ziyodullaev, Sh. Kh. Разработка моделей машинного обучения для транспортных систем / Sh. Kh. Ziyodullaev // Вестник ТГТУ. – 2025. – № 1. – С. 45–52.
20. Исмаилов, М. Интеграция систем «Умный город» в Ташкенте / М. Исмаилов // Цифровые технологии. – Ташкент, 2026. – № 1. – С. 14–22.
21. Li, L. Reinforcement Learning for Adaptive Traffic Signal Control / L. Li, J. Cheng // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2024. – Vol. 25, Iss. 2. – P. 1120–1135.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-305-310

22. YOLOv10: Real-Time Object Detection for Urban Monitoring / A. Wang, H. Chen, L. Liu [et al.]. – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2405.14458.
23. Lopez, P. A. Microscopic Traffic Simulation with SUMO: Modeling and Analysis of Future Mobility Solutions / P. A. Lopez. – Berlin : Springer, 2024. – 320 p.
24. О развитии деятельности транспортно-логистических центров и транзитных транспортных коридоров : постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 08 окт. 2025 г. № 633. – URL: https://www.lex.uz (дата обращения: 15.01.2026).
25. Развитие транспортно-логистической и складской инфраструктуры регионов Республики Узбекистан : статистический обзор / Агентство статистики при Президенте Республики Узбекистан : [сайт]. – URL: https://stat.uz (дата обращения: 15.01.2026).
26. О мерах по расширению специальной экономической зоны “Коканд” : постановление Президента Республики Узбекистан от 10 июля 2024 г. № ПП-250. – URL: https://www.lex.uz/docs/7010854 (дата обращения: 15.01.2026).
27. Отчёт о модернизации аэропортов Намангана и Андижана и развитии логистической инфраструктуры / Министерство транспорта Республики Узбекистан : [сайт]. – URL: https://mintrans.uz (дата обращения: 15.01.2026).
28. Расширение СЭЗ «Коканд» и развитие логистических хабов в Ферганской долине / KUN.UZ. Электронное издание, 2024. – URL: https://kun.uz (дата обращения: 15.01.2026).

References

1. O merah po dal'nejshemu razvitiyu transportno-logisticheskoj sistemy Respubliki Uzbekistan : postanovlenie Prezidenta Respubliki Uzbekistan, ot 27.01.2025 g. № PP-28. – URL: https://base.spinform.ru/show_doc.fwx?rgn=165165 (data obrashcheniya: 21.12.2025).
2. O strategii «Uzbekistan – 2030» : Ukaz Prezidenta Respubliki Uzbekistan ot 11 sentyabrya 2023 goda № UP-158. – URL: https://lex.uz/ru/docs/6600404 (data obrashcheniya: 26.12.2025).
3. Social'no-ekonomicheskoe polozhenie Respubliki Uzbekistan. – URL: https://share.google/ObWIYsXiSkzXI7QY9 (data obrashcheniya: 11.12.2025).
4. Koncepciya razvitiya transportno-logisticheskoj sistemy Respubliki Uzbekistan do 2030 goda. – URL: https://nrm.uz/contentf?doc=771056_koncepciya_razvitiya_transportno-logisticheskoy_sistemy_respubliki_uzbekistan_do_2030_goda_(prilojenie_n_1_k_postanovleniyu_prezidenta_ruz_ot_27_01_2025_g_n_pp-28)&products=3_prakticheskaya_buhgalteriya (data obrashcheniya: 07.01.2026).
5. Mahmudov, YA. Realizaciya effektivnyh mer transportnoj sfery goroda Namangana = Implementation of effective measures in the transport sector of Namangan city / YA. Mahmudov ; nauch. ruk. A. R. Normirzaev // Razvitie logistiki i upravleniya cepyami postavok : materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj studencheskoj konferencii (v ramkah Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma «Kreativ i innovacii 2023»), g. Minsk, 24 noyabrya 2023 goda / redkol.: T. V. Matyushinec, R. B. Ivut', P. I. Lapkovskaya ; sost. P. I. Lapkovskaya. – Minsk : BNTU, 2023. – S. 664–669.
6. Ivut', R. B. Rol' logistiki v razvitii strany. The role of logistics in the development of the country / R. B. Ivut', A. R. Normirzaev // Avtotraktorostroenie i avtomobil'nyj transport: sbornik nauchnyh trudov : v 2 t. / Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet ; redkol.: T. V. Matyushinec (otv. red.) [i dr.]. – Minsk : BNTU, 2023. – T. 2. – S. 108–112.
7. Normirzaev, A. R. Transportda intelektual tizimlarni qo ‘llash / A. R. Normirzaev, B. Tumanboeva // Ta'lim va rivojlanish tahlili onlayn ilmiy jurnali. – 2022. – T. 2. – №. 7. – S. 150–157.
8. Normirzaev, A. Analiz tekushchego sostoyaniya transportnoj sistemy Uzbekistana / A. Normirzaev, U. Mamirov, Z. Turgunov // Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii na temu: «Nauchnye osnovy primeneniya innovacionnyh tekhnologij v sovremennom mashinostroenii: opyt i perspektivy». NamMQI, 23–24 sentyabrya 2022 goda. – Namangan, 2022. – CHast' 4. – S. 513–517.
9. Normirzaev, A. R. Logistika i ego rol' v razvitie regiona / A. R. Normirzaev, M. Tuhtabaev // Innovacii v stroitel'stve, sejsmicheskaya bezopasnost' zdanij i sooruzhenij : Mezhdunarodnaya nauchnaya i nauchno-tekhnicheskaya konferenciya. – Namangan : NamISI, 2022. – S. 1170–1174.
10. Normirzaev, A. R. Analiz mezhdunarodnoj perevozki gruzov i tendencii razvitie otrasli = Analysis of international cargo transportation and industry development trends / A. R. Normirzaev, M. A. Tuhtabaev, B. Tumanbaeva // Avtotraktorostroenie i avtomobil'nyj transport: sbornik nauchnyh trudov: v 2 t. / Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet ; redkol.: D. V. Kapskij (otv. red.) [i dr.]. – Minsk : BNTU, 2022. – T. 2. – S. 228–235.
11. Normirzaev, A. R. Ponyatie o mul'timodal'nyh perevozkah / A. R. Normirzaev, H. B. Atahonov, A. R. Ustaboev // Mekhanika i tekhnologiya. – 2021. – T. 1, №. 2. – S. 76–81.
12. Normirzayev, A. R. Development of transportation system control system using geoformation technologies / A. R. Normirzayev, B. S. Egamberdiyev, I. Mekhmonaliyev // Ekonomika i socium. – 2021. – № 4–1 (83). – S. 245–247.
13. Teoretiko-metodicheskoe obosnovanie ocenki i razvitiya logisticheskoj infrastruktury / R. B. Ivut', P. V. Popov, P. I. Lapkovskaya, S. V. Prokopov // Nauka i tekhnika. – 2023. – T. 22, № 1. – S. 69–78.
14. Ivut', R. B. Ekonomicheskie osnovy razvitiya logistiki mezhdunarodnyh avtomobil'nyh perevozok gruzov v Respublike Belarus' v usloviyah pandemii koronavirusa / R. B. Ivut', A. S. Zinevich // Nauka i tekhnika. – 2022. – T. 21, № 3. – S. 242–249.
15. Algoritm resheniya zadachi proektirovaniya regional'noj logisticheskoj infrastruktury / R. B. Ivut', P. V. Popov, P. I. Lapkovskaya, N. E. SHeveleva // Nauka i tekhnika. – 2021. – № 4. – S. 352–356.
16. Transport i svyaz' v Uzbekistane. – URL: https://stat.uz/ru/publikatsii/3672-transport-i-svyaz-v-uzbekistane (data obrashcheniya: 16.12.2025).
17. Ahmedov, A. A. Cifrovizaciya transportnyh koridorov CA / A. A. Ahmedov // Ekonomika i finansy. – 2025. – № 2. – S. 18–26.
18. World Bank. Logistics Performance Index (LPI) 2025: Uzbekistan Focus / World Bank. – Washington, DC: World Bank, 2025. – 48 p. – URL: https://lpi.worldbank.org (data obrashcheniya: 15.01.2026).
19. Ziyodullaev, Sh. Kh. Razrabotka modelej mashinnogo obucheniya dlya transportnyh sistem / Sh. Kh. Ziyodullaev // Vestnik TGTU. – 2025. – № 1. – S. 45–52.
20. Ismailov, M. Integraciya sistem «Umnyj gorod» v Tashkente / M. Ismailov // Cifrovye tekhnologii. – Tashkent, 2026. – № 1. – S. 14–22.
21. Li, L. Reinforcement Learning for Adaptive Traffic Signal Control / L. Li, J. Cheng // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2024. – Vol. 25, Iss. 2. – P. 1120–1135.
22. YOLOv10: Real-Time Object Detection for Urban Monitoring / A. Wang, H. Chen, L. Liu [et al.]. – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2405.14458.
23. Lopez, P. A. Microscopic Traffic Simulation with SUMO: Modeling and Analysis of Future Mobility Solutions / P. A. Lopez. – Berlin : Springer, 2024. – 320 p.
24. O razvitii deyatel'nosti transportno-logisticheskih centrov i tranzitnyh transportnyh koridorov : postanovlenie Kabineta Ministrov Respubliki Uzbekistan ot 08 okt. 2025 g. № 633. – URL: https://www.lex.uz (data obrashcheniya: 15.01.2026).
25. Razvitie transportno-logisticheskoj i skladskoj infrastruktury regionov Respubliki Uzbekistan : statisticheskij obzor / Agentstvo statistiki pri Prezidente Respubliki Uzbekistan : [sajt]. – URL: https://stat.uz (data obrashcheniya: 15.01.2026).
26. O merah po rasshireniyu special'noj ekonomicheskoj zony “Kokand” : postanovlenie Prezidenta Respubliki Uzbekistan ot 10 iyulya 2024 g. № PP-250. – URL: https://www.lex.uz/docs/7010854 (data obrashcheniya: 15.01.2026).
27. Otchyot o modernizacii aeroportov Namangana i Andizhana i razvitii logisticheskoj infrastruktury / Ministerstvo transporta Respubliki Uzbekistan : [sajt]. – URL: https://mintrans.uz (data obrashcheniya: 15.01.2026).
28. Rasshirenie SEZ «Kokand» i razvitie logisticheskih habov v Ferganskoj doline / KUN.UZ. Elektronnoe izdanie, 2024. – URL: https://kun.uz (data obrashcheniya: 15.01.2026).

Материал поступил 27.01.2026, одобрен 13.02.2026, принят к публикации 13.02.2026

УДК 001.101:330.342.2

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ТРАНСФОРМАЦИЯ РЫНКА ТРУДА

К. И. Шарова

К. э. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной экономики, Барановичский государственный университет, Барановичи, Беларусь, e-mail: kseniya86@mail.ru

Реферат

На сегодняшний день наблюдаются масштабные тенденции цифровизации повседневной общественной жизни, автоматизации и роботизации производства, появление технологий генеративного искусственного интеллекта и внедрения их во все сферы жизнедеятельности общества. Искусственный интеллект представляет собой один из наиболее значимых факторов трансформации глобальной экономики, что приводит к фундаментальным сдвигам в структуре и функциях рынка труда. Возникает необходимость теоретического переосмысления роли труда в условиях, когда автоматизированные системы способны не только выполнять рутинные операции, но и осуществлять когнитивные функции, ранее считавшиеся исключительной прерогативой человека. Статья посвящена анализу влияния генеративного искусственного интеллекта и цифровой трансформации на современный рынок труда. Рассматривается двойственная природа этого воздействия: с одной стороны, технологии ИИ автоматизируют рутинные и монотонные операции, существенно повышая производительность труда, снижая издержки и высвобождая время для творческой, стратегической и интеллектуальной деятельности; с другой – создают риски замещения человеческого труда, особенно в сегментах низкой и средней квалификации, что усиливает структурную безработицу, цифровой разрыв и поляризацию занятости. В контексте Республики Беларусь рассматривается роль государственных программ цифровой трансформации, направленных на масштабное внедрение ИИ, роботизацию и создание высокотехнологичных рабочих мест, а также на перераспределение высвобождаемой рабочей силы в новые гибкие формы занятости и цифровые экосистемы. Для смягчения негативных последствий предлагается переориентация системы образования на развитие мета-когнитивных и «мягких» навыков, персонализированное обучение с использованием ИИ, непрерывное обновление компетенций (lifelong learning) и формирование этико-правовых рамок взаимодействия человека с искусственным интеллектом.

Ключевые слова: искусственный интеллект, рынок труда, факторы производства, экономика знаний, теория человеческого капитала, гибкие навыки.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND LABOR MARKET TRANSFORMATION

K. I. Sharova

Abstract

Today, there are large-scale trends of digitization in everyday public life, automation and robotization of production, the emergence of generative artificial intelligence technologies, and their integration into all spheres of societal activity. Artificial intelligence represents one of the most significant factors in the transformation of the global economy, leading to fundamental shifts in the structure and functions of the labor market. This necessitates a theoretical rethinking of the role of labor in conditions where automated systems are capable not only of performing routine operations but also of carrying out cognitive functions previously considered the exclusive prerogative of humans.

The article is devoted to analyzing the impact of generative artificial intelligence and digital transformation on the modern labor market. It examines the dual nature of this influence: on the one hand, AI technologies automate routine and monotonous operations, significantly increasing labor productivity, reducing costs, and freeing up time for creative, strategic, and intellectual activities; on the other hand, they create risks of displacing human labor, particularly in low- and medium-skilled segments, thereby exacerbating structural unemployment, the digital divide, and employment polarization.

In the context of the Republic of Belarus, the role of state programs for digital transformation is considered. These programs aim at large-scale implementation of AI, robotization, creation of high-tech jobs, as well as the redistribution of released labor force into new flexible forms of employment and digital ecosystems.

To mitigate negative consequences, a reorientation of the education system is proposed: emphasis on the development of meta-cognitive and “soft” skills, personalized learning using AI, continuous updating of competencies (lifelong learning), and the formation of ethical and legal frameworks for human–artificial intelligence interaction.

Keywords: artificial intelligence, labor market, factors of production, knowledge economy, human capital theory, soft skills.

Введение

Появление технологий генеративного искусственного интеллекта позволило существенно облегчить выполнение многих трудовых обязанностей, избавиться от рутинных операций и процессов, значительно ускорить обработку больших данных, автоматизировать задачи, в конечном итоге высвободить значительное количество свободного времени. Все это не может не приводить к значительному повышению производительности труда. При этом процесс распространения искусственного интеллекта и внедрения его во все сферы человеческого жизни оказал двойственное влияние на рынок труда. С одной стороны, автоматизация повышает производительность и снижает издержки, а с другой – создает риски массового высвобождения работников. Согласно последним исследованиям, искусственный интеллект может как автоматизировать существующие задачи, приводя к потере рабочих мест, так и стимулировать создание новых, повышая производительность. Так, по данным Всемирного экономического форума, в ближайшие пять лет существенно изменится рынок рабочих мест под воздействием цифровизации. Поэтому в эпоху тотального распространения цифровых технологий и искусственного интеллекта наиболее насущным вопросом, который волнует большинство обывателей, является перспектива рынка труда и актуальность получаемых профессий и навыков.

Материалы и методы исследования

В данной статье используются общенаучные методы исследования. Информационной базой послужили научные труды и статьи современных отечественных и зарубежных ученых, материалы государственных статистических органов Республики Беларусь. Проблемы развития искусственного интеллекта в современном обществе и влияние его на рынок труда анализируется различными

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-311-314

отечественными и зарубежными учеными и исследователями, такими как С. В. Абламейко, М. С. Абламейко, А. В. Бондарь, А. И. Буравлев, В. М. Ветошкин, В. Г. Дайнеко, Е. Ю. Дайнеко, А. В. Кузнецова, Д. В. Колпаков, Л. Г. Мамаева, Е. Н. Макаренко, Н. А. Олимов, И. А. Сушкова и др. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Однако единогласного мнения по поводу влияния искусственного интеллекта на рынок труда и экономическое развитие в целом в научной литературе пока не сложилось.

Результаты исследования и их обсуждение

Неопровержимым сегодня является факт, что искусственный интеллект значительно влияет на рынок труда, создавая новые профессии в сфере технологий, одновременно усиливая риски, связанные с цифровым разрывом, киберугрозами и потерей приватности, что делает необходимым анализ механизмов его регулирования.

Внедрение технологий искусственного интеллекта трансформирует рынок труда в сторону создания высокотехнологичных рабочих мест, способствует сокращению сферы рутинного и монотонного труда, положительно сказывается на производительности труда, а также снижении затрат на рабочую силу, что ведет к повышению общественного благосостояния и темпов экономического роста [11]. Появляются новые профессии: разработчики нейросетей, аналитики данных, специалисты по ИИ, инженеры машинного обучения.

Однако искусственный интеллект трансформирует не столько объем, сколько качество трудовых ресурсов, повышая компетенции работников, избавляя от монотонной и высвобождая время для творческой работы, способствуя в конечном итоге накоплению интеллектуального человеческого капитала.

Но и для низкоквалифицированного труда, для рабочих профессий процессы внедрения в работу нейросетей также диктуют необходимость приобретения новых знаний, а перевод рутинных операций в сферу искусственного интеллекта высвобождает время для накопления и сохранения человеческого капитала за счет высвобождения времени для отдыха и восстановления здоровья, переобучения и повышения квалификации, а также постдипломного образования [10].

Стоит подчеркнуть, что искусственный интеллект выступает с одной стороны комплементарным элементом, усиливающим продуктивность труда и создающим новые формы добавленной стоимости, а с другой стороны проявляется его субституциональность в замещении трудовых функций человека.

Так, Д. Аджемоглу и П. Рестрепо выявили, как искусственный интеллект влияет на баланс между замещением и дополнением труда. Замещение происходит, когда ИИ полностью берет на себя задачи (автоматизация), приводя к снижению спроса на труд; дополнение – когда ИИ усиливает человеческие способности, стимулируя рост занятости [12].

Замещение и дополнение труда по-разному проявляется на различных сегментах рынка труда:

– сектор рутинных задач (административные, бухгалтерские функции) подвергается наиболее интенсивной автоматизации и как следствие замещению труда искусственным интеллектом. Это приводит к сокращению спроса на низко- и среднеквалифицированную рабочую силу и, как следствие, к росту структурной безработицы;

– сектор креативных и социально-ориентированных профессий (менеджмент, дизайн, психотерапия, стратегическое планирование) демонстрирует устойчивый рост спроса, поскольку алгоритмы пока не способны полностью реплицировать эмоциональный интеллект, этическое суждение и креативное мышление;

– сектор «гибридных профессий», где человек и нейросети функционируют в режиме кооперации. Примерами могут служить радиологи, использующие ИИ-алгоритмы для интерпретации снимков, или юристы, применяющие нейросети для анализа прецедентного права, а также преподаватели, использующие нейросети для проведения занятий или интерпретации результатов обучающихся.

Последние два сектора являются примером дополнения труда технологиями искусственного интеллекта.

Существуют различные мнения относительно того, какие изменения на рынке труда вызовет развитие искусственного интеллекта. Однако большинство исследований показывает положительное влияние на производительность труда.

Так, исследования Стэнфордского университета показали, что внедрение технологий нейросетей позволяет быстрее выполнять задачи и улучшать качество результатов, а также сокращать разрыв в навыках между низко и высококвалифицированными работниками [13].

По данным McKinsey Global Institute, автоматизация рабочих мест под воздействием искусственного интеллекта может охватить до 30 % задач в большинстве профессий к 2030 году. Предполагается, что от 75 миллионов до 375 миллионов работников (от трех до четырнадцати процентов мировой рабочей силы) сменят профессиональные категории. Более того, всем работникам придется адаптироваться, поскольку их профессии будут эволюционировать вместе с все более совершенными машинами [14, с. 8].

В докладе McKinsey Global Institute «Состояние искусственного интеллекта в 2025 году» отмечается, что пока неясно каково будет влияние нейросетей на общее число рабочих мест и характер труда, однако растет спрос на ИИ-навыки – чаще всего в виде интеграции искусственного интеллекта в существующие роли [15].

В обзоре Всемирного банка 2018 года «Изменение характера труда» утверждалось, что труд меняется быстрее чем ожидалось, а технологический прогресс – особенно в области ИИ, робототехники и машинного обучения – приводит к автоматизации не только рутинных, но и когнитивных задач. При этом в данном докладе подчеркивается, что вряд ли будет наблюдаться полное исчезновение профессий, скорее возникнет частичная автоматизация и перераспределение задач между человеком и машиной [16, с. 3–5]. Таким образом, автоматизация будет скорее затрагивать задачи, а не профессии целиком.

Кроме того, можно согласиться с мнением, что большинство существующих рабочих мест трудно автоматизировать, потому что они требуют творческого подхода, сложных рассуждений, способности выполнять физические задачи в неструктурированной рабочей среде и умения договариваться о социальных отношениях [17, с. 76, 82]. В этом же ключе хотелось бы отметить, что обладатели накопленного человеческого капитала с большим объемом неявных знаний, опыта и компетенций в значительной степени имеют преимущество.

Вместе с тем, по данным доклада Всемирного экономического форума «Будущее рабочих мест», 53 % задач будут автоматизированы, а наиболее уязвимые сектора – белые воротнички с рутинными задачами. При этом структура рынка труда смещается от традиционных, рутинных и физически интенсивных профессий к высокотехнологичным, аналитическим и «зеленым» ролям. Возрастает спрос на специалистов по устойчивому развитию, инженеров по возобновляемой энергии, специалистов по электромобилям и т. д. – так называемые «зеленые» профессии. Это сопровождается ростом «гибридных» рабочих мест, требующих сочетания технических и мягких навыков (например, устойчивости и лидерства), и увеличением доли сектора услуг (здравоохранение, образование), что отражает демографические и социальные изменения. По данным доклада к 2030 году ожидаются потеря около 92 млн рабочих мест и создание 170 млн рабочих мест благодаря внедрению искусственного интеллекта. Таким образом, чистый прирост рабочих мест окажется 78 млн [18].

Е. Е. Лялькова, Е. А. Богдашкина, В. Э. Лобкова подчеркивают, что наиболее подвержены автоматизации низкоквалифицированные профессии, такие как операторы производственных линий, кассиры, работники сферы транспорта и складирования, а также работники финансовой и банковской сфер. В области здравоохранения искусственный интеллект может также привести к сокращению рабочих мест в некоторых областях, например в области медицинской диагностики. Востребованными на рынке труда остаются высококвалифицированные специалисты, обладающие компетенциями в области анализа данных, цифрового маркетинга, программирования и управления сложными системами [19].

Таким образом, нельзя однозначно говорить о позитивных или негативных тенденциях, порожденных внедрением искусственного интеллекта. Рынок труда трансформируется, некоторые профессии исчезают, другие появляются, вопрос лишь в том, насколько быстро экономическая система страны адаптируется под глобальные изменения.

Кроме того, исследование Yale Budget Lab показывает, что с момента запуска ChatGPT (ноябрь 2022) общий рынок труда не характеризовался значительной безработицей [20].

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-311-314

В то же время внедрение искусственного интеллекта меняет квалификационные требования к работникам.

1.Требования к мобильности. Работники способны работать удаленно, имея лишь технологическую базу и накопленные знания.

2.Непрерывное обновление знаний и готовность к lifelong learning (обучению на протяжении всей жизни). В отличие от традиционных специалистов XX века, современные работники должны постоянно обновлять и реструктурировать свои знания в соответствии с быстрыми технологическими изменениями.

3.Цифровые компетенции (цифровая грамотность и культура; умение работать с нейросетями, формулирование запросов, анализ Big Data).

Под влиянием цифровизации и распространения искусственного интеллекта добавляются так называемые soft skills – критическое мышление, креативность, коммуникация, работа в команде.

В Республике Беларусь идет активное развитие технологий искусственного интеллекта, поддерживаемое государственными программами, такими как Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на 2026–2030 годы, Национальная стратегия устойчивого развития на период до 2035 года, 2040 года и другие. Данные программы будут способствовать масштабной цифровой трансформации экономики на основе широкого внедрения информационных технологий нового поколения во все сферы жизнедеятельности, роботизации, активного использования в производстве «облачных» технологий, систем искусственного интеллекта и обработки большого объема данных. Эти меры будут способствовать созданию новых рабочих мест в высокотехнологичных отраслях. Так, ставится задача повысить уровень занятости населения не менее, чем на 70 % в 2040 году посредством перераспределения высвобождаемой рабочей силы в ходе роботизации и цифровизации производства на вновь создаваемые рабочие места в рамках реализации инвестиционных проектов, развития новых гибких форм и моделей занятости, включая обслуживание цифровых платформ и цифровых экосистем, расширения семейного бизнеса и самозанятости населения [21, с. 22].

В Республике Беларусь принимаются меры по адаптации к новым условиям, включая внедрение программ цифровой грамотности, поддержку стартапов и развитие инфраструктуры для удаленной работы.

Однако необходимо отметить, что классическая модель образования, ориентированная на получение фиксированных знаний, сталкивается с вызовами, связанными с быстроменяющимися технологиями. Для успешной адаптации к новым условиям необходима разработка базирующихся на искусственном интеллекте гибких образовательных программ, способствующих развитию таких навыков, как критическое, креативное мышление, инновационное творчество, решение комплексных производственно-хозяйственных задач и работа с большими объемами данных. Причем в современном, динамично меняющимся обществе многократно возрастает актуальность так называемого «образования в течение всей жизни» (Lifelong Learning), которое предполагает постоянное обновление знаний и навыков носителей человеческого капитала на протяжении всего его жизненного цикла. Искусственный интеллект и машинное обучение могут быть использованы как инструмент для персонализированного обучения, улучшения качества образовательного процесса, повышения интенсивности и доступности образования [11].

Представляются закономерными следующие направления повышения цифровой грамотности для адаптации рынка труда к новым условиям:

– модернизация систем образования с акцентом на развитие «мягких» и метакогнитивных навыков;

– создание национальных платформ непрерывного обучения (lifelong learning);

– разработка этико-правовых норм, регулирующих взаимодействие человека и ИИ;

– масштабные программы переквалификации на основе искусственного интеллекта для рабочих, чьи места попадут под сокращение;

– масштабирование курсов по внедрению нейросетей во всех отраслях, использование инструментов искусственного интеллекта в обучении, обработке данных, оказании медицинской помощи и т. д.

Кроме того, для интенсивного накопления и эффективного использования человеческого капитала в национальной экономике весьма плодотворным является широкое использования искусственного интеллекта в сфере образования.

Заключение

Таким образом, искусственный интеллект не просто меняет рынок труда – он переопределяет само понятие труда в экономике знаний.

Влияние искусственного интеллекта на рынок труда имеет как положительные, так и отрицательные стороны. С одной стороны, нейросети открывают новые возможности для создания высокооплачиваемых рабочих мест, а с другой, усиливает поляризацию рынка труда и создает риски для социально-экономической стабильности. Для минимизации негативных последствий необходим комплексный подход, включающий модернизацию образовательных систем, совершенствование миграционной политики и создание условий для равноправного доступа к цифровым технологиям. Система образования должна быть ориентирована на подготовку не просто трудовых ресурсов, а полноценного человеческого капитала в интеграции естественного и искусственного интеллекта. Школы и вузы должны развивать гибкие навыки (soft skills): критическое мышление, адаптивность, сотрудничество – поскольку именно они дополняют, а не конкурируют с искусственным интеллектом.

Список цитированных источников

1. Абламейко, С. В. Искусственный интеллект в междисциплинарной перспективе: философско-правовые аспекты / С. В. Абламейко, М. С. Абламейко // Филос. Науки. – 2021. – № 64 (5).
2. Буравлев, А. И. Искусственный интеллект: сущность, принципы работы, области применения / А. И. Буравлев, В. М. Ветошкин // Вооружение и экономика. – 2024. – № 2 (68). – С. 33–42.
3. Сушкова, И. А. Искусственный интеллект в экономике и системе экономической безопасности / И. А. Сушкова, Л. Н. Мамаева // Вестник РЭУ им. Н. В. Плеханова. – 2023. – Т. 20. – № 4 (130). – С. 44–53.
4. Олимов, Н. А. Использование искусственного интеллекта в цифровой экономика / Н. А. Олимов // Открытое образование. – 2025. – Т. 29, № 2. – С. 46–54.
5. Дайнеко, В. Г. Трансформация структуры интеллектуального капитала в период цифровизации экономики / В. Г. Дайнеко, Е. Ю. Дайнеко // Вестник ВГУ. Серия: Экономика и управление. – 2021. – № 1. – С. 3–12.
6. Кузнецова, А. В. Искусственный интеллект и информационная безопасность общества : монография / А. В. Кузнецова, С. И. Самыгин, М. В. Радионов ; под ред. П. С. Самыгина. – М. : РУСАИНС, 2016. – 118 с.
7. Колпаков, Д. В. Искусственный интеллект для экономического моделирования / Д. В. Колпаков // Ломоносов-2017 : материалы XXIV Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 10–14 апр. 2017 г. / МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., 2017. – С. 150–154.
8. Искусственный интеллект: от фундаментальных проблем к прикладным задачам : монография / под ред. Е. Н. Макаренко. – Ростов н/Д. : Издат.-полиграфич. комплекс Ростовского гос. экономич. ун-та, 2025. – Т. 1. – 394 с.
9. Дегтярева, И. В. Методология исследования искусственного интеллекта: социально-экономической аспект / И. В. Дегтярева // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия экономика. – 2025. – № 2 (52). – С. 72–79.
10. Шарова, К. И. Искусственный интеллект в контексте динамики человеческого капитала / К. И. Шарова, А. В. Бондарь // Белорусский экономический журнал. – 2025. – № 2. – С. 67–77.
11. Шарова, К. И. Влияние искусственного интеллекта на рынок труда и миграционные процессы / К. И. Шарова // Миграционные процессы в Российской Федерации: вызовы, практика, перспективы : материалы Всеросс. науч.-практич. конф. с междунар. участием, Йошкар-Ола, 24 апр. 2025 г. / Мин-во науки и высшего образ. Росс. Федерации, Поволжский гос. технич. ун-т ; редкол.: Н. И. Ларионова [и др.]. – Йошкар-Ола, 2025. – С. 221–230.

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-311-314

12. Acemoglu, D. The Race between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares, and Employment / D. Acemoglu, P. Restrepo // American Economic Review, 2018. – No. 108 (6). – P. 1488–1542.
13. Artificial Intelligence Index Report 2024 / Stanford University, 2024. – URL: hai_ai-index-report-2024-smaller2 (date of access: 29.12.2025).
14. Jobs Lost, Jobs Gained: Workforce Transitions in a Time of Automation / McKinsey Global Institute, December, 2017. – URL: https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/jobs-lost-jobs-gained-what-the-future-of-work-will-mean-for-jobs-skills-and-wages#/ (date of access: 29.12.2025).
15. Состояние ИИ в 2025 году. – URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai (дата обращения: 29.12.2025).
16. Изменение характера труда : доклад о мировом развитии, 2019 / Всемирный банк. – URL: https://www.vsemirnyjbank.org/ru/publication/wdr2019 (дата обращения: 29.12.2025). – DOI: 10.1596/978-1-4648-1328-3.
17. Бутл, Р. Искусственный интеллект и экономика: Работа, богатство и благополучие в эпоху мыслящих машин / Р. Бутл. – пер. с англ. – М. : Альпина ПРО, 2023. – 424 с.
18. Future of Jobs Report 2025 / World Economic Forum. – URL: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_Report_2025.pdf (date of access: 29.12.2025).
19. Лялькова, Е. Е. Влияние искусственного интеллекта на рынок труда: анализ изменений в спросе на квалификации и обучении / Е. Е. Лялькова, Е. А. Богдашкина, В. Э. Лобкова. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-iskusstvennogo-intellekta-narynok-truda-analiz-izmeneniy-v-sprose-na-kvalifikatsii-i-obuchenii/viewer (дата обращения: 29.12.2025).
20. Оценка влияния ИИ на рынок труда: текущее положение дел / М. Гимбел, М. Киндер, Д. Кендалл, М. Ли. – URL: https://budgetlab.yale.edu/research/evaluating-impact-ai-labor-market-current-state-affairs (дата обращения: 29.12.2025).
21. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь до 2040 года / Министерство экономики Республики Беларусь. – URL: https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/NSUR-2035-1.pdf (дата обращения: 29.12.2025).

References

1. Ablamejko, S. V. Iskusstvennyj intellekt v mezhdisciplinarnoj perspektive: filosofsko-pravovye aspekty / S. V. Ablamejko, M. S. Ablamejko // Filos. Nauki. – 2021. – № 64 (5).
2. Buravlev, A. I. Iskusstvennyj intellekt: sushchnost', principy raboty, oblasti primeneniya / A. I. Buravlev, V. M. Vetoshkin // Vooruzhenie i ekonomika. – 2024. – № 2 (68). – S. 33–42.
3. Sushkova, I. A. Iskusstvennyj intellekt v ekonomike i sisteme ekonomicheskoj bezopasnosti / I. A. Sushkova, L. N. Mamaeva // Vestnik REU im. N. V. Plekhanova. – 2023. – T. 20. – № 4 (130). – S. 44–53.
4. Olimov, N. A. Ispol'zovanie iskusstvennogo intellekta v cifrovoj ekonomika / N. A. Olimov // Otkrytoe obrazovanie. – 2025. – T. 29, № 2. – S. 46–54.
5. Dajneko, V. G. Transformaciya struktury intellektual'nogo kapitala v period cifrovizacii ekonomiki / V. G. Dajneko, E. YU. Dajneko // Vestnik VGU. Seriya: Ekonomika i upravlenie. – 2021. – № 1. – S. 3–12.
6. Kuznecova, A. V. Iskusstvennyj intellekt i informacionnaya bezopasnost' obshchestva : monografiya / A. V. Kuznecova, S. I. Samygin, M. V. Radionov ; pod red. P. S. Samygina. – M. : RUSAINS, 2016. – 118 s.
7. Kolpakov, D. V. Iskusstvennyj intellekt dlya ekonomicheskogo modelirovaniya / D. V. Kolpakov // Lomonosov-2017 : materialy XXIV Mezhdunar. nauch. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, Moskva, 10–14 apr. 2017 g. / MGU im. M. V. Lomonosova. – M., 2017. – S. 150–154.
8. Iskusstvennyj intellekt: ot fundamental'nyh problem k prikladnym zadacham : monografiya / pod red. E. N. Makarenko. – Rostov n/D. : Izdat.-poligrafich. kompleks Rostovskogo gos. ekonomich. un-ta, 2025. – T. 1. – 394 s.
9. Degtyareva, I. V. Metodologiya issledovaniya iskusstvennogo intellekta: social'no-ekonomicheskoj aspekt / I. V. Degtyareva // Vestnik UGNTU. Nauka, obrazovanie, ekonomika. Seriya ekonomika. – 2025. – № 2 (52). – S. 72–79.
10. SHarova, K. I. Iskusstvennyj intellekt v kontekste dinamiki chelovecheskogo kapitala / K. I. SHarova, A. V. Bondar' // Belorusskij ekonomicheskij zhurnal. – 2025. – № 2. – S. 67–77.
11. SHarova, K. I. Vliyanie iskusstvennogo intellekta na rynok truda i migracionnye processy / K. I. SHarova // Migracionnye processy v Rossijskoj Federacii: vyzovy, praktika, perspektivy : materialy Vseross. nauch.-praktich. konf. s mezhdunar. uchastiem, Joshkar-Ola, 24 apr. 2025 g. / Min-vo nauki i vysshego obraz. Ross. Federacii, Povolzhskij gos. tekhnich. un-t ; redkol.: N. I. Larionova [i dr.]. – Joshkar-Ola, 2025. – S. 221–230.
12. Acemoglu, D. The Race between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares, and Employment / D. Acemoglu, P. Restrepo // American Economic Review, 2018. – No. 108 (6). – P. 1488–1542.
13. Artificial Intelligence Index Report 2024 / Stanford University, 2024. – URL: hai_ai-index-report-2024-smaller2 (date of access: 29.12.2025).
14. Jobs Lost, Jobs Gained: Workforce Transitions in a Time of Automation / McKinsey Global Institute, December, 2017. – URL: https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/jobs-lost-jobs-gained-what-the-future-of-work-will-mean-for-jobs-skills-and-wages#/ (date of access: 29.12.2025).
15. Sostoyanie II v 2025 godu. – URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai (data obrashcheniya: 29.12.2025).
16. Izmenenie haraktera truda : doklad o mirovom razvitii, 2019 / Vsemirnyj bank. – URL: https://www.vsemirnyjbank.org/ru/publication/wdr2019 (data obrashcheniya: 29.12.2025). – DOI: 10.1596/978-1-4648-1328-3.
17. Butl, R. Iskusstvennyj intellekt i ekonomika: Rabota, bogatstvo i blagopoluchie v epohu myslyashchih mashin / R. Butl. – per. s angl. – M. : Al'pina PRO, 2023. – 424 s.
18. Future of Jobs Report 2025 / World Economic Forum. – URL: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_Report_2025.pdf (date of access: 29.12.2025).
19. Lyal'kova, E. E. Vliyanie iskusstvennogo intellekta na rynok truda: analiz izmenenij v sprose na kvalifikacii i obuchenii / E. E. Lyal'kova, E. A. Bogdashkina, V. E. Lobkova. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-iskusstvennogo-intellekta-narynok-truda-analiz-izmeneniy-v-sprose-na-kvalifikatsii-i-obuchenii/viewer (data obrashcheniya: 29.12.2025).
20. Ocenka vliyaniya II na rynok truda: tekushchee polozhenie del / M. Gimbel, M. Kinder, D. Kendall, M. Li. – URL: https://budgetlab.yale.edu/research/evaluating-impact-ai-labor-market-current-state-affairs (data obrashcheniya: 29.12.2025).
21. Nacional'naya strategiya ustojchivogo razvitiya Respubliki Belarus' do 2040 goda / Ministerstvo ekonomiki Respubliki Belarus'. – URL: https://economy.gov.by/uploads/files/ObsugdaemNPA/NSUR-2035-1.pdf (data obrashcheniya: 29.12.2025).

Материал поступил 29.01.2026, одобрен 06.02.2026, принят к публикации 06.02.2026

УДК 331.5

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ РЫНКА ТРУДА В УСЛОВИЯХ ДЕМОГРАФИЧЕСКОГО ДЕФИЦИТА: РОЛЬ АВТОМАТИЗАЦИИ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

А. И. Ящук

К. э. н., доцент, директор, Институт информационных технологий БГУИР, Минск, Беларусь, e-mail: a.iashchuk@bsuir.by

Реферат

В статье исследуется трансформация роли работников старше 50 лет на рынке труда в контексте глобального демографического старения и ускоренной цифровизации экономики. На фоне прогнозируемого к 2050 году удвоения доли населения старше 60 лет и сокращения трудоспособной группы, автоматизация и искусственный интеллект (ИИ) перестают быть исключительно инструментами оптимизации и становятся необходимостью для поддержания экономической стабильности. В работе обосновывается смена парадигмы: от социальной адаптации возрастных работников к их технологическому ассистированию. Предложена концепция, согласно которой технологии, включая коллаборативных роботов (коботов), экзоскелеты и ИИ-ассистентов, выступают в роли «профессионального экзоскелета», компенсирующего физические и когнитивные возрастные изменения и усиливающего накопленный опыт. Анализируется потенциал работников 50+ в новых ролях, таких как промпт-инжиниринг, где их глубокие бизнес-знания и интуиция становятся критически важными для калибровки генеративных ИИ. Рассматривается кейсы применения ИИ в качестве когнитивного помощника. Особое внимание уделяется критическому анализу рисков, включая «возрастную предвзятость» алгоритмов, психологическое давление из-за страха автоматизации и необходимость формирования «робоэтики». Обосновывается, что непрерывное образование должно быть сфокусировано на развитии грамотности в области ИИ в безопасной и практико-ориентированной среде. Статья доказывает, что технологическая трансформация является не угрозой вытеснения, а катализатором инклюзивности, позволяющим реализовать «дивиденд долголетия». Выводы и рекомендации ориентированы на разработку государственной политики в Республике Беларусь, направленной на внедрение технологий, которые помогают работникам 50+ оставаться конкурентоспособными и экономически активными.

Ключевые слова: старение населения, демографический дефицит, рынок труда, работники 50+, искусственный интеллект, автоматизация, технологическое ассистирование, дивиденд долголетия, грамотность в области искусственного интеллекта, робоэтика.

TECHNOLOGICAL TRANSFORMATION OF THE LABOR MARKET IN CONDITIONS OF DEMOGRAPHIC DEFICIT: THE ROLE OF AUTOMATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

A. I. Yaschuk

Abstract

The article examines the transformation of the role of workers over the age of 50 in the labor market in the context of global demographic aging and accelerated digitalization of the economy. Against the background of the projected doubling of the share of the population over 60 by 2050 and the reduction of the able-bodied group, automation and artificial intelligence (AI) are no longer solely optimization tools and are becoming necessary to maintain economic stability. The paper substantiates the paradigm shift: from the social adaptation of older workers to their technological assistance. The concept is proposed according to which technologies, including collaborative robots (cobots), exoskeletons and AI assistants, act as a "professional exoskeleton" that compensates for physical and cognitive age-related changes and enhances accumulated experience. The potential of 50+ employees in new roles such as industrial engineering is analyzed, where their deep business knowledge and intuition become critical for calibrating generative AI. The cases of using AI as a cognitive assistant are considered. Special attention is paid to the critical analysis of risks, including the "age bias" of algorithms, psychological pressure due to fear of automation and the need to form "roboetics". It is argued that continuing education should focus on the development of AI literacy in a safe and practice-oriented environment. The article proves that technological transformation is not a threat of displacement, but a catalyst for inclusivity, allowing the realization of the "longevity dividend". The conclusions and recommendations are focused on the development of public policy in the Republic of Belarus aimed at the introduction of technologies that help employees over 50 to remain competitive and economically active.

Keywords: population aging, demographic deficit, labor market, workers 50+, artificial intelligence, automation, technological assistance, longevity dividend, continuing education, robotics.

Введение

Глобальная экономика стоит на пороге тектонического сдвига, обусловленного двумя мегатрендами: демографическим старением и четвертой промышленной революцией. Согласно прогнозам Департамента по экономическим и социальным вопросам ООН, к 2050 году доля людей старше 60 лет в мире практически удвоится, достигнув 22 %, а численность населения старше 65 лет составит 1,5 миллиарда человек [1, 2]. Этот процесс, часто именуемый «демографическим кризисом», создаёт беспрецедентное давление на рынки труда, пенсионные системы и социальные структуры. Одновременно, по прогнозам, к 2030 году около 70 % компаний внедрят хотя бы один тип технологий искусственного интеллекта (ИИ) [3], а вклад ИИ в мировой ВВП может достичь 15 трлн долларов [4].

В Республике Беларусь эти тенденции проявляются с особой остротой. Снижение рождаемости [5] и увеличение медианного возраста населения до 41,7 года [6] формируют условия «демографического дефицита», при котором сокращение трудоспособной когорты становится прямой угрозой для экономического роста. Численность граждан, достигших пенсионного возраста, составила 2,4 млн человек [7], что усиливает нагрузку на экономически активное население и Фонд социальной защиты населения [8]. В этом контексте традиционный фокус экономической политики на молодежь как на основной драйвер роста становится недостаточным. Игнорирование трудового потенциала работников старше 50 лет – это не просто упущенная возможность, а стратегический риск [9].

Проблема заключается в том, что дискурс вокруг взаимодействия технологий и возрастных работников часто разворачивается между двумя полюсами мнений. С одной стороны, существует нарратив о вытеснении, где ИИ и автоматизация рассматриваются как угроза для сотрудников, чьи навыки могут устареть [10]. С другой

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-315-318

стороны, преобладает подход, сфокусированный на социальной адаптации и защите, который не решает фундаментальную экономическую задачу. Научная новизна данной работы заключается в обосновании смены парадигмы: от социальной адаптации к технологической трансформации, направленной на реализацию «дивиденда долголетия» [11]. Основной тезис статьи состоит в том, что инвестиции в человеческий капитал людей старшего возраста, сопряжённые с грамотным внедрением технологий, являются единственным устойчивым решением в условиях старения общества. Цель исследования – проанализировать, как автоматизация и ИИ могут трансформировать позицию работников 50+ на рынке труда, превращая их из уязвимой группы в стратегический актив. В рамках статьи предлагается концепция «технологического ассистирования», где ИИ и робототехника выступают в роли «экзоскелета» для профессиональных навыков, нивелируя возрастные физические и когнитивные изменения и усиливая накопленный опыт.

Синергия технологий и человеческого потенциала 50+: от замещения к расширению возможностей

Ключевая идея технологической трансформации рынка труда в условиях демографического дефицита заключается в переходе от модели «вытеснения труда» к модели «компенсации демографического спада» [4]. В этой модели автоматизация и искусственный интеллект не столько заменяют человека, сколько восполняют нехватку кадров в критических точках экономических процессов и, что более важно, расширяют возможности существующих работников, особенно старшего возраста. Этот подход позволяет рассматривать технологический прогресс как катализатор инклюзивности и устойчивости.

Для систематизации анализа целесообразно разделить технологии ассистирования на две ключевые группы в соответствии с их функциональным назначением: технологии для компенсации физических ограничений и технологии для расширения когнитивных возможностей.

Компенсация физических ограничений: роль робототехники и адаптированных рабочих мест

Одной из главных причин преждевременного ухода с рынка труда работников старшего возраста, особенно в промышленности, строительстве и логистике, является высокая физическая нагрузка. Старение сопряжено со снижением мышечной силы и выносливости [12], что делает выполнение физически тяжелых задач затруднительным и рискованным. Технологии Индустрии 5.0 предлагают прямое решение этой проблемы. Внедрение автоматизации позволяет возрастным работникам продолжать карьеру в отраслях, где физические требования традиционно высоки, что подтверждается международным опытом [9, 13].

Ключевыми инструментами здесь выступают коллаборативные роботы (коботы) и роботизированные экзоскелеты. Коботы, в отличие от традиционных промышленных роботов, предназначены для работы в непосредственной близости с человеком, выполняя монотонные, опасные или требующие физических усилий операции (например, подъем тяжестей, закручивание гаек, паллетирование) [12]. Это позволяет работнику 50+ сместить фокус на задачи контроля качества, настройки оборудования и управления процессом, где его опыт бесценен. Экзоскелеты, в свою очередь, напрямую снижают нагрузку на опорно-двигательный аппарат, поддерживая спину, руки и ноги при выполнении физических задач [12, 14]. Внедрение таких технологий создаёт «адаптированные рабочие места», которые сохраняют здоровье и продлевают трудовую жизнь, а также повышают общую производительность. Исследования показывают, что внедрение роботов в секторе ухода, например, для перемещения пациентов, снижает физическую нагрузку и текучесть кадров [15], что напрямую транслируется и на другие отрасли.

Расширение когнитивных возможностей: искусственный интеллект как наставник и ассистент

Если робототехника компенсирует физические ограничения, то искусственный интеллект способен стать мощным когнитивным помощником, преодолевающим «цифровой разрыв» и открывающим новые карьерные траектории. Одной из проблем для работников старшего возраста является сложность современных программных интерфейсов и информационных систем. ИИ-ассистенты, встроенные в рабочие платформы, могут упрощать эти интерфейсы, автоматизировать рутинные операции (например, обработку электронной почты, заполнение отчетов, поиск информации) и предоставлять подсказки в режиме реального времени [16]. Это позволяет специалистам 50+ сосредоточиться на стратегических задачах, менторстве и принятии решений, где их опыт и интуиция незаменимы.

Более того, развитие генеративного искусственного интеллекта формирует совершенно новую нишу для опытных сотрудников – «промпт-инжиниринг». Эффективность моделей, подобных ChatGPT, напрямую зависит от качества и точности запросов (промптов). Работники с многолетним стажем обладают глубокими бизнес-знаниями, пониманием контекста и интуицией, которые критически важны для калибровки запросов и получения от искусственного интеллекта релевантных и практически применимых результатов [3]. В этой парадигме возрастной работник превращается из «отстающего» в стратегического «наставника» для искусственного интеллекта, направляя его работу на решение конкретных бизнес-задач. По аналогии с уровнями автономности вождения (SAE), труд эволюционирует к уровням 4–5, где человек перестает быть «исполнителем» и становится «супервайзером намерений», контролирующим и верифицирующим работу автоматизированных систем [4].

Трансформация непрерывного образования: от цифровой грамотности к технологическому партнерству

Эффективная интеграция работников 50+ в цифровую экономику невозможна без трансформации подходов к непрерывному образованию. Проблема заключается не в неспособности старшего поколения к обучению, а в неадаптированности самих образовательных программ. Исследования показывают, что возрастные сотрудники мотивированы к обучению, если видят его практическую ценность и применимость в реальной жизни [17, 18].

Ключевой целью переобучения должно стать формирование компетенций для эффективного взаимодействия с ассистивными технологиями. Это означает, что обучение должно быть комплексным и охватывать оба рассмотренных направления. Во-первых, это освоение физических ассистивных систем: программ обучения по безопасной эксплуатации, настройке и контролю коллаборативных роботов и экзоскелетов. Во-вторых, это формирование грамотности в области искусственного интеллекта (AI Literacy). Речь идет не о подготовке программистов, а об освоении ИИ как инструмента, который делает труд более эффективным и менее энергозатратным. Стратегии обучения должны быть практико-ориентированными и учитывать жизненный опыт сотрудников [3, 10]. В Беларуси уже существуют инициативы по повышению цифровой грамотности пожилых людей, например, на базе территориальных центров социального обслуживания и в рамках проектов, таких как «Минский университет третьего возраста» – социально-образовательный проект, реализуемый ОО «Белорусская ассоциация социальных работников» в интересах пожилых жителей г. Минска [19, 20], однако их необходимо масштабировать и интегрировать в корпоративные системы обучения, фокусируясь на профессиональных компетенциях.

Несмотря на огромный потенциал, внедрение искусственного интеллекта и автоматизации сопряжено с серьезными рисками, которые требуют критического осмысления. Одним из наиболее значимых является риск «возрастной предвзятости» алгоритмов. Системы искусственного интеллекта обучаются на данных, и если в этих данных недостаточно представлены пожилые люди, алгоритмы могут работать некорректно. Исследования показывают, что системы распознавания лиц, речи и эмоций демонстрируют более низкую точность для старших возрастных групп [21, 22]. Это может приводить к прямой дискриминации: от некорректной работы систем биометрического доступа до предвзятых решений автоматизированных систем рекрутинга (ADM), которые могут отсеивать кандидатов на основе косвенных возрастных маркеров.

Второй важный аспект – психологическое давление на сотрудников. Страх потери работы из-за автоматизации («техностресс») негативно влияет на ментальное здоровье, снижает мотивацию и может

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-315-318

приводить к профессиональному выгоранию [3, 23]. Опросы показывают, что хотя отношение к искусственному интеллекту в целом становится более позитивным, и люди начинают воспринимать его как инструмент, а не угрозу [24], опасения остаются, особенно у работников, выполняющих рутинные операции.

Таблица 1 – Компоненты этики искусственного интеллекта

Компонент	*Описание и значение*
Кибератаки	Включает вопросы безопасности автоматизированных рабочих мест и защиты данных от внешних угроз в условиях цифровизации
Права роботов	Элемент системы «робоэтики», регулирующей нормы взаимодействия человека и машины для обеспечения социального принятия технологий
Предвзятость	Особое внимание уделено «возрастной предвзятости» алгоритмов. Системы могут работать некорректно для людей 50+, что ведет к дискриминации (например, в системах рекрутинга)
Автономия	Отражает переход человека от роли исполнителя к роли «супервайзера намерений» (уровни 4–5). Требует наличия механизмов, позволяющих человеку оспаривать решения машины
Безопасность обмена данными	Неотъемлемый элемент рыночной инфраструктуры, обеспечивающий прозрачность алгоритмов и надежность взаимодействия систем
Вопросы конфиденциальности	Защита персональных данных и предотвращение «цифровой дискриминации» через внедрение национальных стандартов работы с информацией

Эти вызовы диктуют необходимость формирования концепции «робоэтики» – системы этических и регуляторных норм, управляющих взаимодействием человека и машины [4]. Как показано в Таблице 1, этика искусственного интеллекта охватывает широкий спектр вопросов, от кибератак и безопасности данных до предвзятости и автономии. Робоэтика должна стать неотъемлемым элементом рыночной инфраструктуры, обеспечивая прозрачность алгоритмов, защиту от дискриминации и социальное принятие технологий. Это включает разработку стандартов для непредвзятых наборов данных, обязательный аудит алгоритмов на предмет дискриминации и создание механизмов, позволяющих человеку оспаривать решения, принятые машиной.

Выводы

Технологическая трансформация, вызванная повсеместным внедрением автоматизации и искусственного интеллекта, происходит на фоне беспрецедентного демографического сдвига – старения населения. Это сочетание формирует не просто вызов, а новую экономическую реальность, требующую кардинального пересмотра подходов к рынку труда и человеческому капиталу. Проведённый анализ доказывает, что доминирующий нарратив о вытеснении работников 50+ технологиями является неполным и контрпродуктивным. Главный вывод исследования заключается в том, что технологическая трансформация – это ключевой катализатор инклюзивности, способный превратить демографический кризис в «дивиденд долголетия».

Концепция «технологического ассистирования» предлагает прагматичный путь, на котором ИИ и робототехника становятся «профессиональным экзоскелетом» для работников старшего возраста. Технологии, такие как коботы и экзоскелеты, компенсируют снижение физических возможностей, ИИ-ассистенты нивелируют когнитивные барьеры и «цифровой разрыв», а генеративный ИИ открывает новые роли, где накопленный опыт и интуиция становятся главным конкурентным преимуществом. В этой парадигме возрастное разнообразие перестаёт быть социальной проблемой и становится катализатором инноваций, а технологии – инструментом для раскрытия этого потенциала.

Однако реализация этого сценария требует осознанных и целенаправленных действий. Необходимо преодолеть серьезные риски, связанные с возрастной предвзятостью алгоритмов, и психологические барьеры, порождённые страхом автоматизации. Это требует технических решений, а также требует формирования новой этико-регуляторной рамки – «робоэтики», обеспечивающей прозрачность, справедливость и человекоцентричность технологий.

Для Республики Беларусь, сталкивающейся с острым демографическим дефицитом и необходимостью технологической модернизации экономики, предложенные выводы имеют особую практическую значимость. Стратегия должна быть направлена не на простую закупку роботов, а на внедрение технологий, которые помогают работникам 50+ оставаться в строю, обеспечивая устойчивый экономический рост. Это предполагает следующее.

1. Разработку государственных программ, стимулирующих организации создавать «адаптированные рабочие места» с использованием ассистивных технологий.

2. Реформу системы непрерывного образования с акцентом на практико-ориентированное обучение AI Literacy для всех возрастных групп.

3. Создание национальных стандартов в области «робоэтики» для предотвращения цифровой дискриминации.

4. Проведение информационных кампаний для борьбы с эйджизмом и «технострессом», демонстрирующих позитивные примеры синергии человека и машины.

Инвестиции в технологическую интеграцию и переобучение работников старшего возраста – это не затраты, а стратегическое вложение в экономическую устойчивость и конкурентоспособность страны в XXI веке.

Список цитированных источников

1. Our world is growing older: UN DESA releases new report on ageing // United Nations. – URL: https://www.un.org/development/desa/en/news/population/our-world-is-growing-older.html (date of access: 03.02.2026).
2. Artificial Intelligence (AI) and Robotics in Elderly Healthcare: Enabling Independence and Quality of Life / S. Padhan, A. Mohapatra, S. K. Ramasamy, S. Agrawal // Cureus. – 2023. – № 8. – DOI: 10.7759/cureus.42905.
3. Chetty, K. AI Literacy for an Ageing Workforce: Leveraging the Experience of Older Workers / K. Chetty // OBM Geriatrics. – 2023. – № 3. – DOI: 10.21926/obm.geriatr.2303243.
4. Companion robots to mitigate loneliness among older adults: Perceptions of benefit and possible deception / C. Berridge, Y. Zhou, J. M. Robillard, J. Kaye // Frontiers in Psychology. – 2023. – DOI: 10.3389/fpsyg.2023.1106633.
5. Белстат опубликовал официальные данные по рождаемости в Беларуси // Точка диджитал групп. – URL: https://tochka.by/articles/life/rozhdaemost_v_belarusi_upala_pochti_v_dva_raza_statistika (дата обращения: 03.02.2026).
6. Часики для нации: как стареет население Беларуси // Thinktanks.pro. – URL: https://thinktanks.pro/publication/2024/11/01/chasiki-dlya-natsii-kak-stareet-naselenie-belarusi.html (дата обращения: 03.02.2026).
7. Минтруда: каждый пятый пенсионер в Беларуси продолжает работать // Демографический ресурсный центр. – URL: https://sdgs.by/news/v-belarusi-razvivaetsya-serebryanaya-ekonomika (дата обращения: 03.02.2026).
8. Демография против экономики: как решить проблемы на рынке труда? // Бизнес. Финансы. Управление. – URL: https://ibmedia.by/news/demografiya-protiv-ekonomiki-kak-reshit-problemy-na-rynke-truda/ (дата обращения: 03.02.2026).
9. Старение и здоровье // Всемирной организации здравоохранения. – URL: https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health (дата обращения: 03.02.2026).
10. Žabar, T. Upskilling Older Employees in the Artificial Intelligence Era / T. Žabar, J. Aleksander // Challenges of the Future. – 2025. – № 4. – P. 1–13. – DOI: 10.37886/ip.2025.007.

11. Скотт, Э. Старения населения не стоит бояться, его нужно научиться использовать // Э. Скотт, П. Пайот // Финансы и развитие. – URL: https://www.imf.org/ru/publications/fandd/issues/2025/06/the-longevity-dividend-andrew-scott (дата обращения: 03.02.2026).
12. Vitrano, G. Rethinking Work in Industry 5.0: Leveraging Technology for an Ageing Workforce / G. Vitrano, G. J. L. Micheli // Public Health Challenges. – 2025. – № 3. – DOI: 10.1002/puh2.70130.
13. Hong, G. H. Shrinkonomics: lessons from Japan / G. H. Hong, T. Schneider // Finance & Development. – 2020. – № 1. – P. 20–23.
14. Jerbić, B. Artificial intelligence and robotics as the driving force of society / B. Jerbić, M. Švaco // Frontiers in Sociology. – 2023. – № 7. – DOI: 10.3389/fsoc.2022.1038854.
15. Lee, Y. S. Robots and labor in nursing homes / Y. S. Lee, T. Iizuka, K. Eggleston // Labour Economics. – 2025. – № 92. – DOI: 10.1016/j.labeco.2024.102666.
16. Pizzinelli, C. AI and the Future of Work in an Aging Economy / C. Pizzinelli, M. M. Tavares // Pension Research Council Working Paper. – 2025. – 55 p.
17. Briggs, A. How to Prepare Older Adults for AI in the Workplace / A. Briggs, H. D'Elia // Urban Institute. – URL: https://www.urban.org/sites/default/files/2026-01/How_to_Prepare_Older_Adults_for_AI_in_the_Workplace_0.pdf (date of of access: 03.02.2026).
18. Bhat, A. C. AI Literacy for All: A Study of Older Adults' Motivations, Learning Challenges, and Design Opportunities for AI Education / A. C. Bhat, A. M. Piper, R. L. Gibbs // Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. – 2024. – № 54. – P. 1–15. DOI: 10.1145/3706599.3720033.
19. Как в Беларуси реализовывают потенциал пожилых людей // Минская областная организация Белорусского профессионального союза работников леса и природопользования. – URL: https://moopl.by/kak-v-belarusi-realizovyvayut-potenczial-pozhilyh-lyudej/ (дата обращения: 03.02.2026).
20. Минский университет третьего возраста // Белорусская ассоциация социальных работников. – URL: https://vozrast.by/ (дата обращения: 03.02.2026).
21. Stypińska, J. AI revolution in healthcare and medicine and the (re-)emergence of inequalities and disadvantages for ageing population / J. Stypińska, A. Franke // Frontiers in Sociology. – 2023. – № 7. – DOI: 10.3389/fsoc.2022.1038854.
22. Age Bias in Emotion Detection: An Analysis of Facial Emotion Recognition Performance on Young, Middle-Aged, and Older Adults / E. Kim, D. A. Bryant, D. Srikanth, A. Howard // Proceedings of the 2021 AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society. – 2021. – P. 638–644. – DOI: 10.1145/3461702.3462609.
23. Samuel, S. A Study on Impact of Artificial Intelligence in Job Automation / S. Samuel // Journal of Contemporary Issues in Business and Government. – 2021. – № 2. – P. 102–119.
24. «Конкуренция за рабочие места ужесточается». Что происходит на рынке труда Беларуси прямо сейчас // Myfin.by. – URL: https://myfin.by/article/rynki/konkurencia-za-rabocie-mesta-uzestocaetsa-cto-proishodit-na-rynke-truda-belarusi-k-koncu-2025-goda-42496 (дата обращения: 03.02.2026).

References

1. Our world is growing older: UN DESA releases new report on ageing // United Nations. – URL: https://www.un.org/development/desa/en/news/population/our-world-is-growing-older.html (date of access: 03.02.2026).
2. Artificial Intelligence (AI) and Robotics in Elderly Healthcare: Enabling Independence and Quality of Life / S. Padhan, A. Mohapatra, S. K. Ramasamy, S. Agrawal // Cureus. – 2023. – № 8. – DOI: 10.7759/cureus.42905.
3. Chetty, K. AI Literacy for an Ageing Workforce: Leveraging the Experience of Older Workers / K. Chetty // OBM Geriatrics. – 2023. – № 3. – DOI: 10.21926/obm.geriatr.2303243.
4. Companion robots to mitigate loneliness among older adults: Perceptions of benefit and possible deception / C. Berridge, Y. Zhou, J. M. Robillard, J. Kaye // Frontiers in Psychology. – 2023. – DOI: 10.3389/fpsyg.2023.1106633.
5. Belstat opublikoval oficial'nye dannye po rozhdaemosti v Belarusi // Tochka didzhital grupp. – URL: https://tochka.by/articles/life/rozhdaemost_v_belarusi_upala_pochti_v_dva_raza_statistika (data obrashcheniya: 03.02.2026).
6. CHasiki dlya nacii: kak stareet naselenie Belarusi // Thinktanks.pro. – URL: https://thinktanks.pro/publication/2024/11/01/chasiki-dlya-natsii-kak-stareet-naselenie-belarusi.html (data obrashcheniya: 03.02.2026).
7. Mintruda: kazhdyj pyatyj pensioner v Belarusi prodolzhaet rabotat' // Demograficheskij resursnyj centr. – URL: https://sdgs.by/news/v-belarusi-razvivaetsya-serebryanaya-ekonomika (data obrashcheniya: 03.02.2026).
8. Demografiya protiv ekonomiki: kak reshit' problemy na rynke truda? // Biznes. Finansy. Upravlenie. – URL: https://ibmedia.by/news/demografiya-protiv-ekonomiki-kak-reshit-problemy-na-rynke-truda/ (data obrashcheniya: 03.02.2026).
9. Starenie i zdorov'e // Vsemirnoj organizacii zdravoohraneniya. – URL: https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health (data obrashcheniya: 03.02.2026).
10. Žabar, T. Upskilling Older Employees in the Artificial Intelligence Era / T. Žabar, J. Aleksander // Challenges of the Future. – 2025. – № 4. – P. 1–13. – DOI: 10.37886/ip.2025.007.
11. Skott, E. Stareniya naseleniya ne stoit boyat'sya, ego nuzhno nauchit'sya ispol'zovat' // E. Skott, P. Pajot // Finansy i razvitie. – URL: https://www.imf.org/ru/publications/fandd/issues/2025/06/the-longevity-dividend-andrew-scott (data obrashcheniya: 03.02.2026).
12. Vitrano, G. Rethinking Work in Industry 5.0: Leveraging Technology for an Ageing Workforce / G. Vitrano, G. J. L. Micheli // Public Health Challenges. – 2025. – № 3. – DOI: 10.1002/puh2.70130.
13. Hong, G. H. Shrinkonomics: lessons from Japan / G. H. Hong, T. Schneider // Finance & Development. – 2020. – № 1. – P. 20–23.
14. Jerbić, B. Artificial intelligence and robotics as the driving force of society / B. Jerbić, M. Švaco // Frontiers in Sociology. – 2023. – № 7. – DOI: 10.3389/fsoc.2022.1038854.
15. Lee, Y. S. Robots and labor in nursing homes / Y. S. Lee, T. Iizuka, K. Eggleston // Labour Economics. – 2025. – № 92. – DOI: 10.1016/j.labeco.2024.102666.
16. Pizzinelli, C. AI and the Future of Work in an Aging Economy / C. Pizzinelli, M. M. Tavares // Pension Research Council Working Paper. – 2025. – 55 p.
17. Briggs, A. How to Prepare Older Adults for AI in the Workplace / A. Briggs, H. D'Elia // Urban Institute. – URL: https://www.urban.org/sites/default/files/2026-01/How_to_Prepare_Older_Adults_for_AI_in_the_Workplace_0.pdf (date of of access: 03.02.2026).
18. Bhat, A. C. AI Literacy for All: A Study of Older Adults' Motivations, Learning Challenges, and Design Opportunities for AI Education / A. C. Bhat, A. M. Piper, R. L. Gibbs // Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. – 2024. – № 54. – P. 1–15. DOI: 10.1145/3706599.3720033.
19. Kak v Belarusi realizovyvayut potencial pozhilyh lyudej // Minskaya oblastnaya organizaciya Belorusskogo professional'nogo soyuza rabotnikov lesa i prirodopol'zovaniya. – URL: https://moopl.by/kak-v-belarusi-realizovyvayut-potenczial-pozhilyh-lyudej (data obrashcheniya: 03.02.2026).
20. Minskij universitet tret'ego vozrasta // Belorusskaya associaciya social'nyh rabotnikov. – URL: https://vozrast.by/ (data obrashcheniya: 03.02.2026).
21. Stypińska, J. AI revolution in healthcare and medicine and the (re-)emergence of inequalities and disadvantages for ageing population / J. Stypińska, A. Franke // Frontiers in Sociology. – 2023. – № 7. – DOI: 10.3389/fsoc.2022.1038854.
22. Age Bias in Emotion Detection: An Analysis of Facial Emotion Recognition Performance on Young, Middle-Aged, and Older Adults / E. Kim, D. A. Bryant, D. Srikanth, A. Howard // Proceedings of the 2021 AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society. – 2021. – P. 638–644. – DOI: 10.1145/3461702.3462609.
23. Samuel, S. A Study on Impact of Artificial Intelligence in Job Automation / S. Samuel // Journal of Contemporary Issues in Business and Government. – 2021. – № 2. – P. 102–119.
24. «Konkurenciya za rabochie mesta uzhestochaetsya». CHto proiskhodit na rynke truda Belarusi pryamo sejchas // Myfin.by. – URL: https://myfin.by/article/rynki/konkurencia-za-rabocie-mesta-uzestocaetsa-cto-proishodit-na-rynke-truda-belarusi-k-koncu-2025-goda-42496 (data obrashcheniya: 03.02.2026).

Материал поступил 04.02.2026, одобрен 18.02.2026, принят к публикации 19.02.2026

https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-315-318

Научное издание

ВЕСТНИК БРЕСТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ (СТРОИТЕЛЬСТВО, МАШИНОСТРОЕНИЕ, ГЕОЭКОЛОГИЯ);
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ
№ 1 (139). 2026 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор	**Тур В. В.**
Зам. главного редактора	**Шалобыта Н. Н.**
Ответственный секретарь	**Ковальчук Е. Н.**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ответственный редактор по разделу «Строительство»	**Найчук А. Я.**
Зам. ответственного редактора по разделу «Строительство»	**Павлова И. П.**
Ответственный редактор по разделу «Машиностроение»	**Парфиевич А. Н.**
Зам. ответственного редактора по разделу «Машиностроение»	**Онысько С. Р.**
Ответственный редактор по разделу «Геоэкология»	**Волчек А. А.**
Зам. ответственного редактора по разделу «Геоэкология»	**Мешик О. П.**

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ответственный редактор по разделу «Экономика»	**Зазерская В. В.**
Зам. ответственного редактора по разделу «Экономика»	**Проровский А. Г.**
Технический редактор	**Ковальчук Е. Н.**
Дизайн	**Якимук К. С.**
Корректор	**Северянина А. Г.**

Лицензионный № в ERL: 38200000065722 от 27.03.2014 г.
Подписано в печать 17.04.2026 г. Формат 60×84 /8. Бумага «Performer». Гарнитура «Arial». Уч.-изд. л. 39,75. Усл. печ. л. 36,97. Заказ № 226. Тираж 100 экз. Печать цифровая. Изготовлено и отпечатано в типографии учреждения образования «Брестский государственный технический университет».
Адрес редакции: 224017, г. Брест, ул. Московская, 267,
УО «Брестский государственный технический университет».
Тел. 32 17 40, e-mail: rio@bstu.by, http://journal.bstu.by

