



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

2(137)'2025

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТРОИТЕЛЬСТВО

KASHIRIPOOR M. M., NIKOLYUK V. A. Main directions and development of artificial intelligence in the construction industry 3

БОЧКАРЕВ Д. И., ТОМАШОВ В. В., ПЕТРУСЕВИЧ В. В. Исследование поведения композиции для выполнения ямочного ремонта асфальтобетонного покрытия в дворовых территориях 10

БУЛАЙ Т. В., КУЗЬМЕНКОВ М. И., ШАЛУХО Н. М. Композиционный материал на основе серного кека 16

ДЕРКАЧ В. Н., ГАЛАЛЮК А. В., БУРАК С. О. Усиление каменных конструкций с применением систем внутреннего армирования каменной кладки 23

МОРОЗОВ Е. В. Черты модерна и эклектики в архитектуре Советской Белоруссии 1920-х гг. 30

ОЛЁХ А. Г. Особенности определения снеговых нагрузок на строительные конструкции 35

ШАЛОБЫТА Н. Н., ПОЙТА П. С., ШАЛОБЫТА Т. П. Экспериментальные исследования осадки фундаментов многофункционального центра 42

МАШИНОСТРОЕНИЕ

АКУЛА И. П., ХОМА М. Ю. Структура и свойства покрытий АПУ-N, полученных катодно-дуговым осаждением при ионном ассистировании 50

КАЗУТИН Е. Г., ГОМАН А. М., СКОРОХОДОВ А. С. Метод расчета остаточного ресурса пожарных автоцистерн 56

КАПИТОНОВ А. В., КАПИТОНОВ О. А., ДРОЗДОВ В. С. Способы устранения шумовых помех от преобразователя частоты при измерениях кинематических параметров редуцирующих механизмов 62

ОВЧИННИКОВ Е. В., СВИСТУН А. Ч., ВЕРЕМЕЙЧИК А. И., ЛЕБЕДЕВ Н. В., ХВИСЕВИЧ В. М., ФАЛЁСА В. Ю., АМИРХАНОВ Е. И., ОВЧИННИКОВ А. Е. Электроискровые фторсодержащие покрытия 68

ПАРФИЕВИЧ А. Н., ЧЕРКАСОВ Н. Н. Методы армирования строительных конструкций при их возведении с применением 3D-принтера 73

ПРОКОПЕНЯ О. Н., ФРАНЦЕВИЧ А. В., УГЛЯНИЦА И. В. Применимость линейной модели трехфазного асинхронного электродвигателя для проектирования мехатронных модулей 78

ГЕОЭКОЛОГИЯ

АХМАДИЕВА Ю. И., ДУБЕНОК С. А. Формирование национальных подходов к оценке технологий очистки сточных вод населенных пунктов на соответствие их наилучшим доступным техническим методам 86

ВОЛЧЕК А. А., НАУМЧИК Г. О., БЕЛОВ В. С. Преимущества оптических методов измерения размера и дисперсности газовых пузырьков в воде 94

ВОЛЧЕК А. А., РОЗУМЕЦ И. Н., СИДАК С. В., ГОРОДНЮК Ю. П. Режим стока взвешенных наносов рек Беларуси 99

ВОЛЧЕК А. А., ФИЛАТОВ Н. Н., ГНАТЮК Н. В., МЕШИК О. П., ПАРФОМУК С. И., БОРУШКО М. В., РАДЧЕНКО Ю. В., СИДАК С. В., ГОРОДНЮК Ю. П., ПРОТАСЕВИЧ А. С. Современные тенденции в колебаниях стока рек бассейна Западной Двины и их прогнозные оценки 104

ГЛУХОВСКИЙ В. И., МОРЗАК Г. И., СЫРНИКОВА К. А. Повышение эффективности газоочистных установок для предприятий, использующих местные виды топлива 120

ЗАХАРКО П. Н. Комплексный подход в регулировании водопользования на предприятиях молочной промышленности 127

МАЕВСКАЯ А. Н., БОГДАСАРОВ М. А., ШЕШКО Н. Н. Группировка земель территории Гродненской области по отношению к возможности разработки общераспространенных полезных ископаемых 135

МАХНИСТ Л. П., КАРИМОВА Т. И., МЕРКУШЕВИЧ П. А., СВЕРБА И. Ю. Решение одной из задач гидрологии с использованием степенных рядов и преобразования Лапласа 140

УРЕЦКИЙ Е. А., НИКОЛЕНКО И. В., МОРОЗ В. В. Разработка ресурсосберегающей технологии очистки сточных вод предприятия молочной продукции на примере Пинского филиала ОАО «Савушкин продукт» 146

ЧЕПИК А. Г., МАЖАЙСКИЙ Ю. А., ДОРОНКИН Ю. В. Экологическое состояние пойменных земель и их использование в АПК 153

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

TAISHAN YUE. Analysis of development and growth of the construction industry to promote improvement of quality and efficiency of the national economy of the Republic of Belarus based on the VAR model 159

ЖУДРО М. К., РОМАНОВА Е. В. Методологические аспекты эконометрического обоснования системы оплаты проезда в городском пассажирском транспорте 166

ЖУК А. И., ЗАЩУК Е. Н., ЯРМОЛИК Л. А., ШЕИНА В. А. Моделирование задач теории графов с использованием систем компьютерной алгебры 171

ЗАЗЕРСКАЯ В. В. Методика оценки уровня экономического потенциала трансграничного региона 178

КАНДРИЧИНА И. Н., БОГДАНОВИЧ Е. Г., КУНОВСКАЯ Н. И. Проблема удержания персонала: детерминирующие факторы и стратегии решения 183

КОНОНЧУК И. А. Структурно-поведенческий и функциональный аспекты налоговой системы с позиции разработки налоговой стратегии плательщика 188

ЛУКАШКОВА О. Ю., ЖУДРО М. К. Методика исследования структурного дефицита использования персонала 195

МАЦУКЕВИЧ Н. А. Зарубежный опыт стимулирования инвестиционных процессов на региональном уровне 200

МУЧИНСКИЙ В. Л. Макроэкономическая рейтинговая оценка факторов, влияющих на конкурентоспособность национальной экономики 208

НЕМОГАЙ Н. В., БОНЦЕВИЧ Н. В., КОЛЕСНИКОВ С. Д. Инновационная модель системы управления конкурентоспособностью УВО 213

НОСКО Н. В. Концептуальная модель формирования региональных интегрированных структур управления строительством 217

ПРУДНИКОВА В. А. Совершенствование организационно-экономического механизма функционирования отечественных свободных экономических зон через призму опыта Республики Казахстан 222

РЕЗЬКО П. Н. Слоган в рекламной коммуникации 230

СТРОИТЕЛЬСТВО

UDC 69.04

MAIN DIRECTIONS AND DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE
IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

M. M. Kashiripoor¹, V. A. Nikolyuk²

¹ Candidate of Architecture, Associate Professor, Associate Professor, Department of Building Materials and Construction Technology, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: mkashiripoor@gmail.com

² Master's student, Faculty of Civil Engineering, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: vladimir.nik2001@yandex.by

Abstract

This research paper analyzes the integration of artificial intelligence with current technologies. The possibilities and methods of integration with modern innovations are revealed, according to the studied and analyzed information from scientific sources around the world. The result of integration and possibilities of further development are demonstrated. A detailed description of the disadvantages and advantages of applying innovative technologies with integrated artificial intelligence in the construction industry is provided. The writing of this paper serves to familiarize both the scientific community and the civilian population with the possibilities and prospects of development of the construction industry through the introduction of artificial intelligence technology.

Relevance: the study of current and effective technologies that have proven themselves with a positive side in the construction industry. Analysis of their implementation and use in modern realities.

The aim of the research: to study the currently demanded technologies in the world construction practice with the influence of artificial intelligence on them, to consider in detail the efficiency of use in terms of economy, preservation of ecology and natural resources, ensuring safe labor activity, the possibility of further modernization and development with the provision of both disadvantages and advantages.

Materials and methods: study of scientific literature, research papers, Internet sources, private channels and opinions of active enthusiasts interested in and working on the process of implementation and development of innovative technologies.

Results and conclusions: the methodology of introduction and use of modern technologies in the construction industry is outlined, advantages and disadvantages of innovations are described. The basic concepts of modern technologies, their essence and demand in the world are studied, the necessity of their application and exploitation is described.

The purpose of the research article is to inform and familiarize both the scientific community and the civilian population with the work done to study and describe both the importance and effectiveness of the application of modern technology in the construction field, providing personal guidance according to the examples given.

Keywords: artificial intelligence, construction industry, innovative technologies, construction, life, structures.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ

М. М. Каширипор, В. А. Николук

Реферат

В данной научно-исследовательской работе проводится анализ интеграции искусственного интеллекта с актуальными технологиями. Раскрываются возможности и методы интеграции с современными инновациями, согласно изученной и проанализированной информации с научных источников по всему миру. Демонстрируется результат интеграции и возможности последующего развития. Предоставляется подробное описание недостатков и преимуществ применения инновационных технологий с интегрированным искусственным интеллектом в строительной индустрии. Написание данной работы служит для ознакомления как научного сообщества, так и гражданского населения о возможностях и перспективах развития строительной сферы путём внедрения в неё технологии искусственного интеллекта.

Актуальность: изучение актуальных и эффективных технологий, зарекомендовавших себя с положительной стороны в строительной индустрии. Анализ их внедрения и использования в современных реалиях.

Цель исследования: изучить востребованные на данный момент технологии в мировой строительной практике с влиянием на них искусственного интеллекта, подробно рассмотреть эффективность использования с точки зрения экономики, сохранения экологии и природных ресурсов, обеспечения безопасного ведения трудовой деятельности, возможности последующей модернизации и развития с предоставлением как недостатков, так и преимуществ.

Материалы и методы: изучение научной литературы, научно-исследовательских трудов, интернет-источников, частных каналов и мнения активных энтузиастов, интересующихся и работающих над процессом разработки и внедрения инновационных технологий.

Результаты и выводы: изложена методология внедрения и использования современных технологий в строительной индустрии, описаны преимущества и недостатки инноваций. Изучаются основные понятия современных технологий, их сущность и востребованность на мировой арене, описывается необходимость их применения и эксплуатации.

Назначение научно-исследовательской статьи заключается в информировании и ознакомлении как научного сообщества, так и гражданского населения с проделанными трудами по изучению и описанию как важности, так и эффективности применения современных технологий в строительной сфере с предоставлением личных наставлений согласно приведённым примерам.

Ключевые слова: искусственный интеллект, строительная индустрия, инновационные технологии, строительство, жизнедеятельность, конструкции.

Introduction

Thanks to daily progress in the evolution of innovative technologies, the construction industry is rapidly moving to a new stage of development, introducing technologies such as artificial intelligence into its industries and processes. By improving the quality of tasks performed in compliance with set deadlines, increasing the economic component of the construction in-

dustry and complying with safety requirements, artificial intelligence technology has advanced in its development for years to come, forcing scientists and private enthusiasts to delve deeper into its study to provide the world with a new model for conducting the construction industry.

The active introduction and application of innovative technologies in the construction business demonstrates positive dynamics in solving

complex and energy-intensive problems. Scientists are considering the issue of creating a universal tool capable of changing the construction industry and replacing all currently available technologies by combining them with subsequent development opportunities. By analyzing available data from around the world, the scientific community is experimenting with the application and development of technologies that can solve several different problems without separating them into different methods.

The analysis of the conducted experiments and scientific sources around the world shows great motivation to move to a new level of development of innovative technologies in the construction industry. The most effective result in solving the tasks set was demonstrated by artificial intelligence technology, thanks to which it became possible to simultaneously achieve an increase in the economic indicators of enterprises, effective conservation of natural resources and the environment, improving the quality of worker protection when performing assigned tasks by means of tracking and monitoring the work process in real time.

The aim of the study is to examine the effectiveness of integrating artificial intelligence into the construction industry and to determine the impact of the use of the technology in question on human life in general. Ideas for integrating artificial intelligence with currently available technologies are put forward; results are provided that facilitate the creation of a conclusion on the work carried out, outlining ideas and recommendations for the subsequent use of technologies with integrated artificial intelligence.

Main tasks that contribute to achieving the goals are:

- study of the results of the application of artificial intelligence which available in the public domain;
- consideration of current innovations in the construction industry;
- study of the scientific works which related to the topic and its consideration;
- study of the artificial intelligence integration effectiveness with current technologies;
- consideration of the population's response to the use of innovative technologies;
- analyze situation to achieve and formalize the discussion and result of the research.

The methods of conducting the research are studying and collecting information from scientific research sources, analyzing samples and movements of the application of technologies in real life, statement of personal opinion based on analysis of information and drawing conclusions.

Discussion

Daily progress in the technology development provides the opportunity to integrate innovations into any area of human life. The construction industry is not ignoring these innovative technologies, offering expanded application opportunities at every stage of the construction business. The introduction of innovative technologies into the construction industry allows eliminating the risk of injury to workers during performing assigned tasks, reduce the amount of labor required to complete works, to improve the economic performance of both large enterprises and small businesses, bringing with it an effective increase in profits for the state treasury, allowing to improve the quality of life of the population [1]. In addition, innovative technologies are capable of maintaining the environment by minimizing harmful emissions and saving natural resources. Among the most popular innovations that have positive dynamics of exploitation, the following technologies can be distinguished [2]: BIM (Building Information Modeling); 3D printing; recycled and eco-friendly materials; energy-saving methods; robotics; sensors; laser scanning; Big Data.

BIM (Building Information Modeling) – a technology that allows the work of several specialists in different fields to be combined into one whole, while creating a 3D model of an object filled with initial information and data. Working with the technology in question occurs through the use of data, which is stored on one server. Access to the server is open to all project participants.

3D printing – technology, the use of which makes it possible to print both structures, parts, elements necessary for construction work, and small building structures, such as bridges, cottages. The use of this technology is in demand among small businesses providing services for the production of materials and the construction of estate complexes [3].

Recycled and eco-friendly materials – the technology of processing human waste into materials, the use of which is relevant both in the construction industry and in many other industries, has leading indicators of

demand among the population due to the preservation of the environment and natural resources.

Energy saving methods – The relevance of this method lies in the development of processing and efficient use of both solar and wind energy obtained through accumulation and distribution, while allowing to reduce the amount of emissions into the environment.

Robotization – technology that reduces the risk of injury to people or effective use of humans and resources in the workplace by using robots that are programmed and configured to perform specific tasks.

Sensors – The use of this technology allows for remote and immediate monitoring of the condition of various structures, the operation of which plays an important role in human life.

Laser scanning – a technology that allows for the creation of a 3D model of an object in the shortest possible time using points obtained with an accuracy of 0.5–5 mm through preliminary scanning [4]. The effective use of this technology can be identified in areas of the facility where access is difficult or where it is located in a zone that is dangerous to human life.

Big Data – a large flow of information and data, the processing and structuring of which is only possible on industrial computers, since everyday personal computers are not capable of accommodating and processing such a volume of data. Effective use of this technology allows achieving high results in many areas of human activity by providing analyzed information.

At the moment, the artificial intelligence technology stands out for its effectiveness in scientific literature and expert works [5]. Since this innovation is in its infancy, the scientific community is just beginning to delve deeper into its study by providing publicly available results of the application and operation of artificial intelligence both in laboratory and in real life conditions. This technology already has positive development dynamics, providing effective results of its application (Figure 1).

At the moment, the greatest demand for the use of artificial intelligence is in such countries and states as the USA, Russia, Poland, Germany, China and Japan [7]. Having an infinite reserve of development, artificial intelligence allows for continued experimental implementation and application in all spheres of human life.

Artificial intelligence (AI)

Progress does not stand still, scientists and private enthusiasts around the world put forward their innovations for the benefit of improving human life, achieving high marks from both the population and organizations that exploit scientific developments. Humanity has a desire to create an innovation that can replace conventional technologies and unite all of this into one, thereby achieving a positive result in the construction of vital areas. Artificial intelligence, if properly developed by scientists, is capable of providing humanity with a solution to this issue. The daily involvement of the population in the use of basic and primitive capabilities of artificial intelligence technology expands the range of studies and increases the likelihood of subsequent progress in the development of this area [8, 9].

Due to the continuous and persistent development of modern technologies capable of making a positive impact on the construction industry and human life in general, it becomes possible to integrate artificial intelligence into technologies that have received enormous recognition from world experts in the field of technology development, as well as specialists who have applied these innovations in the work process. For the most successful integration of artificial intelligence with modern technologies, it is necessary to thoroughly study each of the innovations, take into account the economic part of this issue, provide for possible unforeseen costs, and ensure high indicators of human safety, as well as the relevance of use with the possibility of subsequent potential development.

Currently, the most effective and proven innovations on the world stage are: *BIM*; *3D printing*; *Laser scanning*; *Robotics* and *Big Data*. A detailed examination of these innovations does not raise the slightest doubt about the relevance and effectiveness of their use, both from an economic point of view and from the worker safety point of view. In addition to their proven positive qualities, these innovations lend themselves well to parallel integration with artificial intelligence technology, allowing for new opportunities in the construction industry, the formation of a new labor market, increased economic performance, increased productivity, and improved quality of human life. Therefore, it is necessary to thoroughly study and describe the options for possible integration of artificial intelligence with the above technologies with construction industry.

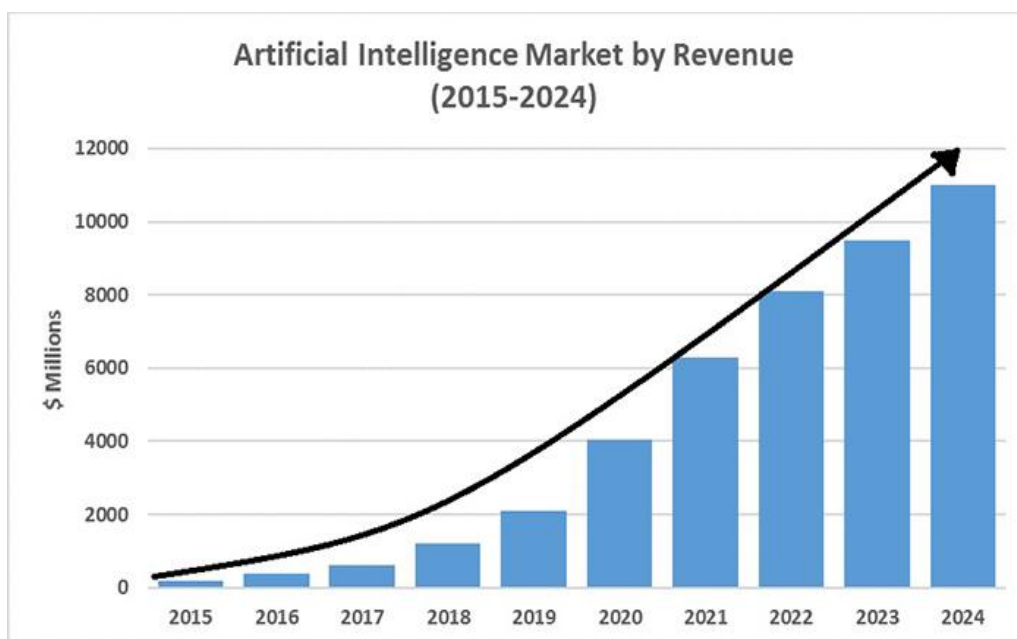


Figure 1 – Artificial Intelligence Market by Revenue [6]

1 BIM

The integration of artificial intelligence with BIM (Building Information Modeling) technology implies both the expansion of the possibilities of application of this technology and the increase of its coefficient of efficiency in the production of works. Considering the BIM technology with integrated artificial intelligence on the example of the initial creation of the information model is possible by analyzing the climatic region of the future building, to determine in advance the efficiency of using certain materials for the construction of the building, its finishing and insulation, determining the remaining service life, as well as the calculation of financial costs, offering variations of both design and structural solution of the building [10]. For the last few years the analysis of the climatic area is performed by providing climatic data to the artificial intelligence, which in turn analyses the area of interest, calculates the possible future climate change, foresees the occurrence of cataclysms and unfavorable conditions. The next step after completing the analysis is to present the results of the work. Based on the analysis, options for using materials in construction are proposed, which, according to the artificial intelligence, will ensure the longest service life for the building being constructed in this specific climatic zone. The estimated cost of purchasing these materials within the country under consideration will also be provided, along with recommendations for carrying out construction activities depending on the time of year. In this way, construction companies can save time on organizational work, while speeding up subsequent processes. For potential customers, this method of integrating artificial intelligence allows to determine in advance the economic benefits of construction works and compare the possible risks of construction and operation of the future object. At the agreement of the conducted analytical works at the initial stages follows the development and modelling of the information model of the building [11, 12]. Including the initial data obtained during the preliminary stage through the analysis of the climatic zone, the model is progressively enriched with informational data as it is developed (Figure 2). This allows the artificial intelligence to analyze deviations from the project and thereby calculate risks that may arise due to these discrepancies. In the future, when the customer receives the information model, which was developed using artificial intelligence, it is possible to continue using this technology without the necessary training, allowing only to supplement the initial data and information related to the adoption of new norms and regulations in the construction industry.

2 3D printing

3D printing currently one of the leading technologies in use around the world. This technology has gained interest among construction giants around the world, as well as among small commercial firms due to its

positive qualities, offering both the customer and the contractor economically favorable conditions for the construction and subsequent operation of objects co-created on the basis of 3D printing. Due to the integration of artificial intelligence into 3D printing technology, it is possible to avoid both systemic and human errors in construction work. Artificial intelligence is able to take responsibility for selecting the optimal material and exclude possible operator errors, to carry out post-processing of printing, thereby eliminating its defects, saving time and materials for manual revision of the object, to determine the optimum height and density of the printing layer, as well as the trajectory (Figure 3).

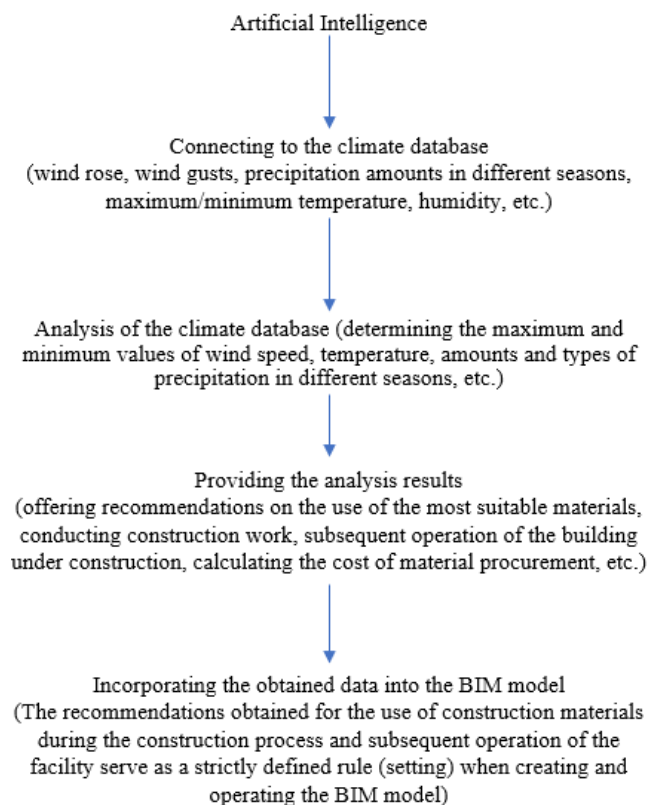


Figure 2 – Step-by-step process of AI interaction with BIM

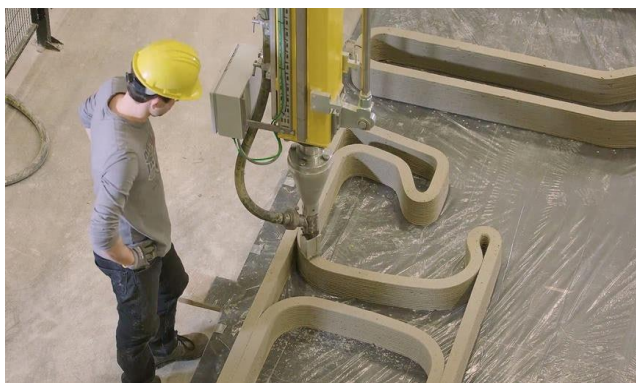


Figure 3 – Example of 3D printing of a building [13]

The fundamental action in the development of an object using a 3D printer is the development of its model [3]. Often, the model of objects is taken from a catalogue or developed by specialists for a long time, leaving behind the possibility of errors made during construction, which are determined after printing. These errors can be related both to human factor, omission of some moments during construction, and systematically made. Artificial intelligence, in its turn, is able to generate and work out the model of the object, thus excluding the probability of occurrence of both errors of specialists, related to the human factor, and system errors, related to the malfunction of software, in parallel checking the model for the possible occurrence of collisions. This possibility of artificial intelligence integration allows to diversify and expand the library of models, thereby increasing the financial flow coming from customers, reduces the probability of errors in the construction of the model, saving time and money of both the customer and the contractor. This method, due to its low cost, is able at the state level to act as an environmentally friendly and cost-effective solution for the mass construction of housing facilities, allowing to reduce the growth of homelessness of citizens, increase the economic performance of the state, as well as to act as an innovative solution to housing problems after cataclysms [14]. In January 2025, the state of California experienced catastrophic destruction of housing units due to massive fires. The cost of reconstruction of the city limits is estimated in billions of dollars, the terms of construction works are estimated in several ten years, which entails an increase in the growth of prices for construction services and an increase in the number of people without permanent residence. This method of integrating artificial intelligence with 3D printing technology can act as a kind of airbag for the state of California, accelerating the process of construction of housing facilities, replacing the usual U.S. method of construction using flammable wooden frame, reducing the growth of the number of people in need of housing facilities [15].

3 Laser scanning

Laser scanning is in great demand among specialists in various spheres of human activity. In the construction industry this technology is an integral part of pre-project and other works. Thanks to its functionality and capabilities, such as the accuracy of scanning objects with a frequency of up to 0.5-5 mm, the ability to operate and conduct work at any time of day, without being tied to the daylight hours, full integration with the information model of the object, supplementing it with the necessary values, the possibility of remote scanning, which is quite relevant in situations where the necessary object is located in an inaccessible area or in a dangerous area for humans [4]. It should also be highlighted the fact that laser scanning has minimal costs in terms of work time, which contributes to the acceleration of all subsequent processes, saving labor costs of workers and increasing the speed of construction works. Integration of artificial intelligence with this technology can provide a more efficient result of scanning works due to automatic rework of the model created based on the results of scanning. Since laser scanning works can take place at any time of the day and do not depend on the daylight hours, the final result may often include collisions of the model, which are processed and refined by specialists, spending a lot of time. Artificial Intelligence is able to detect in advance the occurrence of collisions due to insufficient or unreliable data received on the server, informing the engineer managing the scanning process, who in turn will take measures

to re-run the work in the area with identified deficiencies. In addition to alerting specialists when conflicts are detected during scanning, the AI technology is able to perform model edits by recognising such areas and correcting them through analysis of the problem area. The analysis is based on studying the problem area from all 360 degrees, recognising the top and bottom points, width and height, depth and convexity of this part of the model [16]. This analysis allows to increase and refine the accuracy of the scanned model, which results in less time spent on re-scanning and manual refinement of the model. Taking into account the fact that laser scanning technology is often also used for scanning monuments, landmarks or other objects of old and dilapidated buildings, the drawing documentation for which is most often lost or in disrepair, the approaches to such objects have a high risk of injury for workers [17]. Laser scanning technology makes it possible to restore these data through its functionality, providing remote work, minimising the risk of injury, saving the number of specialists involved, and providing minimal costs in terms of both time and funding (Figure 4).

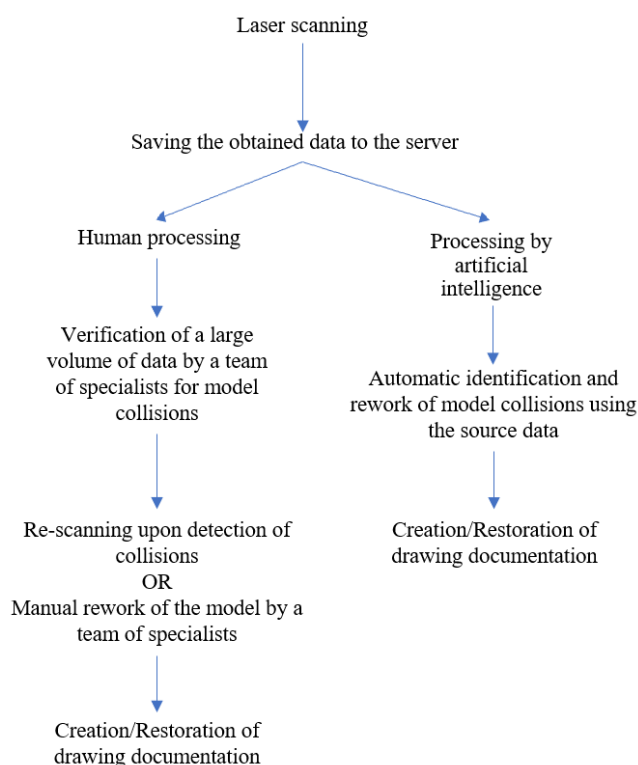


Figure 4 – Step-by-step process of AI interaction with laser scanning

4 Robotics

Robotics has excellent indicators of effective implementation in all spheres of human activity all over the world. The construction industry is also not ignoring this technology, replacing elementary human labor with less fussy and more cost-effective electronic units-robots by operating and implementing this technology everywhere, mankind began to think about the complete replacement of human labor force by trained robots, thus protecting their enterprises from human errors, as the production of works related to the use of this technology does not require daily rest and monthly payment of labor. By replacing live labor force, enterprises and various organizations, both giants on the world stage and small private businesses, have increased their economic performance in multiples tasks, allowing production to operate 24 hours a day [18]. In addition to the increased profit margins and reduced monthly costs, organizations also benefit from quality production, which is difficult to monitor without the intelligence to detect defective production. All it takes is the slightest machine malfunction in robotic production, which will lead to defective products, resulting in production losses. Integration of artificial intelligence with robotics can be a solution to this problem. Since robotics is associated with actions clearly defined by the software, there are mishaps that can be solved by deviating from the necessary work prescribed by the software, solving the problem and then returning to the task at hand (Figure 5).

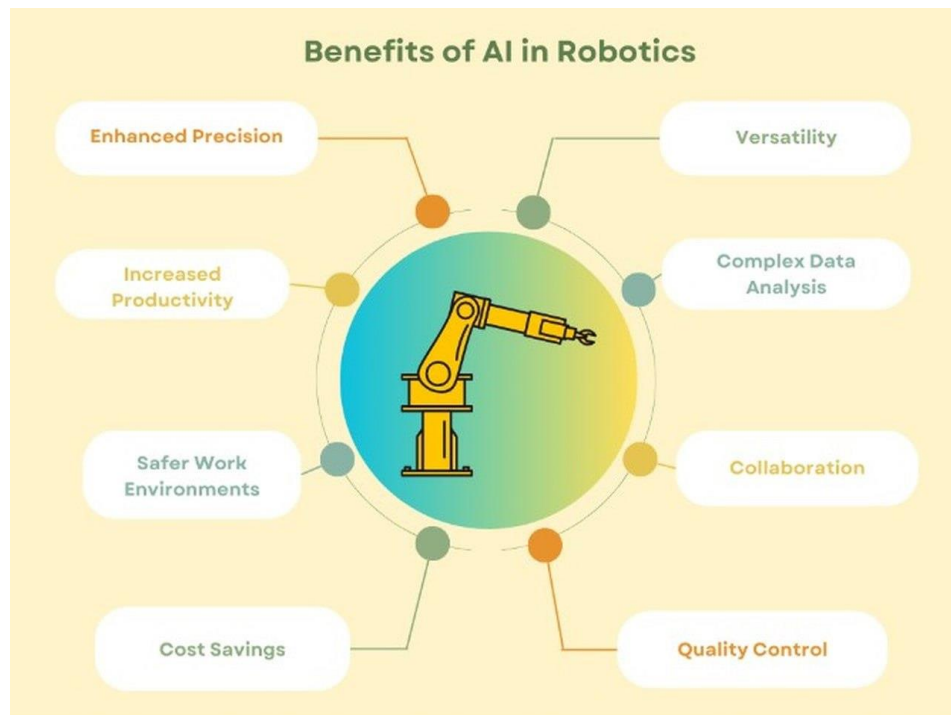


Figure 5 – Benefits of AI in Robotics [19]

The artificial intelligence integrated into the robot is able to eliminate this problem by analyzing the production situation. When a defect or atypicality of a product is recognized, the artificial intelligence analyses the entire production system, finding the catalyst of the problem, dealing with it itself, or, if it cannot be solved by itself, signaling the problem to a specialist. This integration helps to reduce the number of financial losses due to the production of defective products, to further reduce the workforce involved, to maintain and improve the quality of products, and to increase profit growth.

5 Big Data

Big Data technology is aggressively taking over all possible areas of human activity, and the construction industry has not been ignored. The application of this technology in construction has expanded the range of possibilities for specialists through their brilliant skills in analyzing large amounts of data. Specialists have had the opportunity to participate in the development and execution of those works whose rationality and benefits were widely questioned, with scepticism on the part of leading experts [20]. Experimenting with the implementation of bold projects, the embodiment of which occurred due to complex, but at the same time fast, by human standards, analysis, large companies have increased their economic performance, provided jobs for a large number of people, provided the world with an innovative view of making complex decisions. Integration of artificial intelligence with Big Data technology will allow analyzing and proposing informed decisions related to risks for companies. This method of integration will increase the speed of processing even more information and data flow, which entails a jump in financial gain for companies, reducing the growth of subsequent risks, ensuring the safety of both workers and subsequent exploiters [21]. Since the fundamental decision-making process is the analysis of possible risks, artificial intelligence integrated with Big Data technology will allow the final result to be put forward according to human thinking (Figure 6).

There are different types of risks, the impact of which is reflected in the degree of rejection or acceptance of a project. The human mind often evaluates each risk differently, and the occurrence of one risk can be overshadowed by decisions related to subsequent risks. Since Big Data technology is more focused on system-defined analyses, decision making can be reduced to rejecting the agreement of an emerging risk despite the fact that this risk can be ignored in favour of achieving a subsequent positive outcome [23]. Artificial intelligence, in turn, can approach this issue according to human thinking, while analyzing much more information.

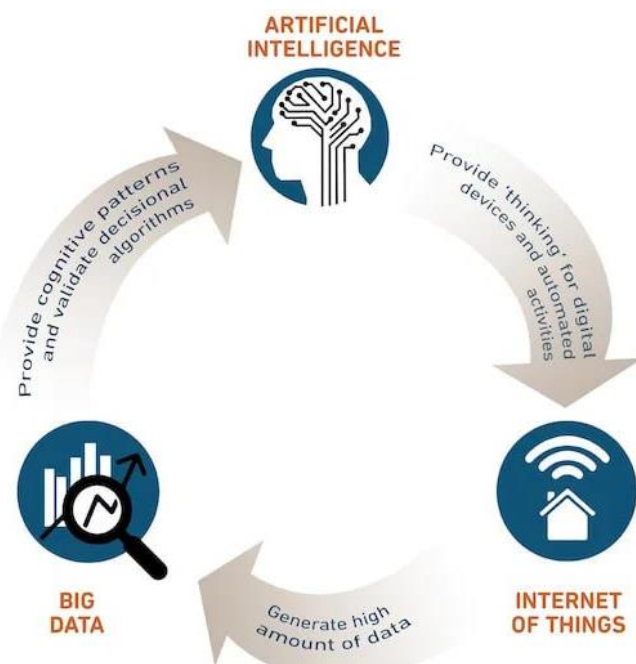


Figure 6 – The principle of Artificial Intelligence working with Big Data [22]

Advantages and disadvantages

Having studied each of the most popular innovations at the moment, capable of delivering high efficiency rates both in the construction industry and in everyday human life through integration with artificial intelligence technology, it is necessary to highlight their advantages and disadvantages, the influence of which can significantly affect both the subsequent development of technologies and the global innovation race.

1. Advantages:

- reduction of the amount of financial costs for project implementation;
- achieving high results in maintaining and improving working quality of workers and people;

- reduction in the number of workers involved in project implementation;
- reduction of risk occurrence at all stages of work;
- remote control of work;
- speed of work activities;
- approach to solving and implementing work issues in accordance with human thinking;
- providing opportunities for development;
- environmentally friendly activities with reduced use and release of harmful materials.

2. Disadvantages:

- reduction in the number of workers;
- lack of implementation and operation engineers;
- lack of funding due to lack of social acceptance;
- the initial stage of technology development with unsolved problems in the system;
- analysis of completed actions to identify errors.

Results

Having considered and analyzed the possibilities of artificial intelligence in integration with various innovative technologies, which occupy leading positions among specialists from all over the world in terms of demand and efficiency of task performance, it is necessary to draw a conclusion. Artificial Intelligence is at an early stage of development, with shortcomings in the development associated with the lack of qualified personnel capable of establishing the workflow of this technology and at the same time, despite the studied flaws of the system demonstrates high performance and quality of available labor. The development and study of this technology can lead to the realization of a completely new and universally demanded mechanism of doing business. Increasing the economic component and developing the technique of safe working process for both humans and the environment, artificial intelligence remains in the center of attention of specialists and scientists, which allows for the early stages of private development of this direction without requiring huge investments. Based on the above analysis, we can say:

- the impact of artificial intelligence on the construction industry is leading humanity to progress in replacing conventional thinking with an artificially created mind that is not inferior to human intelligence in any way;
- the number of people interested in studying and implementing artificial intelligence is growing at a rapid pace, contributing to the development of human thinking;
- innovations currently being used are capable of demonstrating even better results in terms of quality of work due to integration with artificial intelligence;
- increasing the amount of financial investment in the development of innovative technologies can improve and enhance the quality of human life;
- artificial intelligence technology has no boundaries in development, providing humanity with the opportunity to endlessly modernize and develop itself as the most important tool of life.

Conclusion

This research work can provide scientists and private enthusiasts with a knowledge base and capabilities of artificial intelligence technology for its further study and development. The implementation and use of artificial intelligence in everyday and professional human life is in great demand, providing an opportunity for both small and large businesses to develop and use products that have no analogues on the market, contributing to improving the quality of human life, increasing the economic indicators of countries, saving the costs of energy used and replenishing environmental reserves by reducing the use and emission of harmful substances into the atmosphere.

Publicly available indicators of the operation and implementation of artificial intelligence in all spheres of human life demonstrate positive results, the improvement of which has an unlimited reserve of development. On the world stage, artificial intelligence has proven itself to be a good thing, presenting humanity with clear benefits from its use.

In addition to the positive experience of using artificial intelligence technology, you should remember to control it. Scientists have not yet fully studied the perception of the technology in question of certain flows of information, data, and knowledge, which could subsequently have a negative impact on humanity as a whole.

References

1. Kashiripur, M. M. Vozможности iskusstvennogo intellekta v stroitel'noj industrii / M. M. Kashiripur, V. A. Nikol'yuk // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. – 2024. – № 26 (1). – S. 163–178. – DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-163-178.
2. Iskusstvennyy intellekt v stroitel'stve. – URL: <https://bim-info.ru/articles/iskusstvennyy-intellekt-v-stroitel'stve/?ysclid=m6iy8lgea3788520490> (data obrashcheniya: 10.01.2025).
3. Kashiripur, M. M. Novye tendencii i innovacii v stroitel'stve: stroitel'stvo s pomoshch'yu 3D printera / M. M. Kashiripur, S. B. Garagozov // Inzhiniring i ekonomika: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: sbornik materialov studencheskoj nauch.-tekhn. konf. v ramkah XX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. BNTU «Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu i ekonomike» i 78-j studencheskoj nauch.-tekhn. konf. BNTU, 4–5 maya 2022 g. / redkol.: O. S. Golubova [i dr.] ; sost. N. A. Pashkevich. – Minsk : BNTU, 2022. – S. 94–99.
4. Innovacii v stroitel'noj otrasli. – URL: <https://academy.peri.ru/blog/innovacii-v-stroitelnoj-otrasli-v-2023-godu?ysclid=m5zt1sohmt212267675> (data obrashcheniya: 10.01.2025).
5. Kievskaya, K. Vnedrenie iskusstvennogo intellekta v stroitel'noj otrasli i analiz sushchestvuyushchih tekhnologij / K. Kievskaya, S. Cyucyura // Tekhnologicheskij audit i rezervy proizvodstva. – 2021. – № 2. – S. 12–15.
6. Programmnoe obespechenie i tekhnologii // medrectechnologies.com. – URL: <https://medrectech.com/industries/software-and-technology> (data obrashcheniya: 17.04.2025).
7. Applications of Artificial Intelligence (AI) in the construction industry: A review of Observational Studies / A. Adeloye, O. Diekola, K. Delvin, C. Gbenga // Trends in Applied Sciences Research. – 2023. – Vol. 1, No. 4. – P. 42–52.
8. Kashiripur, M. M. Avtomaticheskij monitoring dlya slozhnyh sooruzhenij i infrastruktury goroda / M. M. Kashiripur, V. M. Borejko // Dorozhnoe stroitel'stvo i ego inzhenernoe obespechenie: materialy III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. / sost. S. N. Sobolevskaya, E. M. Zhukovskij. – Minsk : BNTU, 2022. – S. 90–94.
9. Iskusstvennyy intellekt i additivnye tekhnologii: perspektivy vzaimodejstviya. Blog 3D-ekspertov // IQB technologies.ru. – URL: <https://blog.iqb.ru/ai-3d-printing-intersection/?ysclid=m6ixhtensc502604765> (data obrashcheniya: 08.01.2025).
10. Kashiripur, M. M. Razrabotka podhodyashchej metodologii upravleniya stroitel'nymi proektami / M. M. Kashiripur, A. M. Al'malegi // Inzhiniring i ekonomika: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: sbornik materialov studencheskoj nauch.-tekhn. konf. v ramkah XX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. BNTU «Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu i ekonomike» i 78-j studencheskoj nauch.-tekhn. konf. BNTU, 4–5 maya 2022 g. / redkol.: O. S. Golubova [i dr.] ; sost. N. A. Pashkevich. – Minsk : BNTU, 2022. – S. 78–83.
11. Kashiripur, M. M. Tekhnologii chetvertoj volny v stroitel'stve i arhitekture: ot idei do realizacii (chast' 2) / M. M. Kashiripur // Gradostroitel'stvo i arhitektura. – 2024. – T. 14, № 3. – C. 178–193. – DOI: 10.17673/Vestnik.2024.03.22.
12. Kashiripur, M. M. Tekhnologii chetvertoj volny v stroitel'stve i arhitekture: ot idei do realizacii (CH. 3: Primery primeneniya tekhnologij chetvertoj volny v stroitel'stve i arhitekture) / M. M. Kashiripur // Gradostroitel'stvo i arhitektura. – 2024. – T. 14. – № 4. – C. 171–179. – DOI: 10.17673/Vestnik.2024.04.24.
13. Avstralijskaya kompaniya Mirreco budet pechatat' doma na 3D-printere // 3dprint.com. – URL: <https://3dprint.com/217838/mirreco-to-3d-print-hemp/amp> (data obrashcheniya: 18.04.2025).
14. Kashiripoor, M. M. Metaverse city: definition and direction development for urban planning and architecture / M. M. Kashiripoor // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – No. 3 (132). – P. 2–10. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-2-10.
15. Kashiripur, M. M. Innovacii v stroitel'stve: stroitel'stvo domov iz othodov / M. M. Kashiripur, I. V. Kuhareva // Inzhiniring i ekonomika: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: sbornik materialov studencheskoj nauch.-tekhn. konf. v ramkah XX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. BNTU «Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu i ekonomike» i 78-j studencheskoj nauch.-tekhn. konf. BNTU, 4–5 maya 2022 g. / redkol.: O. S. Golubova [i dr.] ; sost. N. A. Pashkevich. – Minsk : BNTU, 2022. – S. 100–103.
16. Kak s pomoshch'yu lazernogo 3D-skanirovaniya sokratit' riski pri stroitel'stve i rekonstrukcii zdaniy i ob'ektov // digital-build.ru. – URL: <https://digital-build.ru/kak-s-pomoshch'yu-lazernogo-3d-skanirovaniya-sokratit-riski-pri-stroitel'stve-i-rekonstrukcii/?ysclid=m6iy1xrd6h211821245> (data obrashcheniya: 07.01.2025).

17. Kashiripur, M. M. Nadležashchaya metodologiya avtomatizirovannogo monitoringa v processe stroitel'stva / M. M. Kashiripur, A. A. Al'-Sajyab // Inzhiniring i ekonomika: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya : sbornik materialov studencheskoj nauch.-tekhn. konf. v ramkah XX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. BNTU «Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu i ekonomike» i 78-j studencheskoj nauch.-tekhn. konf. BNTU, 4–5 maya 2022 g. / redkol.: O. S. Golubova [i dr.] ; sost. N. A. Pashkevich. – Minsk : BNTU, 2022. – S. 84–88.
 18. Eber, V. Potencial iskusstvennogo intellekta v upravlenii stroitel'stvom / V. Eber // Organizaciya, tekhnologiya i upravlenie v stroitel'stve: mezhdunarodnyj zhurnal. – 2020. – № 12. – P. 2053–2063.
 19. II v Robototekhnike. – URL: <https://www.technolynx.com/post/ai-in-robotics> (data obrashcheniya: 18.04.2025).
 20. Kashiripur, M. M. Avtomaticheskij monitoring dlya slozhnyh sooruzhenij i infrastruktury goroda / M. M. Kashiripur, V. M. Borejko // Dorozhnoe stroitel'stvo i ego inzhenernoe obespechenie : materialy III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. / sost. S. N. Sobolevskaya, E. M. Zhukovskij. – Minsk : BNTU, 2022. – S. 90–94.
 21. Ispolzovanie II v stroitel'stve: primery i budushchee // Gectaro.com : delovoy portal. – URL: <https://gectaro.com/blog/tpost/r71jb8yix1-ispolzovanie-ii-v-stroitel'stve-primery-i-ysclid=m6i7mulcwq9216836> (data obrashcheniya: 08.01.2025).
 22. Desyat' osnovnyh tendencij v upravlenii Internetom. – URL: <https://humanism.ai/blogs/ten-major-trends-in-internet-governance-2017-mid-year-review> (data obrashcheniya: 20.04.2025).
 23. Artificial Intelligence for Big Data & How They Work Together // Medium.com. – URL: <https://medium.com/@jonraihan/artificial-intelligence-for-big-data-how-they-work-together-6e489f28a831> (data obrashcheniya: 03.01.2025).
- Список цитированных источников**
1. Каширипур, М. М. Возможности искусственного интеллекта в строительной индустрии / М. М. Каширипур, В. А. Николюк // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – № 26 (1). – С. 163–178. – DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-163-178.
 2. Искусственный интеллект в строительстве. – URL: <https://bim-info.ru/articles/iskusstvennyy-intellekt-v-stroitel'stve/?ysclid=m6iy8lgea3788520490> (дата обращения: 10.01.2025).
 3. Каширипур, М. М. Новые тенденции и инновации в строительстве: строительство с помощью 3D принтера / М. М. Каширипур, С. Б. Гарагозов // Инжиниринг и экономика: современное состояние и перспективы развития : сборник материалов студенческой науч.-техн. конф. в рамках XX Междунар. науч.-техн. конф. БНТУ «Наука – образованию, производству и экономике» и 78-й студенческой науч.-техн. конф. БНТУ, 4–5 мая 2022 г. / редкол.: О. С. Голубова [и др.] ; сост. Н. А. Пашкевич. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 94–99.
 4. Инновации в строительной отрасли. – URL: <https://academy.peri.ru/blog/innovacii-v-stroitelnoj-otrasli-v-2023-godu?ysclid=m5zt1sohmt212267675> (дата обращения: 10.01.2025).
 5. Киевска, К. Внедрение искусственного интеллекта в строительной отрасли и анализ существующих технологий / К. Киевска, С. Цюцюра // Технологический аудит и резервы производства. – 2021. – № 2. – С. 12–15.
 6. Программное обеспечение и технологии // medrectechnologies.com. – URL: <https://medrectech.com/industries/software-and-technology> (дата обращения: 17.04.2025).
 7. Applications of Artificial Intelligence (AI) in the construction industry: A review of Observational Studies / A. Adeloye, O. Diekola, K. Delvin, C. Gbenga // Trends in Applied Sciences Research. – 2023. – Vol. 1, No. 4. – P. 42–52.
 8. Каширипур, М. М. Автоматический мониторинг для сложных сооружений и инфраструктуры города / М. М. Каширипур, В. М. Бorejko // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы III Междунар. науч.-техн. конф. / сост. С. Н. Соболевская, Е. М. Жуковский. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 90–94.
 9. Искусственный интеллект и аддитивные технологии: перспективы взаимодействия. Блог 3D-экспертов // IQB technologies.ru. – URL: <https://blog.iqb.ru/ai-3d-printing-intersection/?ysclid=m6ixhtensc502604765> (дата обращения: 08.01.2025).
 10. Каширипур, М. М. Разработка подходящей методологии управления строительными проектами / М. М. Каширипур, А. М. Альмалеги // Инжиниринг и экономика: современное состояние и перспективы развития : сборник материалов студенческой науч.-техн. конф. в рамках XX Междунар. науч.-техн. конф. БНТУ «Наука – образованию, производству и экономике» и 78-й студенческой науч.-техн. конф. БНТУ, 4–5 мая 2022 г. / редкол.: О. С. Голубова [и др.] ; сост. Н. А. Пашкевич. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 78–83.
 11. Каширипур, М. М. Технологии четвертой волны в строительстве и архитектуре: от идеи до реализации (часть 2) / М. М. Каширипур // Градостроительство и архитектура. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 178–193. – DOI: 10.17673/Vestnik.2024.03.22.
 12. Каширипур, М. М. Технологии четвертой волны в строительстве и архитектуре: от идеи до реализации (Ч. 3: Примеры применения технологий четвертой волны в строительстве и архитектуре) / М. М. Каширипур // Градостроительство и архитектура. – 2024. – Т. 14. – № 4. – С. 171–179. – DOI: 10.17673/Vestnik.2024.04.24
 13. Австралийская компания Mirresco будет печатать дома на 3D-принтере // 3dprint.com. – URL: <https://3dprint.com/217838/mirresco-to-3d-print-hemp/amp> (дата обращения: 18.04.2025).
 14. Kashiripur, M. M. Metaverse city: definition and direction development for urban planning and architecture / M. M. Kashiripur // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – No. 3 (132). – P. 2–10. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-2-10.
 15. Каширипур, М. М. Инновации в строительстве: строительство домов из отходов / М. М. Каширипур, И. В. Кухарева // Инжиниринг и экономика: современное состояние и перспективы развития : сборник материалов студенческой науч.-техн. конф. в рамках XX Междунар. науч.-техн. конф. БНТУ «Наука – образованию, производству и экономике» и 78-й студенческой науч.-техн. конф. БНТУ, 4–5 мая 2022 г. / редкол.: О. С. Голубова [и др.] ; сост. Н. А. Пашкевич. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 100–103.
 16. Как с помощью лазерного 3D-сканирования сократить риски при строительстве и реконструкции зданий и объектов // digital-build.ru. – URL: <https://digital-build.ru/kak-s-pomoshhyu-lazernogo-3d-skanirovaniya-sokratit-riski-pri-stroitel'stve-i-rekonstrukcii/?ysclid=mbiy1xrd6h21821245> (дата обращения: 07.01.2025).
 17. Каширипур, М. М. Надлежащая методология автоматизированного мониторинга в процессе строительства / М. М. Каширипур, А. А. Аль-Сайяб // Инжиниринг и экономика: современное состояние и перспективы развития : сборник материалов студенческой науч.-техн. конф. в рамках XX Междунар. науч.-техн. конф. БНТУ «Наука – образованию, производству и экономике» и 78-й студенческой науч.-техн. конф. БНТУ, 4–5 мая 2022 г. / редкол.: О. С. Голубова [и др.] ; сост. Н. А. Пашкевич. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 84–88.
 18. Эбер, В. Потенциал искусственного интеллекта в управлении строительством / В. Эбер // Организация, технология и управление в строительстве: международный журнал. – 2020. – № 12. – P. 2053–2063.
 19. ИИ в Робототехнике. – URL: <https://www.technolynx.com/post/ai-in-robotics> (дата обращения: 18.04.2025).
 20. Каширипур, М. М. Автоматический мониторинг для сложных сооружений и инфраструктуры города / М. М. Каширипур, В. М. Бorejko // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы III Междунар. науч.-техн. конф. / сост. С. Н. Соболевская, Е. М. Жуковский. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 90–94.
 21. Использование ИИ в строительстве: примеры и будущее // Gectaro.com : деловой портал. – URL: <https://gectaro.com/blog/tpost/r71jb8yix1-ispolzovanie-ii-v-stroitel'stve-primery-i-ysclid=m6i7mulcwq9216836> (дата обращения: 08.01.2025).
 22. Десять основных тенденций в управлении Интернетом. – URL: <https://humanism.ai/blogs/ten-major-trends-in-internet-governance-2017-mid-year-review> (дата обращения: 20.04.2025).
 23. Artificial Intelligence for Big Data & How They Work Together // Medium.com. – URL: <https://medium.com/@jonraihan/artificial-intelligence-for-big-data-how-they-work-together-6e489f28a831> (дата обращения: 03.01.2025).

Материал поступил 29.04.2025, одобрен 07.05.2025, принят к публикации 07.05.2025

УДК 625.855.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЯМОЧНОГО РЕМОНТА АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ В ДВОРОВЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Д. И. Бочкарев¹, В. В. Томашов², В. В. Петрусевич³

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов, УО «Белорусский государственный университет транспорта», Гомель, Беларусь, e-mail: bochk_dmitr@mail.ru

² Магистр военных наук, начальник кафедры военно-специальной подготовки, УО «Белорусский государственный университет транспорта», Гомель, Беларусь, e-mail: vladimirtomasov735@gmail.com

³ Магистр технических наук, доцент кафедры военно-специальной подготовки, УО «Белорусский государственный университет транспорта», Гомель, Беларусь, e-mail: petrusevichvv@gmail.com

Реферат

В настоящее время в Республике Беларусь уделяется огромное внимание устройству и модернизации сети автомобильных дорог, но вместе с этим состояние асфальтобетонных покрытий в дворовых территориях требует постоянного контроля и своевременного ремонта ввиду значительно возросших транспортных нагрузок и не всегда соблюденной технологии по их устройству. Асфальтобетонные покрытия в наших дворах – это очень значительные по объему объекты транспортной инфраструктуры, которые не всегда вовремя ремонтируются дорожными эксплуатационными организациями. Проведение ремонтов и устройство различных подземных сетей в придомовой территории также данную проблему усугубляют, когда проводятся со вскрытием дорожного покрытия. Просадки и разрушения асфальтобетонного покрытия возникают также в результате невыполнения строительных норм при уплотнении технологических слоев дороги.

Данная ситуация требует своевременного вмешательства, которое подразумевает дорогостоящий ремонт асфальтобетонного покрытия, что заставляет эксплуатирующие организации осуществлять поиск сравнительно недорогих и технологичных вариантов решения данной проблемы. Авторами в данной статье представлены варианты композиций для выполнения ямочного ремонта асфальтобетонного покрытия в дворовых территориях, рассмотрены вопросы их долговечности, а также экономическая эффективность от их применения.

Ключевые слова: дворовая территория, асфальтобетонное покрытие, дорожно-строительные материалы, битум, связующее, отсев щебня.

STUDY OF THE BEHAVIOR OF THE COMPOSITION FOR PERFORMING POT REPAIR OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENT IN YARD AREAS

D. I. Bochkarev, V. V. Tomashov, V. V. Petrushevich

Abstract

At present, in the Republic of Belarus, great attention is paid to the construction and modernization of the road network, but at the same time, the condition of asphalt concrete surfaces in courtyard areas requires constant monitoring and timely repairs due to significantly increased traffic loads and not always observed technology for their construction. Asphalt concrete pavement in our yards is a very significant volume of transport infrastructure objects, which are not always repaired in time by road maintenance organizations. Carrying out repairs and installing various underground networks in the adjacent territory also aggravates this problem when carried out with the opening of the road surface. Carrying out repairs and installing various underground networks in the local area also aggravate this problem when they are carried out with the opening of the road surface. Subsidence and destruction of asphalt concrete pavement also occur as a result of failure to comply with construction standards when compacting the technological layers of the road.

This situation requires timely intervention, which implies expensive repairs of the asphalt concrete pavement, which forces operating organizations to search for relatively inexpensive and technologically advanced options for solving this problem. In this article, the authors present variants of compositions for performing pothole repairs of asphalt concrete pavement in yard areas, and consider issues of their durability, as well as the economic efficiency of their use.

Keywords: yard area, asphalt concrete pavement, road construction materials, bitumen, binder, crushed stone screenings.

Введение

В настоящее время при строительстве, ремонте и реконструкции подъездных дорог к придомовой инфраструктуре в Республике Беларусь отдается предпочтение асфальтобетонному покрытию. В процессе эксплуатации данного покрытия под действием нагрузок от транспортных средств, а также влияние погодных условий на поверхности асфальтобетонных покрытий, возникают деформации и разрушения, что проявляется в виде различных выбоин, просадок, трещин и волн, что приводит к ухудшению транспортно-эксплуатационных показателей и снижению срока эксплуатации. Также стоит отметить, что на объекты придомовой транспортной инфраструктуры негативное влияние могут оказывать несвоевременность восстановления асфальтобетонного покрытия, а также проведение различных ремонтов подземных коммуникаций.

В связи с этим возникает необходимость постоянного ремонта дорожного покрытия от воздействия разрушающих факторов, что требует значительных материальных затрат. Данная ситуация определяет поиск новых технологических решений в создании более дешевых композиций для проведения ямочного ремонта, что позволит увеличить эксплуатирующим организациям объемы проводимых ремонтов асфальтобетонного покрытия в дворовых территориях.

Обзор основных технологий для выполнения ямочного ремонта асфальтобетонного покрытия

В Республике Беларусь, а также за рубежом имеется значительное количество научно-исследовательских работ и технологических решений по устранению дефектов асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог [1–8]. При этом на автомобильных дорогах высших категорий имеется определенная периодичность данных мероприятий, которая определена нормативно-правовыми актами. Значительно острее данный вопрос стоит у асфальтобетонных проездов в жилой застройке, где периодичность ремонтов не всегда соблюдается и возможны технологические нарушения целостности асфальтобетонного покрытия ввиду проведения различных строительно-восстановительных работ, необходимых для жизнеобеспечения населения.

При установившейся среднесуточной температуре воздуха +5 °С для выполнения ямочного ремонта асфальтобетонных покрытий в Республике Беларусь используют: асфальтобетонные смеси по СТБ 1033 (с применением вязких битумов по ГОСТ 22245, СТБ 1062 или СТБ EN 12591 и жидких битумов по ГОСТ 11955), складываемые органоминеральных смесей по СТБ 2175, материалы струйно-инъекционной технологии.

Технологические особенности проведения ямочного ремонта асфальтобетонных покрытий в Республике Беларусь рассмотрены в [9–13] и осуществляются по одной из следующих основных технологий, которые рассмотрены в таблице 1.

Из достоинств рассмотренных технологических вариантов в таблице 1 можно выделить их низкую стоимость и доступность прове-

дения ремонтов асфальтобетонного покрытия, но использование их возможно при температуре воздуха до +5 °С и при сухом покрытии.

Решить задачу проведения ямочного ремонта асфальтобетонного покрытия в осенне-зимне-весенний период при температуре воздуха ниже +5 °С применяют материалы и технологии, рассмотренные в [9–13] и представленные в таблице 2.

Таблица 1 – Характеристики технологий для выполнения ямочного ремонта асфальтобетонных покрытий

Наименование технологии	Применяемые материалы	Технологическая последовательность
Ямочный ремонт уплотняемыми смесями	1) смеси асфальтобетонные плотные горячие и теплые по СТБ 1033: (горячие марки I, II, III с использованием вязких битумов с глубиной проникания иглы при 25 °С от 50 до 130 мм ⁻¹ ; теплые марки II с использованием вязких битумов с глубиной проникания иглы при 25 °С от 70 до 300 мм ⁻¹ и от 130 до 300 мм ⁻¹); 2) складированные органоминеральные смеси по СТБ 2175; 3) эмульсионно-минеральные складированные смеси по СТБ 1509	1) подготовительные работы (установка технических средств организации дорожного движения (далее – ТСОДД), очистка дорожного покрытия); 2) устройство «карт»; 3) укладка смеси в «карту»; 4) уплотнение смеси; 5) герметизация мест сопряжения; 6) заключительные работы (уборка мусора, снятие ТСОДД)
Ямочный ремонт литыми асфальтобетонными смесями	битуминеральные литые смеси по СТБ 1257	1) подготовительные работы (установка ТСОДД, очистка дорожного покрытия); 2) устройство «карт»; 3) укладка смеси; 4) уплотнение смеси; 5) заключительные работы (уборка мусора, снятие ТСОДД)
Ямочный ремонт рециклированными асфальтобетонными смесями	рециклированные асфальтобетонные плотные горячие и теплые по СТБ 1033, складированные органоминеральные смеси по СТБ 2175, эмульсионно-минеральные складированные смеси по СТБ 1509, битуминеральные литые смеси по СТБ 1257	1) подготовительные работы (установка ТСОДД, очистка дорожного покрытия); 2) устройство «карт»; 3) приготовление смеси; 4) укладка смеси; 5) уплотнение смеси; 6) герметизация мест сопряжения; 7) заключительные работы (уборка мусора, снятие ТСОДД)
Ямочный ремонт по способу пропитки	смеси укладываемые по способу пропитки (щебень по ГОСТ 8267, битумная эмульсия ЭБКД-Б-65 или ЭБКД-Б-70 по СТБ 1245)	1) установка ТСОДД; 2) очистка выбоины; 3) грунтовка выбоины; 4) укладка щебня; 5) уплотнение щебня; 6) розлив эмульсии; 7) устройство защитного слоя; 8) заключительные работы (уборка мусора, снятие ТСОДД)
Ямочный ремонт по струйно-инъекционной технологии	материалы струйно-инъекционной технологии (щебень по ГОСТ 8267, битумная эмульсия ЭБКД-Б-65, ЭБКД-Б-70 или ЭБКД-С-64 по СТБ 1245)	1) установка ТСОДД; 2) очистка выбоины; 3) грунтовка выбоины; 4) укладка смеси; 5) заключительные работы (уборка незакрепленного материала, снятие ТСОДД)

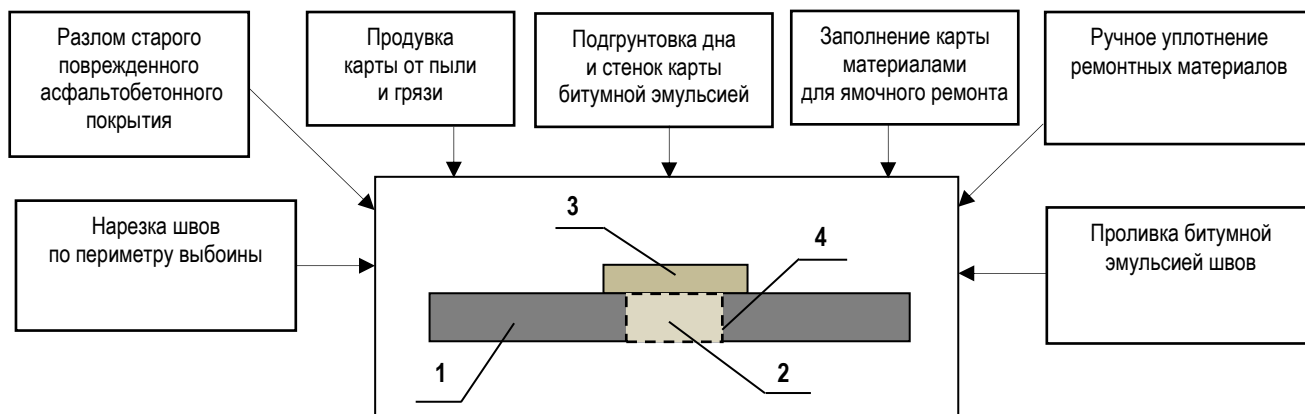
Таблица 2 – Смеси для ямочного ремонта в весенне-зимний период

Материалы и технологии	Температура воздуха, °С, не ниже
Складированные органоминеральные смеси по СТБ 2175	–20
Битуминеральные смеси по СТБ 1257	–20
Рециклированные горячие смеси плотные и литые	–20
Материалы струйно-инъекционной технологии	+5
Эмульсионно-минеральные складированные смеси по СТБ 1509	–5
Смеси, укладываемые способом пропитки	+5
Асфальтобетонные смеси по СТБ 1033	–10

Результаты исследований и их обсуждение

Одним из возможных вариантов решения задачи по сохранению целостности асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги и возможности осуществления пропуска автомобилей в Республике Беларусь выполняется ямочный ремонт покрытия согласно с разработанной РУП «Белдорцентр» технологической картой ТК 190638734-250-2019 «Ямочный ремонт асфальтобетонных дорог локальными картами» (рисунок 1) [14].

При выполнении расчетов стоимости предпочтения были отданы смеси органоминеральной складированной ремонтной по СТБ-2175 ввиду ее доступности, простоте применения и широкому диапазону температуры укладки от +30 °С до –20 °С. Примерная потребность материалов и их стоимость на 1 м² для выполнения ямочного ремонта согласно [14] асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги представлена в таблице 3.



1 – асфальтобетон; 2 – карта дефекта; 3 – материалы для ямочного ремонта; 4 – битумная эмульсия

Рисунок 1 – Технологический процесс ямочного ремонта**Таблица 3** – Примерная стоимость материалов для ямочного ремонта на 1 м²

Наименование материала	Стоимость материала за тонну, руб.	Потребность материала на 1 м ² при глубине карты 0,1 м, т	Итоговая стоимость материалов на ремонт, руб.
Смесь органоминеральная складированная ремонтная СОМС-10 (СТБ 2175-2011)	525,0 [15]	0,24	126,0
Битумная эмульсия ЭБКД-М-65; ЭБКД-М-60 (СТБ 1245-2015)	620,00 [16]	0,005	3,1
Итого	–	0,245	129,1

Анализируя таблицу 3, можно отметить, что для выполнения данного вида ремонта требуются значительные затраты для восстановления 1 м² асфальтобетонного покрытия.

Для снижения затрат при выполнении ямочного ремонта авторами предложены композиции, состоящие преимущественно из вторичных материалов.

Используемые в статье композиции состоят:

– из связующего – вторичные продукты нефтепереработки с ОАО «Мозырский НПЗ», состав которых исследованы в работе [17], свойства представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Свойства вторичных продуктов нефтепереработки ОАО «Мозырский НПЗ»

Показатель	Значение, характеристика				
	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5
Внешний вид	Вязкая и комковатая, цвет неравномерный черный				
Плотность, г/см ³	1,17	1,11	1,15	1,14	1,20
Растворимость и набухание в воде при температуре 20 °С	Не растворяется, не набухает				

- битума – БНД 70/100;
- песка природного для строительных работ по ГОСТ-8736, класс песка высший, содержание пылевидных и глинистых частиц, определенное методом мокрого посева, по массе составляет 0,5 %, модуль крупности 2,45;
- отсева щебня по ГОСТ 31424-2010 с величиной фракции 0,14–2,5 мм и наличием глиняных частиц и органических веществ не более 0,6 %;
- минерального наполнителя – дефеката (отход сахарного

производства ОАО «Случкий сахарорафинадный завод», который образуется в процессе очистки сока сахарной свеклы известью и имеет состав, мас. %: CaCO₃ – 65,5–77,8; MgCO₃ – 3,4–8,6; Al₂O₃ – 0,2–3,8; P₂O₅ – 0,9–1,3; Fe₂O₃ – 0,2–1,0; органические вещества 12,0–15,0. Используемый дефекат представлял собой мелкодисперсный порошок светло-коричневого цвета с удельной поверхностью 400–600 м²/г).

Для проведения исследований были выбраны следующие варианты ремонтных композиций (таблица 5).

Таблица 5 – Варианты ремонтных композиций

Компонент	Номер варианта композиции								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Связующее, мас. %	6	10	14	–	–	–	3	5	7
Битум, мас. %	–	–	–	6	10	14	3	5	7
Отсев щебня, мас. %	74	70	66	74	70	66	74	70	66
Песок, мас. %	10	12	14	10	12	14	10	12	14
Минеральный наполнитель, мас. %	10	8	6	10	8	6	10	8	6

Подготовка и проведение испытаний проводилась в следующей последовательности (рисунок 2):

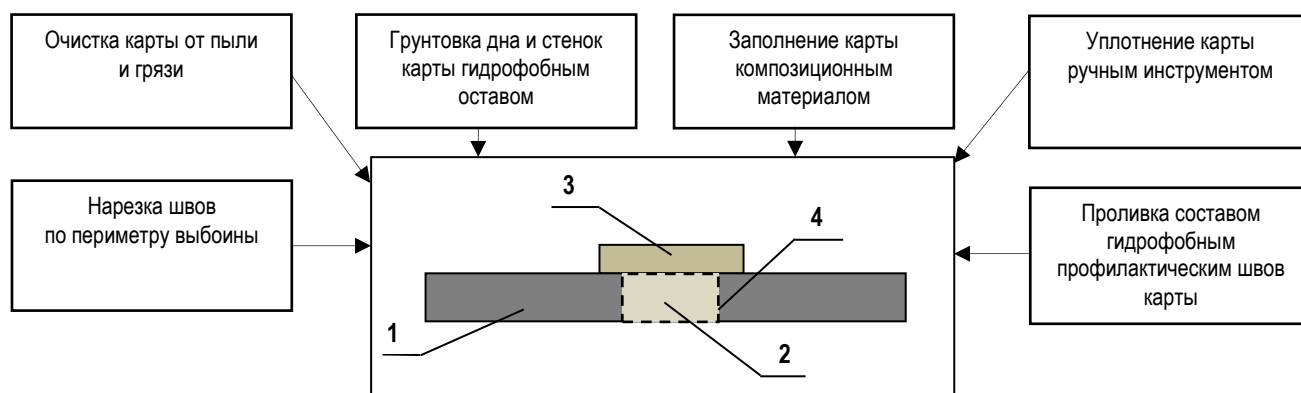
- очистка дефекта от пыли и грязи;
- нарезка швов по периметру выбоины;

– проверка каждого варианта композиции осуществлялась с подгрунтовкой и без нее (подгрунтовка осуществлялась составом гидрофобным профилактическим [18], показавшим положительное влияние на физико-механические характеристики асфальтобетона, что рассмотрено в работах [19, 20], состоящим из вторичных продук-

тов нефтепереработки с ОАО «Мозырский НПЗ», минерального наполнителя, при этом растворителем является керосин ГОСТ 18499-73, одновременно с этим состав дополнительно содержит гидрофобизатор ТУ 2229-008-42942526-00);

– разогрев композиции до +110 °С и перемешивание в лабораторном лопастном смесителе в течение 10 минут;

- заполнение дефекта композицией;
- уплотнение карты ручным инструментом;
- проливка составом гидрофобным профилактическим швов карты.



1 – асфальтобетон; 2 – карта дефекта; 3 – композиции для ямочного ремонта; 4 – битумная эмульсия

Рисунок 2 – Технологический процесс ямочного ремонта разработанной композицией

Для выполнения подгрунтовки был использован состав гидрофобный профилактический согласно [18] следующей рецептуры, мас. %: связующее – 65; растворитель – 13; минеральный наполнитель – 12; гидрофобизатор – 10. Исследования проводились 7 сентября 2024 года при температуре воздуха +25 °С при температуре асфальтобетонного покрытия +34 °С вариантами ремонтных композиций согласно таблице 5. Общий вид ремонтной композиции представлен на рисунке 3.

Контрольный осмотр и периодические наблюдения осенью-зимой 2024 года и зимой-весной 2025 года, которые проводили в начале каждого месяца, показали, что работоспособность рассматриваемых композиций схожа с работоспособностью смеси органоминеральной складированной ремонтной СОМС-10 (СТБ2175-2011), которой рядом для осуществления контроля отремонтировали дефект. Это подтверждается отсутствием трещин и других дефектов в течение 10 месяцев после выполнения ямочного ремонта смесью СОМС-10 и предложенными авторами композициями.

При сравнении работоспособности вариантов разработанных композиций лучше показала себя под влиянием погодноклиматических факторов и транспортных нагрузок композиция № 9 из таблицы 5 ввиду достаточного количества вяжущего, которое способствовало лучшему заполнению дефекта и впоследствии хорошей адгезии к асфальтобетонному покрытию. Ямочный ремонт асфальтобетонного покрытия придворовой территории композицией № 9 из таблицы 5 представлен на рисунке 4.



Рисунок 3 – Общий вид предлагаемой ремонтной композиции для выполнения ямочного ремонта

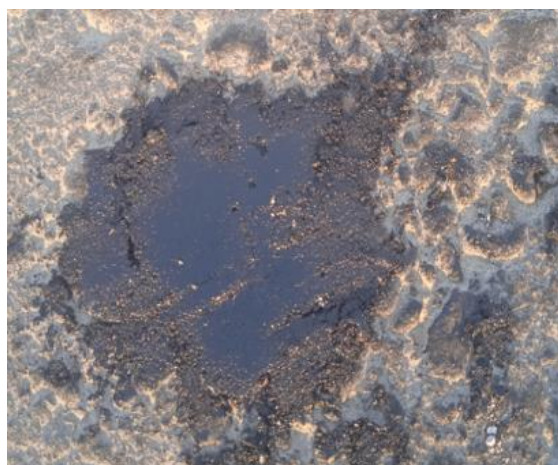


Рисунок 4 – Ямочный ремонт асфальтобетонного покрытия придворовой территории композицией № 9

Стоит отметить, что подгрунтовка основания дефекта асфальтобетонного покрытия разработанным составом гидрофобным профилактическим способствовала лучшей работоспособности ремонтных композиций. Данный процесс может обуславливаться механизмом действия состава гидрофобного профилактического, который хорошо заполняет выемки, трещины и поры асфальтобетонного покрытия, обеспечивая его защиту от чрезмерного водонасыщения, что отражено в работах [19, 20]. При этом наличие в его составе мелкодисперсных частиц дефеката обуславливает лучшее взаимодействие ремонтной композиции и органического вяжущего ремонтируемого асфальтобетонного покрытия. Это может обуславливаться хорошей адгезией битума к основной составляющей дефеката – CaCO_3 , а также увеличения контактируемой суммарной удельной поверхности.

При этом гидрофобизатор состава гидрофобного профилактического метилсиликонат натрия $\text{CH}_3\text{Si}(\text{OH})_2\text{ONa}$ может обеспечивать взаимодействие с химически ненасыщенными атомами кислорода минеральной части асфальтобетона. В результате образуется соединение, которое обеспечивает стойкую ионную связь молекул гидрофобизатора и поверхностью кремнезема [21, с. 127–128].

При этом композиции № 1, № 4 и № 7 показали худшие результаты при наблюдении за работой предложенных композиций, что стало следствием наличия большего количества отсева щебня в данных композициях и в последующем его вымывании из них.

Для выполнения расчета стоимости предложенных вариантов для ямочного ремонта была выбрана композиция № 9 из таблицы 5 как лучшая по критерию работоспособности (таблица 6).

Таблица 6 – Стоимость предлагаемой композиции для ямочного ремонта

Наименование материала	Стоимость материала за тонну, руб.	Потребность материала на 1 м ² при глубине карты 0,1 м, т (композиция № 9 согласно таблицы 5)	Итоговая стоимость материалов на ремонт, руб.
Связующее (вторичные продукты нефтепереработки с ОАО «Мозырский НПЗ»)	0	0,0168	0
Битум БНД 70/100, мас. %	1737,43 [16]	0,0168	29,2
Отсев щебня, мас. %	30,12 [22]	0,158	4,76
Песок, мас. %	17,00	0,0336	0,57
Минеральный наполнитель (дефекат с ОАО «Слуцкий сахарорафинадный завод»), мас. %	0	0,0144	0
Итого	–	0,24	34,53

Анализ таблицы 6 и сравнение ее с таблицей 3 показывает, что стоимость материалов для ямочного ремонта асфальтобетонного покрытия меньше более чем в 3,5 раза. При этом стоит отметить, что предлагаемых композиции устойчивы к разрушению от влияния погодных-климатических факторов, что подтверждается результатами контрольных осмотров.

Вывод

В ходе проведенных практических исследований вариантов композиций для ямочного ремонта асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог установлено, что лучше показала себя под влиянием погодных-климатических факторов и транспортных нагрузок композиция № 9 (содержащая мас. %: связующее (отходы нефтепереработки) – 7; битум БНД 70/100 – 7; отсев щебня – 66; песок – 14; минеральный наполнитель (дефекат) – 6) ввиду достаточного количества вяжущего, которое способствовало лучшему заполнению дефекта и впоследствии хорошей адгезии к асфальтобетонному покрытию.

При этом более высокие показатели адгезии наблюдаются у подгрунтованного составом гидрофобным профилактическим асфальтобетона, что подтверждается наблюдением за работой композиций.

Затраты на реализацию предлагаемой композиции на 1 м² меньше более чем в 3,5 раза по сравнению с используемой технологией ямочного ремонта в Республике Беларусь.

Список цитированных источников

- Полякова, С. В. Выбор основных технологий ямочного ремонта выбоин в асфальтобетонных покрытиях при неблагоприятных условиях / С. В. Полякова // Дороги и мосты. – 2021. – Вып. 46-2. – С. 77–94.
- Influence of pavement material and structure on low-temperature crack resistance for double-layer asphalt surface one-time paving / B. Wu, Z. Han, Y. Mao [et al.] // Materials 18. – 2025. – № 5. – DOI: 10.3390/ma18051037.
- Surface modified slag fiber reinforced asphalt mixture: enhancement of pavement performance and field validation / F. Mingen, C. Qingbing, W. Weijian [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2025. – № 22. – DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e040505.

- Отечественный и зарубежный опыт. Материалы и технологии для ремонта выбоин дорожного асфальтобетонного покрытия: информационный сборник / С. В. Полякова, А. В. Чванов, А. С. Козин, Ю. В. Тактарова; М-во трансп. Рос. Федерации, Рос. Дорожный науч.-исследовательский ин-т. – Казань: Бук, 2020. – 134 с.
- Полякова, С. В. Патчи – материалы нового поколения для долговременного ремонта покрытий / С. В. Полякова, А. С. Козин // Мир дорог. – 2020. – № 132. – С. 47–52.
- Полякова, С. В. Современные способы заделки выбоин при ремонте асфальтобетонных покрытий / С. В. Полякова, А. С. Козин // Дороги и мосты. – 2021. – Вып. 45-1. – С. 81–100.
- Ястремский, Д. А. Проблема повышения долговечности асфальтобетонного покрытия и пути ее решения / Д. А. Ястремский, Т. Н. Абайдуллина, П. В. Чепур // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 3-2. – С. 307–310.
- Ярмолинский, В. А. Оптимизация выбора метода ремонта асфальтобетонных покрытий / В. А. Ярмолинский, Ю. Н. Лебедева, В. С. Белокоп // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2020. – № 4 (94). – С. 10–12.
- Ярмолинский, В. А. Применение холодных асфальтобетонных смесей при ямочном ремонте дорожных покрытий / В. А. Ярмолинский, А. А. Парфенов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2022. – № 2. – С. 101–107.
- Братчун, В. И. Литые асфальтобетоны повышенной долговечности, скоростной ямочный ремонт дорожных покрытий / В. И. Братчун, О. А. Пшеничных, В. В. Ремнев // Технологии бетонов. – 2024. – № 5. – С. 41–46.
- Патент RU 2804046, МПК C04B 26/26 (2006.01). Холодная складываемая органоминеральная смесь для капитального и ямочного ремонта асфальтобетонного дорожного покрытия с высоким содержанием переработанного асфальтобетона: заявлено 10.02.2023; опуб. 26.09.2023 / Виноградова С. Ю., Горелышева Л. А., Гужов С. А.; заявитель ООО «Рик Кемикл». – 5 с.
- Аминов, Ш. Х. Применение холодных асфальтобетонных смесей для круглогодичного ямочного ремонта автодорог / Ш. Х. Аминов, И. Б. Струговец // Строительные материалы. – 2006. – № 11. – С. 60–62.

13. Александров, Д. Ю. Содержание дорожных одежд : учеб.-метод. пособие для дипломного проектирования и выполнения расчетно-графических работ по дисциплине «Содержание и ремонт транспортных сооружений» / Д. Ю. Александров ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2017. – 35 с.
14. Ямочный ремонт асфальтобетонных покрытий улиц и проездов населенных пунктов локальными картами с применением асфальтобетонных горячих литых смесей : ТК 190638734-250-2019 : Технологическая карта. – Минск : Белдорцентр, 2024. – 27 с.
15. Коммунальное проектно-ремонтно-строительное унитарное предприятие «Гомельоблдорстрой» : [офиц. сайт]. – URL: <http://snk.by> (дата обращения: 23.05.2025).
16. ОАО «Мозырский НПЗ» : [офиц. сайт]. – URL: <http://mnpz.by> (дата обращения: 23.05.2025).
17. Бочкарев, Д. И. Использование метода ИК-спектроскопии для идентификации отходов нефтехимического производства / Д. И. Бочкарев, В. В. Петрусевич, А. М. Валенков // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 2. – С. 84–89.
18. Патент ВУ 24097, МПК E01C 11/24 (2006.01). Гидрофобный состав для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог : № а 20180114 : заявлено 23.03.2018 : опубл. 30.10.2023 / Бочкарев Д. И., Петрусевич В. В. ; заявители Бочкарев Д. И., Петрусевич В. В. – 5 с.
19. Петрусевич, В. В. Исследование влияния состава гидрофобного профилактического «ПРОТЕКТ-01» на физико-механические свойства материалов асфальтобетонных покрытий / В. В. Петрусевич // Наука и техника. – 2023. – № 4. – С. 294–300.
20. Бочкарев, Д. И. Моделирование технологического процесса профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / Д. И. Бочкарев, В. В. Петрусевич // Вестник БрГТУ. – 2024. – № 1. – С. 48–52.
21. Ковалев, Я. Н. Активационные технологии дорожных композиционных материалов : научно-практические основы : монография / Я. Н. Ковалев. – Минск : Бел. энцикл., 2002. – 334 с.
22. РУПП «Гранит» : [офиц. сайт]. – URL: <http://granit.by> (дата обращения: 23.05.2025).
8. YArmolinskij, V. A. Optimizaciya vybora metoda remonta asfal'tobetonnyh pokrytij / V. A. YArmolinskij, YU. N. Lebedeva, V. S. Belokon' // Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli. – 2020. – № 4 (94). – С. 10–12.
9. YArmolinskij, V. A. Primenenie holodnyh asfal'tobetonnyh smesej pri yamochnom remonte dorozhnyh pokrytij / V. A. YArmolinskij, A. A. Parfenov // Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI). – 2022. – № 2. – С. 101–107.
10. Bratchun, V. I. Litye asfal'tobetonny povyshennoj dolgovechnosti, skorostnoj yamochnyj remont dorozhnyh pokrytij / V. I. Bratchun, O. A. Pshenichnyh, V. V. Remnev // Tekhnologii betonov. – 2024. – № 5. – С. 41–46.
11. Patent RU 2804046, МПК S04V 26/26 (2006.01). Holodnaya skladiruemaya organomineral'naya smes' dlya kapital'nogo i yamochnogo remonta asfal'tobetonno dorozhnogo pokrytiya s vysokim sodержaniem pererabotannogo asfal'tobetona : zayavleno 10.02.2023 : opub. 26.09.2023 / Vinogradova S. YU., Gorelysheva L. A., Guzhov S. A. ; zayavitel' OOO «Rik Kemikl». – 5 s.
12. Aminov, SH. H. Primenenie holodnyh asfal'tobetonnyh smesej dlya kruglogodichnogo yamochnogo remonta avtodorog / SH. H. Aminov, I. B. Strugovec // Stroitel'nye materialy. – 2006. – № 11. – С. 60–62.
13. Aleksandrov, D. YU. Soderzhanie dorozhnyh odezhd : ucheb.-metod. posobie dlya diplomnogo proektirovaniya i vypolneniya raschetno-graficheskikh rabot po discipline «Soderzhanie i remont transportnyh sooruzhenij» / D. YU. Aleksandrov ; M-vo transp. i kommunikacij Resp. Belarus', Belarus. gos. un-t transp. – Gorn' : BelGUT, 2017. – 35 s.
14. YAmochnyj remont asfal'tobetonnyh pokrytij ulic i proezdov naselennyh punktov lokal'nymi kartami s primeneniem asfal'tobetonnyh goryachih lityh smesej : TK 190638734-250-2019 : Tekhnologicheskaya karta. – Minsk : Beldorcentr, 2024. – 27 s.
15. Kommunal'noe proektno-remontno-stroitel'noe unitarnoe predpriyatie «Gomel'obldorstroy» : [ofic. sajtl]. – URL: <http://snk.by> (data obrashcheniya: 23.05.2025).
16. ОАО «Мозырский НПЗ» : [офиц. сайт]. – URL: <http://mnpz.by> (дата обращения: 23.05.2025).
17. Bochkarev, D. I. Ispol'zovanie metoda IK-spektroskopii dlya identifikacii othodov neftekhimicheskogo proizvodstva / D. I. Bochkarev, V. V. Petrusевич, A. M. Valenkov // Gornaya mekhanika i mashinostroenie. – 2017. – № 2. – С. 84–89.
18. Patent BY 24097, МПК E01S 11/24 (2006.01). Gidrofobnyj sostav dlya profilakticheskoy obrabotki asfal'tobetonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog : № а 20180114 : zayavleno 23.03.2018 : opubl. 30.10.2023 / Bochkarev D. I., Petrusевич V. V. ; zayaviteli Bochkarev D. I., Petrusевич V. V. – 5 s.
19. Petrusевич, V. V. Issledovanie vliyaniya sostava gidrofobnogo profilakticheskogo «PROTEKT-01» na fiziko-mekhanicheskie svoystva materialov asfal'tobetonnyh pokrytij / V. V. Petrusевич // Nauka i tekhnika. – 2023. – № 4. – С. 294–300.
20. Bochkarev, D. I. Modelirovanie tekhnologicheskogo processa profilakticheskoy obrabotki asfal'tobetonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog / D. I. Bochkarev, V. V. Petrusевич // Vestnik BrGTU. – 2024. – № 1. – С. 48–52.
21. Kovalev, YA. N. Aktivacionnye tekhnologii dorozhnyh kompozicionnyh materialov : nauchno-prakticheskie osnovy : monografiya / YA. N. Kovalev. – Minsk : Bel. encykl., 2002. – 334 s.
22. РУПП «Гранит» : [офиц. сайт]. – URL: <http://granit.by> (дата обращения: 23.05.2025).

References

1. Polyakova, S. V. Vybora osnovnyh tekhnologij yamochnogo remonta vyboin v asfal'tobetonnyh pokrytiyah pri neblagopriyatnyh usloviyah / S. V. Polyakova // Dorogi i mosty. – 2021. – Vyp. 46-2. – С. 77–94.
2. Influence of pavement material and structure on low-temperature crack resistance for double-layer asphalt surface one-time paving / B. Wu, Z. Han, Y. Mao [et al.] // Materials 18. – 2025. – № 5. – DOI: 10.3390/ma18051037.
3. Surface modified slag fiber reinforced asphalt mixture: enhancement of pavement performance and field validation / F. Mingen, C. Qingbing, W. Weijian [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2025. – № 22. – DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e040505.
4. Otechestvennyj i zarubezhnyj opyt. Materialy i tekhnologii dlya remonta vyboin dorozhnogo asfal'tobetonno pokrytiya: informacionnyj sbornik / S. V. Polyakova, A. V. CHvanov, A. S. Kozin, YU. V. Taktarova ; M-vo transp. Ros. Federacii, Ros. Dorozhnyj nauch.-issledovatel'skij in-t. – Kazan' : Buk, 2020. – 134 s.
5. Polyakova, S. V. Patchi – materialy novogo pokoleniya dlya dolgovremennogo remonta pokrytij / S. V. Polyakova, A. S. Kozin // Mir dorog. – 2020. – № 132. – С. 47–52.
6. Polyakova, S. V. Sovremennye sposoby zadelki vyboin pri remonte asfal'tobetonnyh pokrytij / S. V. Polyakova, A. S. Kozin // Dorogi i mosty. – 2021. – Vyp. 45-1. – С. 81–100.
7. YAstremskij, D. A. Problema povysheniya dolgovechnosti asfal'tobetonno pokrytiya i puti ee resheniya / D. A. YAstremskij, T. N. Abajdullina, P. V. CHepur // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. – 2016. – № 3-2. – С. 307–310.

Материал поступил 17.06.2025, одобрен 22.07.2025, принят к публикации 22.07.2025

КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ СЕРНОГО КЕКА

Т. В. Булай¹, М. И. Кузьменков², Н. М. Шалухо³

¹ Старший преподаватель кафедры архитектуры и строительства, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: TRoman@grsu.by

² Д. т. н., профессор кафедры технологии стекла, керамики и вяжущих материалов, УО «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь, e-mail: kuzmenkov.bgtu@mail.ru

³ К. т. н., доцент кафедры технологии стекла, керамики и вяжущих материалов, УО «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь, e-mail: natashalukho@mail.ru

Реферат

В материале статьи отражены результаты исследования композиционного материала на основе серного кека. Показана возможность эффективного применения серосодержащих отходов, образующихся на предприятиях химической отрасли Республики Беларусь. Целью исследования являлось получение серного бетона, изготовленного с использованием в качестве вяжущего компонента серного кека, образующегося при производстве серной кислоты на стадии фильтрации расплавленной серы на предприятии ОАО «Гродно Азот», в качестве заполнителей – традиционных материалов, используемых для приготовления цементных бетонов: песка, отходов камнеобработки, образующихся в процессе добычи и обработки гранитного щебня на РУПП «Гранит» (г. Микашевичи, Брестская обл.). При производстве серного бетона применение серного кека позволяет исключить применение портландцемента и воды, необходимых при приготовлении цементных строительных растворов.

В результате проведенных исследований установлено, что предел прочности при сжатии серного бетона на серном кеке в первые сутки испытаний показал значения, равные показателям предела прочности при сжатии мелкозернистых бетонов на портландцементном вяжущем в возрасте 28 суток. Показатели водопоглощения и химической стойкости образцов серного бетона превосходят значения для цементных бетонов. Экспериментальным путем установлены следующие оптимальные показатели серного бетона на серном кеке: предел прочности при сжатии – 51,1 МПа (серный кек – 70 мас. %, гранитные отсеvy – 30 мас. % с максимальной крупностью зерен 0,16 мм), водопоглощение – от 0,14 до 0,42 %, химическая стойкость (выражена через потери массы материала) – от 0,27 до 1,5 %.

Авторами статьи кратко изложены этапы приготовления серного бетона. Отмечены наиболее рациональные области применения композиционного материала на основе серосодержащих отходов.

Ключевые слова: серный кек, сера, серный бетон, отход, прочность, водопоглощение, химическая стойкость, наполнитель, гранитный отсев, кварцевый песок.

COMPOSITIONAL MATERIAL BASED ON A SULFUR CAKE

T. V. Bulai, M. I. Kuzmenkov, N. M. Shalukho

Abstract

The material of the article reflects the results of a study of compositional material based on a sulfur cake. The possibility of the effective use of sulfur containing waste formed at the enterprises of the chemical industry of the Republic of Belarus is shown. The aim of the study was to obtain sulfur concrete made using a sulfuric cake formed as an astringent component of sulfuric acid at the stage of filtering molten sulfur at the JSC "Grodno Azot", traditional materials used for the preparation of cement concrete: sand, waste of stone processing forming during pre and processing granite crushed stone on enterprise «Granite» (Mikashевичи, Brest region). In the production of sulfur concrete, the use of sulfuric cake allows us to exclude the use of Portland cement and water necessary in the preparation of cement construction solutions.

As a result of the studies it was found that the compressive strength of sulfur concrete on a sulfur cake in the first day of tests showed values equal to indicators of the compressive strength during the compression of fine grained concrete on Portland cement binder at the age of 28 days. Indicators of water absorption and chemical resistance of samples of sulfur concrete exceed the values for cement concrete. The following optimal indicators of sulfuric concrete on the sulfuric cake are established experimentally: compression strength – 51.1 MPa (sulfuric mash – 70 wt. %, granite shifts – 30 wt. % with a maximum size of grains of 0.16 mm), water absorption – from 0.14 to 0.42 %, chemical resistance (expressed through loss of mass of material) – from 0.27 to 1.5 %.

The authors of the article briefly set out the stages of preparation of sulfur concrete. The most rational areas of the application of compositional material based on sulfur containing waste were noted.

Keywords: sulfuric cake, sulfur, sulfur concrete, waste, strength, water absorption, chemical resistance, filler, granite scream, quartz sand.

Введение

Проблема переработки и утилизации отходов на предприятиях строительной индустрии Республики Беларусь на сегодняшний день является одной из самых актуальных. В связи с бурным развитием строительной отрасли возрастает количество отходов, которые не только отрицательно влияют на окружающую среду, но и увеличивают затраты на их хранение, транспортирование и утилизацию.

В настоящее время в Республике Беларусь на предприятиях химической отрасли ОАО «Гродно Азот», ОАО «Гомельский химический завод», ОАО «Нафтан» образуется серосодержащий отход – серный кек, относящийся к IV классу опасности, запрещенный к захоронению и способный самовозгораться [1–3]. На сегодняшний

день данный отход не утилизируется и тем самым отрицательно влияет на состояние окружающей среды.

Возможность использования промышленных отходов, в частности серного кека, является одним из путей решения задач, возникающих при организации производства современных строительных материалов. Производство новых строительных материалов на основе отходов должно способствовать решению следующих проблем: улучшение экологической обстановки за счет их утилизации, удовлетворение потребности регионов в эффективных строительных материалах, снижение себестоимости материалов и изделий, снижение затрат в период эксплуатации за счет повышения качества и долговечности материалов.

Одним из перспективных направлений утилизации серного кека является получение композиционного материала – серного бетона на основе данного отхода, который служит вяжущим компонентом. При различных сочетаниях серного кека, заполнителей и наполнителей можно получить композиции нового строительного материала – серного бетона, по свойствам не уступающего, а часто и превосходящего традиционные материалы на цементном вяжущем [4].

В ряде работ, выполненных в Гродненском государственном университете имени Янки Купалы и Белорусском государственном технологическом университете, приведены результаты испытаний свойств серного бетона, изготовленного с использованием природной серы, различных заполнителей и наполнителей. Природная сера являлась продуктом помола комовой серы с регламентированным содержанием примесей железа, марганца и меди и выступала в качестве вяжущего вещества [5]. Серный бетон по результатам прочностных испытаний в возрасте 1 суток обладал прочностью близкой к прочности мелкозернистого бетона в возрасте 28 суток, а также удовлетворял требованиям по плотности, химической стойкости и водопоглощению [6–15].

Методы исследования

Целью данной публикации является получение серного бетона на основе серосодержащего отхода и определение его физико-механических свойств. Исследования материала проводились в лабораторных условиях. Объектом исследования являлись образцы серного бетона кубической формы размером 20 х 20 х 20 мм, изготовленные с использованием серного кека – отхода, образующегося при производстве серной кислоты на ОАО «Гродно Азот». Химический состав серного кека, мас. %: S – 87,2 %; K – 0,2 %; Ca – 1,1 %; Mn – 0,1 %; Fe – 9,5 %; Cl – 1,5 %; Ti – 0,1 %; V – 0,2 %, 0,1 % – остальные примеси. В качестве заполнителей использовали строительный песок, гранитные отсеvy различного фракционного состава, которые применяются для изготовления цементных бетонов [16, 17].

Технологический процесс изготовления опытных образцов серного бетона включал в себя проведение последовательных операций. Главной отличительной особенностью технологии производства серного бетона является приготовление исходной шихты, состоящей

из серного кека, заполнителей и наполнителей, тщательно перемешанных и нагретых до температуры 120–150 °С. Расплавление серы, входящей в состав серного кека, привело к образованию однородной и легкоподвижной серобетонной смеси, которой заполнялись предварительно подогретые металлические формы, смазанные тонким слоем смазки, и находящиеся на вибростоле. В результате вибрации происходило уплотнение серобетонной смеси. После окончания формовки смесь схватывалась в течение нескольких минут за счет кристаллизации расплавленной серы, входящей в состав серного кека. После остывания до комнатной температуры образцы извлекались из форм и подвергались испытаниям физико-механических и химических свойств [6, 7]. Таким образом, бетон набирает практически максимальную прочность сразу после окончания процесса формовки.

Результаты испытания и анализ

Образцы для проведения испытаний изготавливались из одной пробы серобетонной смеси и уплотнялись в одинаковых условиях. С целью подбора оптимального состава серного бетона на серном кеке соотношение между вяжущим и заполнителями варьировалось в широких пределах. Для проведения эксперимента по определению прочностных свойств серного бетона использовались измельченный серный кек, заполнитель полифракционного состава в виде песка и гранитных отсеv с наибольшей крупностью зерен 5, 2,5, 1,25, 0,63, 0,315, 0,16 мм и менее для каждого исследуемого состава [18]. Необходимую фракцию песка получали путем просеивания через сито с диаметром отверстий, соответствующим максимальному размеру фракций заполнителя.

Перед испытанием образцы-кубики подвергались визуальному осмотру, устанавливалось наличие трещин, сколов, раковин. Нагружение образцов проводили непрерывно с постоянной скоростью нарастания нагрузки до его разрушения. Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания, принимали за разрушающую нагрузку. Разрушение образцов проводили в лабораторных условиях с помощью испытательной машины Galdabini Quasar 50. Результаты испытаний приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Влияние фракционного состава песка на прочность серного бетона на серном кеке

№ состава	Размер фракций, мм	Соотношение компонентов, мас. %		Предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа
		серный кек	песок	
1	5,0	70	30	39,6
2	2,5	60	40	46,8
3	1,25	50	50	31,7
4	0,63	60	40	41,4
5	0,315	60	40	43,6
6	0,16 и менее	50	50	49,0

Таблица 2 – Влияние фракционного состава гранитных отсеv на прочность серного бетона на серном кеке

№ состава	Размер фракций, мм	Соотношение компонентов, мас. %		Предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа
		серный кек	гранитные отсеvy	
1	5,0	70	30	23,5
2	2,5	70	30	26,2
3	1,25	70	30	30,7
4	0,63	70	30	39,1
5	0,315	60	40	45,8
6	0,16 и менее	70	30	51,1

Проведенный эксперимент позволил установить оптимальные соотношения компонентов, входящих в состав серобетонной смеси с различной крупностью зерен заполнителя, приводящие к достижению максимального значения предела прочности при сжатии исследуемого материала. Анализ данных таблиц 1 и 2 показал, образцы серного бетона при использовании пылеватых фракций заполнителя – 0,16 мм и менее, содержащие 50 мас. % серного кека и 50 мас. % песка и 70 мас. % серного кека и 30 мас. % гранитных отсеv, показали максимальные

значения предела прочности при сжатии и составили 49,0 и 51,1 МПа соответственно.

Проведя анализ результатов эксперимента (таблицы 1, 2) установлено, что увеличение размера зерен заполнителей и использование гранитных отсеv ведет к снижению прочности серного бетона: для размера частиц 5 мм – на 68 %, 2,5 мм – на 44 %, 1,25 мм – на 3 %, 0,63 мм – на 5 %. С уменьшением размера зерен заполнителя прочность серного бетона возрастает: 0,315 мм – на 5 %, 0,16 мм – на 4 % (рисунок 1).

В целом более высокие значения предела прочности при сжатии образцов серного бетона на серном кеке, изготовленных с использованием песка, обусловлены тем, что последний обладает большей реакционной способностью по сравнению с гранитным отсеком и вступает в реакцию с серным кеком. Необходимо отметить, что дисперсный состав заполнителей играет важную роль в приготовлении серобетонной смеси и ее удобоукладываемости. Использование пылеватых фракций заполнителей с максимальной крупностью зерен 0,16 мм и менее обеспечило хорошую удобоукладываемость смеси, равномерное распределение зерен заполнителя в объеме серобетонной смеси, образование однородной

массы и, как следствие, более высокие значения предела прочности при сжатии: 49,0 МПа – предел прочности при сжатии для образцов, изготовленных с песком, 51,1 МПа – для образцов, изготовленных с гранитными отсеками. С уменьшением размера зерен заполнителя прирост прочности для образцов серного бетона с песком составил 24 %, с гранитными отсеками – 117 %.

Водопоглощение серного бетона на серном кеке определялось в возрасте 7, 14, 30, 120 и 360 суток для составов, которые показали наилучшие результаты предела прочности при сжатии (таблицы 1, 2) [19]. Результаты исследования представлены на рисунке 2.

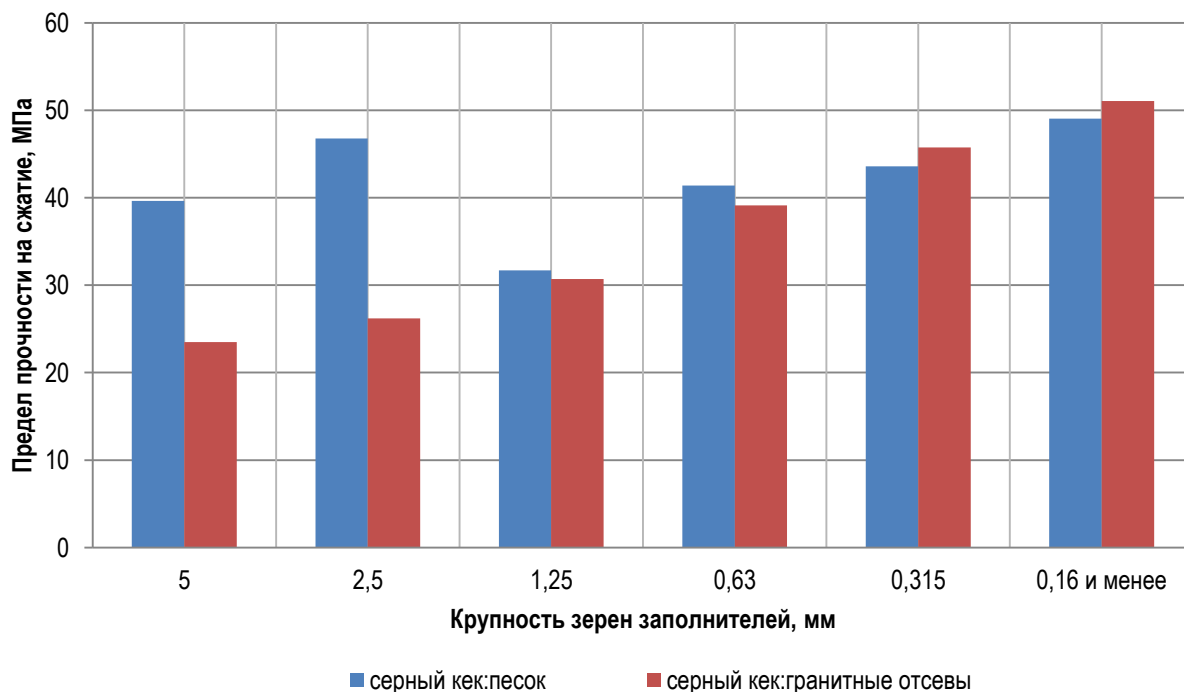


Рисунок 1 – Зависимость предела прочности при сжатии серного бетона с кеком от вида и крупности заполнителя

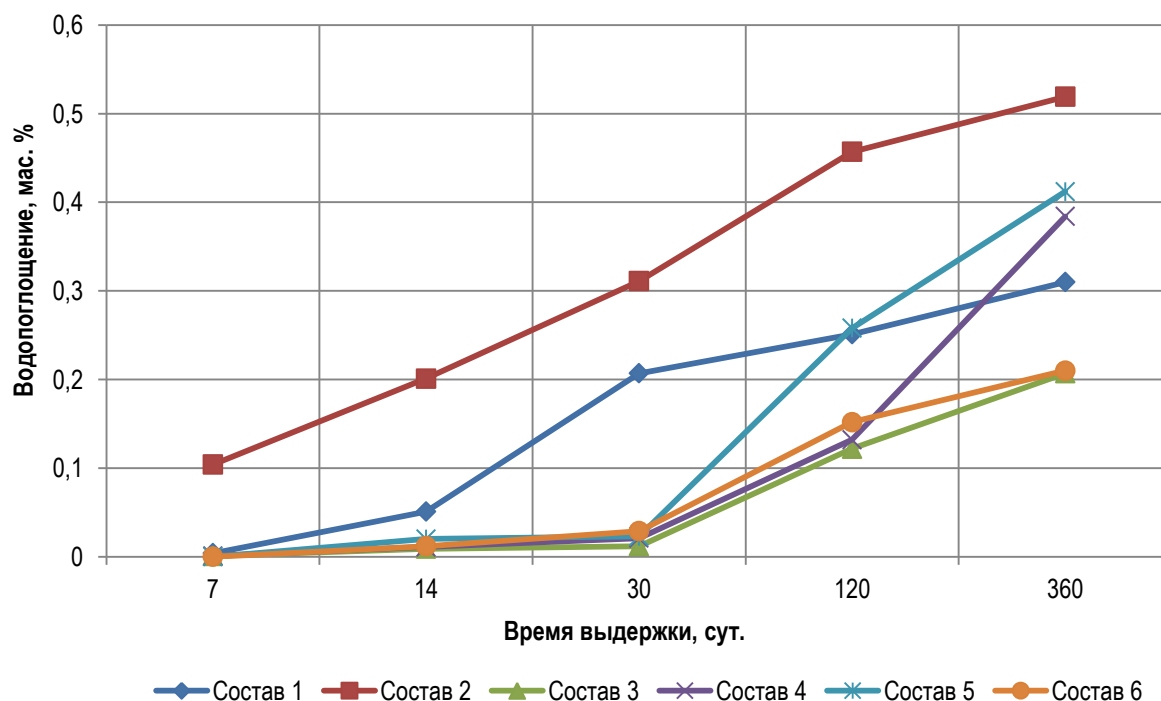


Рисунок 2 – Зависимость водопоглощения серного бетона от содержания серного кека и песка

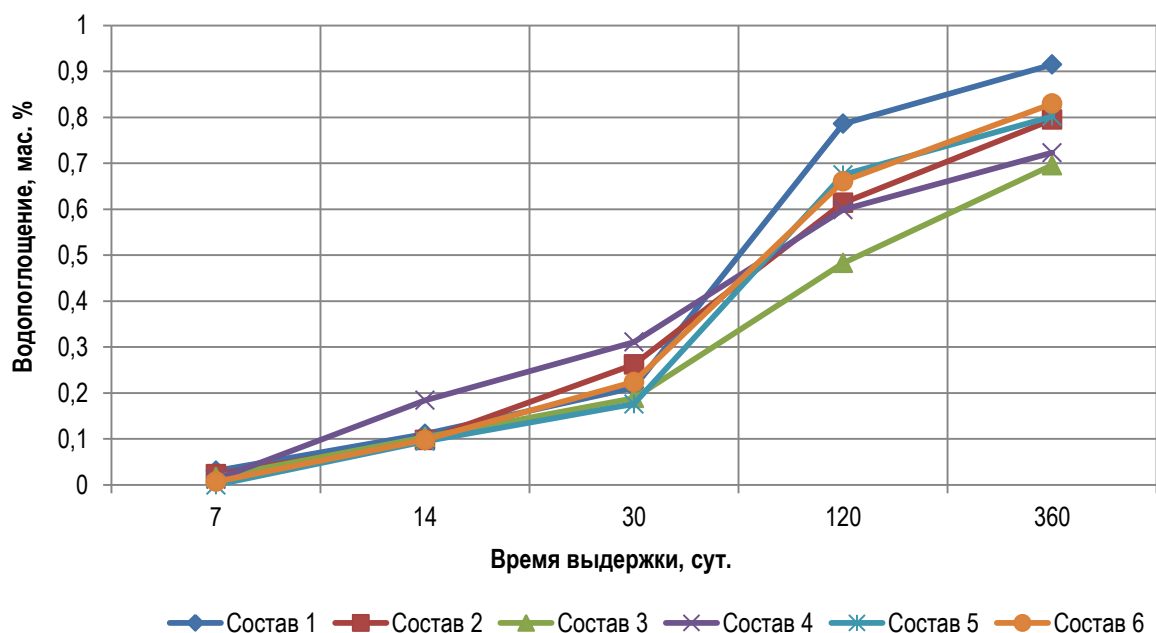


Рисунок 3 – Зависимость водопоглощения серного бетона от содержания серного кека и гранитных отсеков

Как видно из представленных данных на рисунках 2 и 3, все образцы серного бетона показали удовлетворительные значения по водопоглощению. Одновременно с серным бетоном в воду был погружен контрольный образец размером 40 x 40 x 160 мм, приготовленный из цементно-песчаного раствора в пропорции компонентов 1:3. Показатель водопоглощения для последнего образца в возрасте 14 сут. составил 1,82 %. Набор массы образцов, содержащих от 10 до 35 мас. % серного кека, в возрасте 7 сут. составляет от 0,12 до 0,29 %, 14 сут. – от 0,13 до 0,36 %, 30 сут. – от 0,14 до 0,42 %. Следует обратить внимание, что водопоглощение каждого образца в возрасте 360 дней не превышает 1 %.

Низкие значения водопоглощения серного бетона обусловлены тем, что сера при нагревании, переходя из твердого в вязко-текучее состояние, обеспечивает плотное расположение молекул относительно друг друга. При застывании полученной однородной смеси происходит кристаллизация расплавленной серы на поверхности заполнителя, молекулы серы заполняют все внутреннее простран-

ство вещества и обеспечивают практически полное отсутствие пористости в материале.

Серный бетон может использоваться в качестве материала, способного противостоять не только к проникновению воды, но и к агрессивному действию солей, кислот и щелочей.

Для определения химической стойкости серного бетона в качестве агрессивных сред использовали 1 %-ный едкий натр (NaOH); 30 %-ную серную кислоту (H_2SO_4); 5 %-ную уксусную (CH_3COOH) и 60 %-ную молочную кислоту ($CH_3CHCOOH$). Для определения химической стойкости потери массы исследуемых образцов определялись в возрасте 7, 14 и 30 суток [20]. Представило интерес определить химическую стойкость образцов серного бетона на серном кеке в более длительные сроки. Так, время выдержки образцов в агрессивных средах составило 7, 14, 30, 120 и 360 суток. В качестве испытуемых образцов использовались образцы составов, которые показали наилучшие результаты предела прочности при сжатии (таблицы 1, 2). Результаты испытаний приведены на рисунках 4, 5.

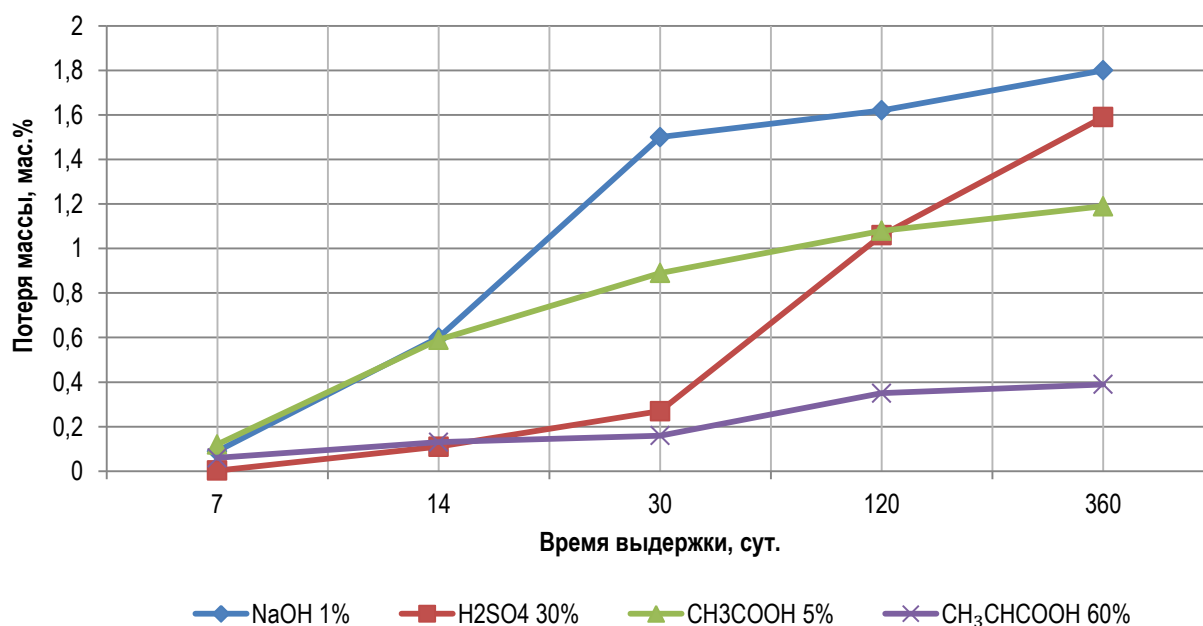


Рисунок 4 – Зависимость химической стойкости серного бетона на серном кеке с песком от вида агрессивной среды

Анализируя данные рисунка 4, можно сделать вывод, что образцы серного бетона на серном кеке с использованием песка в качестве наполнителя показали удовлетворительные значения по химической стойкости во всех исследуемых агрессивных средах. Потери массы

образцов в возрасте 7 сут. составили до 0,12 %, до 0,59 % – в возрасте 14 суток, до 1,5 % – в возрасте 30 суток. В возрасте 360 суток потери массы образцов составили от 0,39 % – при испытании в 60 %-ной CH_3CHCOOH и до 1,80 % – при испытании в 1 %-ном NaOH .

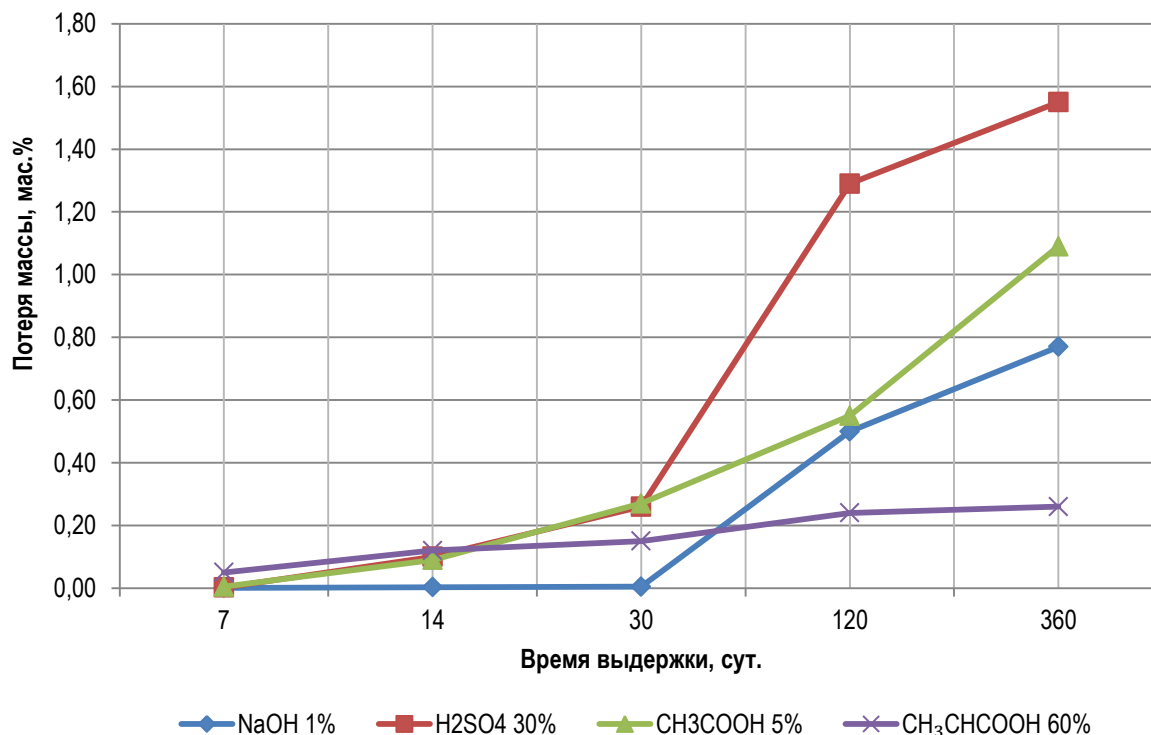


Рисунок 5 – Зависимость химической стойкости серного бетона на серном кеке с гранитными отсевами от вида агрессивной среды

Как видно из рисунка 5, образцы серного бетона на серном кеке с использованием гранитных отсевов в качестве наполнителя также показали удовлетворительные значения по химической стойкости во всех агрессивных средах. Потери массы образцов в возрасте 7 сут. составили до 0,01 %, до 0,12 % – в возрасте 14 суток, до 0,27 % – в возрасте 30 суток. В возрасте 360 суток потери массы образцов составили от 0,26 % – при испытании в 60 %-ной CH_3CHCOOH и до 1,55 % – при испытании в 30 %-ной H_2SO_4 .

Результаты эксперимента показывают, что наименьшие потери массы характерны для образцов, содержащих в своем составе гранитные отсевы, что свидетельствует об их слабой реакционной способности при воздействии агрессивных веществ. Присутствие в составе серного бетона песка несколько ухудшает стойкость исследуемого материала к действию агрессивных сред вследствие его повышенной реакционной способности. Необходимо отметить, что все образцы серного бетона характеризовались потерями массы в возрасте 30 суток менее 1 %, что свидетельствует об их химической стойкости к действию агрессивных сред.

Заключение

На основании полученных значений пределов прочности при сжатии образцов серного бетона на серном кеке можно сделать вывод, что фракционный состав, дисперсность и количество наполнителя оказывают значительное влияние на прочностные свойства серного бетона. Среднее значение показателя предела прочности при сжатии серного бетона с гранитными отсевами показали меньшие значения по сравнению с образцами серного бетона, изготовленными с использованием в качестве заполнителя песка, и составили соответственно 36,1 и 42 МПа (рисунок 1). Использование пылевидных фракций заполнителя приводит к достижению максимальных значений предела прочности при сжатии исследуемых образцов: 49 и 51,1 МПа для составов серный кек:песок и серный кек:гранитные отсевы соответственно.

Необходимо отметить, что серный бетон обладает уникальным свойством быстрого набора прочности и способен достигать высоких

прочностных показателей даже на мелких и пылеватых фракциях заполнителя через сутки после формирования, что для традиционных бетонов на портландцементном вяжущем невозможно.

Анализируя полученные данные по водопоглощению и химической стойкости серного бетона к действию агрессивных сред, можно сделать вывод, что серный бетон отвечает высоким требованиям по прочности, коррозионной стойкости и водопоглощению. С этой точки зрения можно выделить наиболее рациональные области применения исследуемого материала: технологическое оборудование на предприятиях химической отрасли (сгустители на калийных комбинатах), монолитный серный бетон, элементы для обустройства городских дорог (бортовой камень, тротуарная плитка, дорожные плиты, основания и покрытия дорог и др.), коррозионностойкие элементы промышленных и сельскохозяйственных зданий (плиты пола, кирпич, футеровочные блоки, сливные лотки, коллекторные кольца, емкости для агрессивных растворов), трубы (канализационные, дренажные), элементы нулевого цикла (фундаментные блоки, балки, сваи), силосные траншеи; стеновые материалы (кирпич, блоки, плитки, утеплитель), кровельные материалы (черепица, теплоизоляционные плиты, легкие навесы), монолитный серный бетон, декоративно-отделочные материалы (отделочные плиты, художественное литье, малые архитектурные формы), конструкции специального назначения (контейнеры для захоронения радиоактивных и химических отходов, экранирующие элементы), замоналичивание анкерных болтов линий электропередач, шпалы, электрические столбы, прочные, непроницаемые подземные резервуары и склады, площадки для выгула скота, составы для выполнения ремонтных и реставрационных работ [21, 22].

Серный бетон также может использоваться в качестве высокоэффективного покрытия, наносимого на внутреннюю поверхность канализационных труб, для защиты от агрессивного воздействия стоков, а также для осуществления быстрого ямочного ремонта дорожных покрытий.

Использование серного кека для изготовления серного бетона дает возможность утилизировать серосодержащий отход, образу-

щийся на предприятиях химической отрасли Республики Беларусь. На сегодняшний день серный кек складывается на полигонах предприятий, не утилизируется и оказывает отрицательное воздействие на состояние окружающей среды. Применение серного кека дает возможность не использовать портландцемент и воду, которые необходимы для приготовления цементных бетонов.

Согласно полученным экспериментальным данным оптимальными составами серного бетона можно считать следующие, мас. %: серный кек – 70, гранитные отсеивы – 30, обладающий следующими свойствами: предел прочности при сжатии – 51,1 МПа, водопоглощение – 0,22, химическая стойкость – до 0,27 % (выражена через потери массы в возрасте 30 суток); серный кек – 50, гранитные отсеивы – 50, обладающий следующими свойствами: предел прочности при сжатии – 49,0 МПа, водопоглощение – 0,03, химическая стойкость – до 1,5 %.

Таким образом, быстрые сроки твердения серного бетона, высокие показатели прочности и коррозионной стойкости, низкие значения водопоглощения дают возможность получить современный композиционный материал, который можно отнести к специальному виду бетонов и успешно применять в различных отраслях промышленности.

Список цитированных источников

- Кузьменков, М. И. Серный бетон из отходов / М. И. Кузьменков // Строительство и архитектура. – 1991. – № 4. – С. 16–18.
- Перспективы получения и применения серобетона на основе кека сернокислотного производства / Т. В. Булай, М. И. Кузьменков, Н. М. Шалухо [и др.] // Химическая технология и техника : тезисы докладов 82-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 1–14 февраля 2018 г. / Белорусский государственный технологический университет. – Минск, 2018. – С. 14.
- Кастрова, В. А. Проблемы сбора и утилизации отходов в Республике Беларусь / В. А. Кастрова // Наука-2019: сб. науч. ст. в 2 ч. – Гродно, 2019. – Ч. 2. – С. 14–17.
- Попова, И. А. Бетоны с повышенными физико-техническими свойствами на основе серосодержащих вторичных отходов : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / И. А. Попова. – М., 2004. – 18 с.
- Сера техническая. Технические условия: ГОСТ 127.1–93. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 8 с.
- Кузьменков, М. И. Получение серного бетона и изучение его свойств / М. И. Кузьменков, Т. В. Булай // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. научных трудов. – Минск : Колорград, 2017. – Вып. 9. – С. 316–324.
- Булай, Т. В. Исследование физико-механических свойств серного бетона / Т. В. Булай, М. И. Кузьменков, Н. М. Шалухо // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : Междунар. научн. конф., посвященная 50-летию Полоцкого гос. ун-та: сб. матер. конф. Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. – Новополоцк, 2018. – С. 218–220.
- Булай, Т. В. Модифицирование серы и получение на ее основе серного бетона / Т. В. Булай, Н. М. Шалухо, М. И. Кузьменков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 26–27 апр. 2018 г. – Могилев, 2018. – С. 272–273.
- Исследование водопоглощения серного бетона / Т. В. Булай, М. И. Кузьменков, Н. М. Шалухо, Д. М. Кузьменков // Химическая технология и техника : материалы докладов 83-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 4–15 февраля 2019 г. – Минск, 2019. – С. 44–45.
- Бобровская, Я. А. Разработка составов композиционных материалов на основе серы и различных наполнителей / Я. А. Бобровская ; науч. рук. Н. М. Шалухо // 70-я науч.-техн. конф. учащихся, студентов и магистрантов: сб. науч. работ : в 4-х ч. – Минск, 2019. – Ч. 2. – С. 373–375.
- Использование гранитных отсеивов в производстве серного бетона / Н. М. Шалухо, Т. В. Булай, М. И. Кузьменков [и др.] // Сотрудничество – катализатор инновационного роста: 5-й Белорусско-Прибалтийский форум : сб. матер., Минск, 9–10 октября 2019 г. – Минск, 2019. – С. 34–35.
- Булай, Т. В. Композиционный материал на основе серы и серосодержащих отходов / Т. В. Булай, М. И. Кузьменков, Н. М. Шалухо // Наука и инновационные технологии. – 2020. – № 16. – С. 37–41.
- Технология получения композиционных серосодержащих материалов / Н. М. Шалухо, Т. В. Булай, Д. М. Кузьменков, Я. А. Бобровская // Химия. Экология. Урбанистика : Всерос. науч.-практич. конф. (с международным участием): сб. матер. конф., Пермь, 23–24 апр. 2020 г. – Пермь, 2020. – Т. 4. – С. 219–222.
- Бобровская, Я. А. Исследование прочностных свойств серосодержащих композиционных материалов / Я. А. Бобровская, Н. М. Шалухо // Молодежь и научно-технический прогресс : сб. докл. : XIII междунар. научно-практич. конф. студ., асп. и молодых ученых : в 2 т. – Губкин, 2020. – Т. 1. – С. 214–217.
- Булай, Т. В. Исследование химической стойкости серосодержащих композиционных материалов / Т. В. Булай, М. И. Кузьменков, Н. М. Шалухо // Материалы с заданными свойствами на переходе к новому технологическому укладу: химические технологии : II науч.-техн. конф. : сб. матер. – М., 2020. – С. 66–67.
- Песок для строительных работ. Методы испытаний: ГОСТ 8736-2014. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2014. – 10 с.
- Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8267-93. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2014. – 11 с.
- Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-2012. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2018. – 36 с.
- Бетоны. Метод определения водопоглощения: ГОСТ 12730.3-2020. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2021. – 7 с.
- Бетоны химически стойкие. Методы испытаний: ГОСТ 58896-2020. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2020. – 11 с.
- Волгушев, А. Н. Применение серы в строительстве / А. Н. Волгушев // Новые химические технологии. Аналитический портал химической промышленности Newchemistry.ru. – URL: http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=4348 (дата обращения: 03.06.2025).
- Волгушев, А. Н. Производство и применение серных бетонов. Обзорная информация / А. Н. Волгушев, Н. Ф. Шестеркина // НИИЖБ. – М., 1991. – С. 3–51.

References

- Kuz'menkov, M. I. Sernyj beton iz othodov / M. I. Kuz'menkov // Stroitel'stvo i arhitektura. – 1991. – № 4. – S. 16–18.
- Perspektivy polucheniya i primeneniya serobetona na osnove keka sernokislotochnogo proizvodstva / T. V. Bulaj, M. I. Kuz'menkov, N. M. Shaluho [i dr.] // Himicheskaya tekhnologiya i tekhnika : tezisy dokladov 82-j nauchno-tekhnicheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnyh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem), Minsk, 1–14 fevralya 2018 g. / Belorusskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet. – Minsk, 2018. – S. 14.
- Kastrova, V. A. Problemy sbora i utilizacii othodov v Respublike Belarus' / V. A. Kastrova // Nauka-2019: sb. nauch. st. v 2 ch. – Grodno, 2019. – Ch. 2. – S. 14–17.
- Popova, I. A. Betony s povyshennymi fiziko-tekhnicheskimi svojstvami na osnove serosoderzhashchih vtorichnyh othodov : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / I. A. Popova. – M., 2004. – 18 s.

5. Sera tekhnicheskaya. Tekhnicheskie usloviya: GOST 127.1–93. – Minsk : Mezhdunarodnyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 1997. – 8 s.
6. Kuz'menkov, M. I. Poluchenie sernogo betona i izuchenie ego svoystv / M. I. Kuz'menkov, T. V. Bulaj // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : sb. nauchnykh trudov. – Minsk : Kolorgrad, 2017. – Vyp. 9. – S. 316–324.
7. Bulaj, T. V. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv sernogo betona / T. V. Bulaj, M. I. Kuz'menkov, N. M. SHaluho // Arhitekturno-stroitel'nyy kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii : Mezhdunar. nauchn. konf., posvyashchennaya 50-letiyu Polockogo gos. un-ta: sb. mater. konf. Novopolock, 5–6 apr. 2018 g. – Novopolock, 2018. – S. 218–220.
8. Bulaj, T. V. Modifizirovanie sery i poluchenie na ee osnove sernogo betona / T. V. Bulaj, N. M. SHaluho, M. I. Kuz'menkov // Materialy, oborudovanie i resursoberegayushchie tekhnologii : materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Mogilev, 26–27 apr. 2018 g. – Mogilev, 2018. – S. 272–273.
9. Issledovanie vodopogloshcheniya sernogo betona / T. V. Bulaj, M. I. Kuz'menkov, N. M. SHaluho, D. M. Kuz'menkov // Himicheskaya tekhnologiya i tekhnika : materialy dokladov 83-j nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem), Minsk, 4–15 fevralya 2019 g. – Minsk, 2019. – S. 44–45.
10. Bobrovskaya, YA. A. Razrabotka sostavov kompozitsionnykh materialov na osnove sery i razlichnykh napolnitelej / YA. A. Bobrovskaya ; nauch. ruk. N. M. SHaluho // 70-ya nauch.-tekhn. konf. uchashchihsya, studentov i magistrantov: sb. nauch. rabot : v 4-h ch. – Minsk, 2019. – CH. 2. – S. 373–375.
11. Ispol'zovanie granitnykh otsevo v proizvodstve sernogo betona / N. M. SHaluho, T. V. Bulaj, M. I. Kuz'menkov [i dr.] // Sotrudnichestvo – katalizator innovatsionnogo rosta: 5-j Belorussko-Pribaltijskij forum : sb. mater., Minsk, 9–10 oktyabrya 2019 g. – Minsk, 2019. – S. 34–35.
12. Bulaj, T. V. Kompozitsionnyy material na osnove sery i serosoderzhashchikh othodov / T. V. Bulaj, M. I. Kuz'menkov, N. M. SHaluho // Nauka i innovatsionnye tekhnologii. – 2020. – № 16. – S. 37–41.
13. Tekhnologiya polucheniya kompozitsionnykh serosoderzhashchikh materialov / N. M. SHaluho, T. V. Bulaj, D. M. Kuz'menkov, YA. A. Bobrovskaya // Himiya. Ekologiya. Urbanistika : Vseros. nauch.-praktich. konf. (s mezhdunarodnym uchastiem): sb. mater. konf., Perm', 23–24 apr. 2020 g. – Perm', 2020. – T. 4. – S. 219–222.
14. Bobrovskaya, YA. A. Issledovanie prochnostnykh svoystv serosoderzhashchikh kompozitsionnykh materialov / YA. A. Bobrovskaya, N. M. SHaluho // Molodezh' i nauchno-tekhnicheskij progress : sb. dokl. : XIII mezhdunarod. nauchno-praktich. konf. stud., asp. i molodykh uchenykh : v 2 t. – Gubkin, 2020. – T. 1. – S. 214–217.
15. Bulaj, T. V. Issledovanie himicheskoy stojkosti seroso-derzhashchikh kompozitsionnykh materialov / T. V. Bulaj, M. I. Kuz'menkov, N. M. SHaluho // Materialy s zadannymi svoystvami na perekhode k novomu tekhnologicheskomu ukladu: himicheskie tekhnologii : II nauch.-tekhn. konf. : sb. mater. – M., 2020. – S. 66–67.
16. Pesok dlya stroitel'nykh rabot. Metody ispytaniy: GOST 8736-2014. – Minsk : Mezhdunarodnyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2014. – 10 s.
17. SHCHeben' i gravij iz plotnykh gornykh porod dlya stroitel'nykh rabot. Tekhnicheskie usloviya: GOST 8267-93. – Minsk : Mezhdunarodnyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2014. – 11 s.
18. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obrazcam: GOST 10180-2012. – Minsk : Mezhdunarodnyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2018. – 36 s.
19. Betony. Metod opredeleniya vodopogloshcheniya: GOST 12730.3-2020. – Minsk : Mezhdunarodnyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2021. – 7 s.
20. Betony himicheskii stojkie. Metody ispytaniy: GOST 58896-2020. – Minsk : Mezhdunarodnyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2020. – 11 s.
21. Volgushev, A. N. Primenenie sery v stroitel'stve / A. N. Volgushev // Novye himicheskie tekhnologii. Analiticheskij portal himicheskoy promyshlennosti Newchemistry.ru. – URL: http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=4348 (data obrashcheniya: 03.06.2025).
22. Volgushev, A. N. Proizvodstvo i primenenie sernykh betonov. Obzornaya informatsiya / A. N. Volgushev, N. F. SHesterkina // NIIZHB. – M., 1991. – S. 3–51.

Материал поступил 14.07.2025, одобрен 16.07.2025, принят к публикации 17.07.2025

УДК 693.22

УСИЛЕНИЕ КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ ВНУТРЕННЕГО АРМИРОВАНИЯ КАМЕННОЙ КЛАДКИ

В. Н. Деркач¹, А. В. Галалиук², С. О. Бурак³

¹ Д. т. н., профессор, директор, филиал «Научно-технический центр» РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», Брест, Беларусь, e-mail: v-derkach@yandex.ru

² К. т. н., начальник управления, филиал «Научно-технический центр» РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», Брест, Беларусь, e-mail: Halaliuk@mail.ru

³ Инженер-конструктор, филиал «Научно-технический центр» РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», Брест, Беларусь, e-mail: ntc@stn.by

Реферат

Приведен анализ методов ремонта и усиления системами внутреннего армирования поврежденной трещинами каменной кладки из кирпича и природного камня. Отмечено, что эффективность внутреннего армирования каменной кладки зависит от значений, действующих в конструкции начальных напряжений. Указано на недостаточную изученность эффективности данного метода для усиления каменных кладок из эффективных стеновых материалов, в частности кладок из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения, в которых часто возникают трещины, вызванные усадочными деформациями кладки, а также прогибами поддерживающих перекрытий. Выполнены экспериментальные исследования эффективности усиления системой внутреннего армирования спиралевидными стержнями, поврежденной трещинами каменной кладки из ячеистобетонных блоков на тонкослойных швах. Исследования выполнялись на модели, представляющей замкнутую стальную раму с жесткими узлами, заполненную каменной кладкой из ячеистобетонных блоков с дверным проемом. В надпроемной области кладки стержни устанавливались «насухо» путем завинчивания в пилотные отверстия, которые просверливались в створе проема. На остальных участках заполнения стержни устанавливались в прорезанные фрезой пазы глубиной 50–80 мм с последующим их заполнением специальным полимерцементным раствором. Установлено, что армирование каменной кладки из ячеистобетонных блоков спиральными стержнями является эффективным средством повышения ее жесткости и трещиностойкости. Стержни рекомендуется располагать в направлении ожидаемых траекторий действия главных растягивающих напряжений. Значения главных напряжений и их траектории устанавливаются расчетом конструкции методом конечных элементов. Испытания показали низкую эффективность механического соединения «насухо» спиральных стержней с кладкой из ячеистобетонных блоков.

Ключевые слова: каменная кладка, трещины, внутреннее армирование, спиралевидные стержни, ячеистобетонные блоки.

REINFORCEMENT OF MASONRY STRUCTURES USING INTERNAL MASONRY REINFORCEMENT SYSTEMS

V. N. Derkach, A. V. Halaliuk, S. O. Burak

Abstract

An analysis of the methods of repair and reinforcement by internal reinforcement systems of cracked masonry made of brick and natural stone is given. It is noted that the effectiveness of internal reinforcement of masonry depends on the values of the initial stresses acting in the structure. It is pointed out that the effectiveness of this method has not been sufficiently studied to strengthen masonry made of effective wall materials, in particular, masonry made of autoclave-hardened cellular concrete blocks, in which cracks often occur caused by shrinkage deformations of the masonry, as well as deflections of the supporting floors. Experimental studies of the effectiveness of strengthening a cracked stone wall made of cellular concrete blocks on thin-layer joints using an internal reinforcement system with spiral rods have been carried out. The studies were carried out on a model representing a closed steel frame with rigid joints filled with masonry made of cellular concrete blocks with a doorway. In the area above the opening of the masonry, the rods were installed "dry" by screwing into pilot holes that were drilled into the opening. In other filling areas, the rods were installed in grooves cut by a milling cutter with a depth of 50–80 mm, followed by their filling with a special polymer-cement mortar. It has been established that reinforcing masonry made of cellular concrete blocks with spiral rods is an effective means of increasing its stiffness and crack resistance. It is recommended to position the rods in the direction of the expected trajectories of the main tensile stresses. The values and trajectories of principal stresses are determined through structural analysis using finite element methods. Tests have shown low efficiency of mechanical connection of spiral rods "dry" with masonry made of cellular concrete blocks.

Keywords: masonry, cracks, internal reinforcement, spiral rods, cellular concrete blocks.

Введение

Наиболее распространенными дефектами и повреждениями каменных конструкций являются трещины, которые не только ухудшают эстетичный вид стен, но и оказывают негативное влияние на их звукоизоляционные и теплотехнические характеристики, а также огнестойкость и долговечность. Одним из методов усиления поврежденных трещинами каменных стен является внутреннее армирование каменной кладки, которое выполняют с помощью арматурных стержней из оцинкованной или нержавеющей стали, а также из композитной арматуры. Задача внутреннего армирования заключается в соединении разделенных трещинами частей каменной кладки, восприятию растягивающих напряжений и повышению жесткости поврежденной конструкции. Внутреннее армирование кладки повышает ее прочность на растяжение по перевязанному сечению, а также на сдвиг и на сжатие [1, 2]. Поэтому данный метод усиления рекомендуется использовать для повышения сопротивления каменных конструкций растяжению, изгибу, сдвигу и сжатию. Такая необходимость часто возникает

при реконструкции каменных зданий из-за передачи дополнительных нагрузок на несущие стены. Системы внутреннего армирования широко применяют для усиления каменной кладки из кирпича, которая характерна для исторических зданий. При этом армирующие стержни обычно размещаются в пазах, выпиленных по горизонтальным швам кладки и заполненных предварительно дозированным в заводских условиях специальным раствором.

Актуальными остаются вопросы усиления системой внутреннего армирования каменных кладок из эффективных стеновых материалов, в частности кладок из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения, в которых часто возникают трещины, вызванные усадочными деформациями кладки, а также прогибами поддерживающих перекрытий [3, 5]. Однако экспериментальных исследований поврежденных трещинами стен из ячеистобетонных блоков, усиленных системой внутреннего армирования, выполнено недостаточно, чтобы сделать однозначные выводы об эффективности применения данного метода усиления.

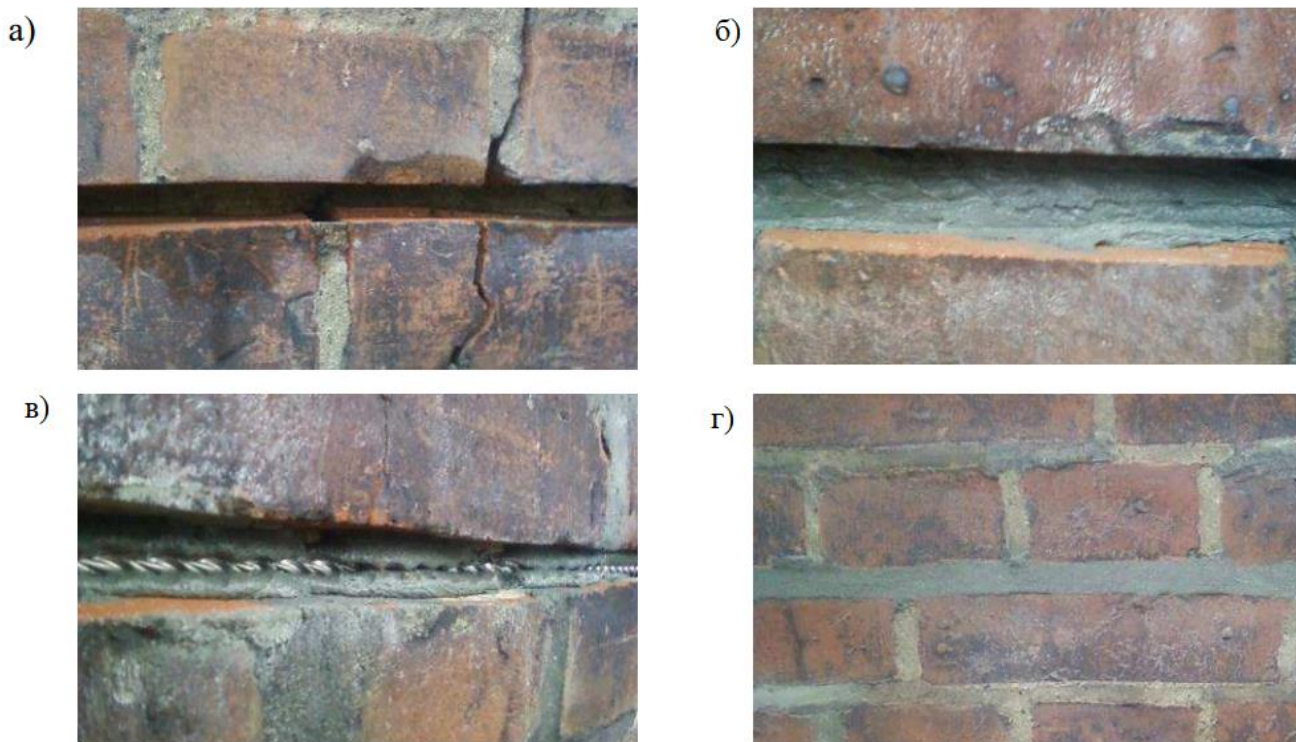
Армирование горизонтальных швов кладки из кирпича

Технология производства работ по армированию горизонтальных швов каменной кладки включает следующие этапы:

- удаление из горизонтальных швов кладки затвердевшего раствора на глубину 4÷6 см (рисунок 1а);
- заполнение образовавшихся пазов специальным ремонтным раствором (рисунок 1б);
- установка в раствор армирующих стержней (рисунок 1в);
- окончательного заполнения раствором пазов с установленными армирующими стержнями (рисунок 1г).

После прорезки в растворе пазов, перед его заполнением раствором паз следует продуть сжатым воздухом и смочить водой.

Для усиления каменной кладки толщиной в один кирпич обычно применяют одностороннее армирование растворных швов (рисунок 2а). В стены большей толщины армирующие стержни рекомендуют устанавливать с двух сторон (рисунок 2б). Иногда, кроме армирования горизонтальных швов, кладку армируют в поперечном направлении. Такое комбинированное армирование применяют в слоистых стенах или в колодцевой каменной кладке с засыпным утеплителем (рисунок 2в). Поперечные армирующие стержни устанавливают в заранее просверленные отверстия, заполненные раствором, или в их качестве используют химические анкера. В продольных в растворных швах пазы армирующие стержни могут устанавливаться попарно (рисунок 2г). В этом случае глубина паза должна составлять не менее 6 см и не более 1/3 толщины кладки.



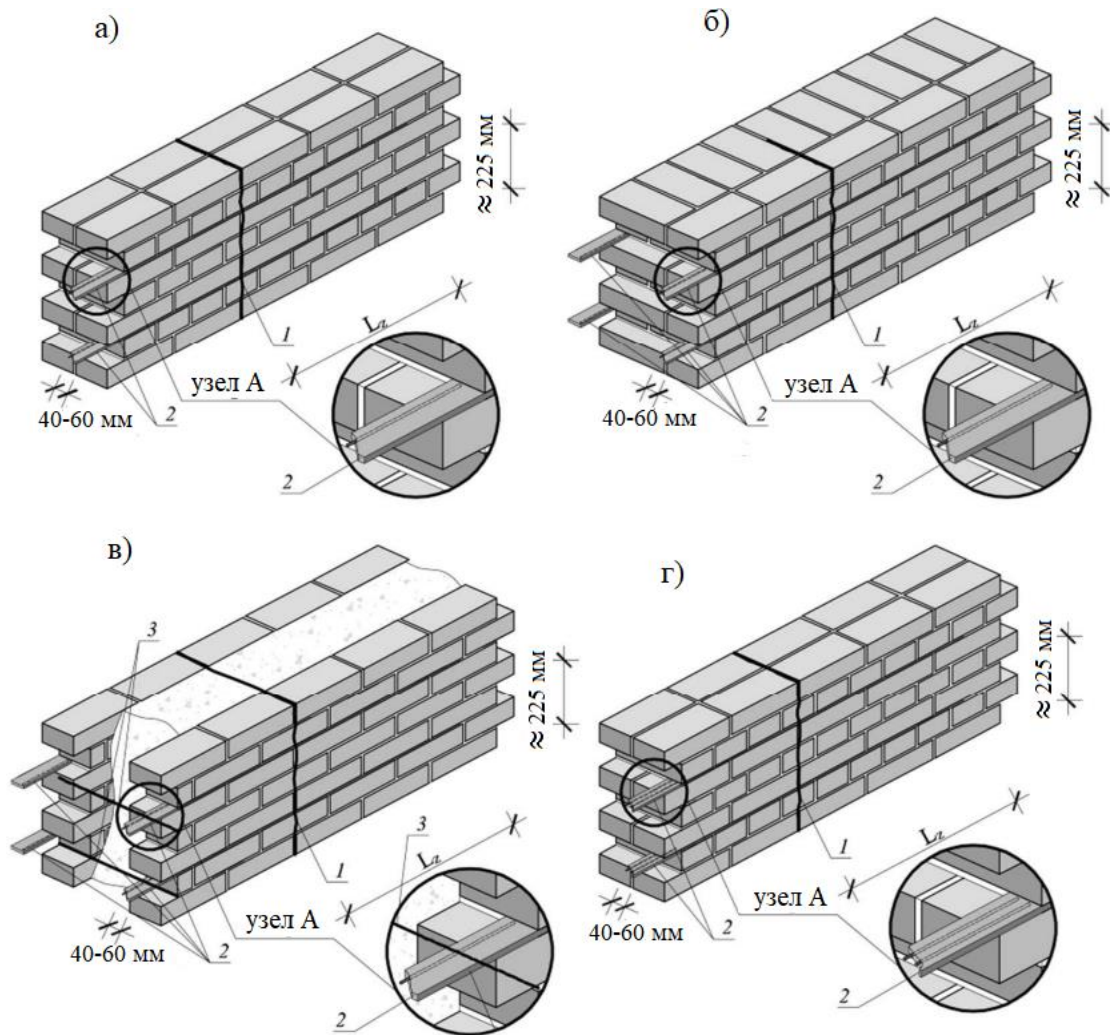
а) удаление раствора из горизонтальных швов кладки; б) заполнение пазов специальным раствором; в) установка армирующих стержней; г) окончательное заполнение пазов раствором, расшивка швов

Рисунок 1 – Этапы производства работ по армированию каменной кладки [6]

Рекомендуется использовать армирующие стержни небольшого диаметра, обычно от 3 до 6 мм, чтобы была обеспечена требуемая толщина защитного слоя раствора. Кроме того, при применении стержней больших диаметров, подвергающихся растяжению, на концах участка их анкеровки имеет место всплеск касательных напряжений, что может приводить к появлению вторичных трещин в каменной кладке. Для армирования каменной кладки чаще всего применяют спиралевидные стержни из аустенитной нержавеющей стали марок 304 или 316 согласно СТБ EN 10088-2. Система внутреннего армирования каменной кладки при помощи спиралевидных (винтовых) стержней, известная под названием «bed joint reinforcement», что в переводе с английского означает «армирование горизонтального шва», получила широкое распространение в странах Европы с конца 90-х годов прошлого века. Уникальная форма спиралевидных стержней при высокой прочности их сцепления с раствором обеспечивает более высокую деформативность системы армирования по сравнению с обычными стержнями, что положительно сказывается на ее взаимодействии с каменной кладкой. В Республике Беларусь данная система усиления применяется сравнительно недавно. Спиралевидные стержни изготавливают согласно техническим условиям ТУ БУ 291429877.001-2017, а усиление каменных конструкций осуществляют в соответствии с рекомендациями [7]. Для заполнения проделанных в растворных швах пазов

в работе [8] рекомендуется использовать цементные растворы. Это связано с тем, что усилие, воспринимаемое армирующими стержнями, определяется адгезией между раствором и камнем, при этом при использовании цементного раствора и длине анкеровки более 500 мм в полной мере реализуется прочность арматуры на растяжение. Следует иметь в виду, что в случае каменной кладки, выполненной на податливых известковых растворах, использование жесткого цементного раствора может привести к вторичным повреждениям. Поэтому при внутреннем армировании каменной кладки исторических зданий в работе [9] было рекомендовано использовать цементно-известковый раствор.

В системах армирования со спиралевидными стержнями используется специальный полимерцементный раствор. Раствор получают путем смешивания сухой смеси с жидким компонентом непосредственно перед выполнением ремонта. Раствор обладает хорошими тиксотропными свойствами, что позволяет полностью заполнять пазы, обеспечивая хорошее сцепление армирующих стержней с каменной кладкой. Специальные растворы быстро твердеют, достигая прочности на сжатие (25 МПа через один день, 45 МПа через неделю и 60 МПа через две недели). При использовании данного раствора в случае усиления каменной кладки, поврежденной трещинами, длина анкеровки арматуры принимается не менее 500 мм по каждую сторону от берега трещины.



1 – трещина, 2 – армирование горизонтальных швов, 3 – поперечные связи; а) одностороннее армирование; б) двухстороннее армирование; в) комбинированное армирование; г) попарная установка армирующих стержней

Рисунок 2 – Схемы установки армирующих стержней [6]

Необходимую площадь внутреннего армирования каменной кладки определяют по формуле:

$$A_s \geq \frac{\sigma_t \cdot S \cdot t}{n \cdot f_{yd}} \quad (1.1)$$

где A_s – площадь армирующего стержня;

σ_t – значение главных растягивающих напряжений в каменной кладке, устанавливаемое на основании расчетов каменной конструкции методом конечных элементов;

s – расстояние между армирующими стержнями, принимаемое не более 500 мм (в кладке из кирпича стержни рекомендуется устанавливать через три ряда);

t – толщина каменной кладки;

n – количество стержней, устанавливаемых в поперечном сечении усиливаемой конструкции;

f_{yd} – расчетное значение предела текучести стали арматурного стержня.

Длину анкеровки арматурных стержней l_b , по каждую сторону от берега образующей трещины определяют по формуле

$$l_b \geq \frac{\sigma_t \cdot S \cdot t}{n \cdot u_a \cdot f_{zd}} \quad (1.2)$$

где σ_t – значение главных растягивающих напряжений в каменной кладке;

s – расстояние между стержнями;

t – толщина каменной кладки;

f_{zd} – расчетное значение прочности сцепления стержня с ремонтным раствором или ремонтного раствора с каменной кладкой;

u_a – длина периметра контакта стержня с ремонтным раствором или ремонтного раствора с каменной кладкой.

Значения f_{zd} устанавливают на основании испытаний или принимают по данным производителя системы армирования. При расчете длины анкеровки арматурных стержней рассматривается два случая:

- потеря сцепления между стержнем и ремонтным раствором;
- потеря сцепления между ремонтным раствором и каменной кладкой.

Лабораторные испытания кирпичных кладок с искусственно созданными трещинами и усиленными системой внутреннего армирования [10–15] подтверждают высокую эффективность данного метода усиления. При этом необходимо отметить, что все известные испытания проводились на образцах, усиление которых выполнялось до нагружения каменной кладки. В реальности каменная кладка перед усилением, как правило, воспринимает определенную нагрузку, поэтому эффективность внутреннего армирования может быть разной, зависящей от значений, действующих в конструкции начальных напряжений. Кроме того, в технической литературе отсутствуют данные о эффективности описанного метода усиления каменных конструкций, работающих в условиях сложного напряженного состояния.

Армирование швов каменной кладки из природного камня

В каменной кладке из природного камня, которая широко применялась при возведении исторических зданий, растворные швы расположены нерегулярно, поэтому осуществить ее армирование стержневыми элементами не представляется возможным. При необходимости усиления такой кладки используют стальные тросы с небольшим поперечным сечением и высокой прочностью на разрыв, а также анкеры, состоящие из стальных стержней с резьбой на концах, гайки и фиксаторы армирующих тросов. Тросы устанавливают в швы каменной кладки после удаления раствора на глубину 6–8 см таким образом, чтобы они образовывали сетку с ячейками примерно квадратной формы (рисунок 3). Фиксация положения узлов сетки обеспечивается за счет использования анкеров, закрепленных в кладке. Эта система внутреннего армирования известна за рубежом под наименованием «Reticolatus» [16–21].

Технология производства работ по армированию каменной кладки системой «Reticolatus» включает следующие этапы:

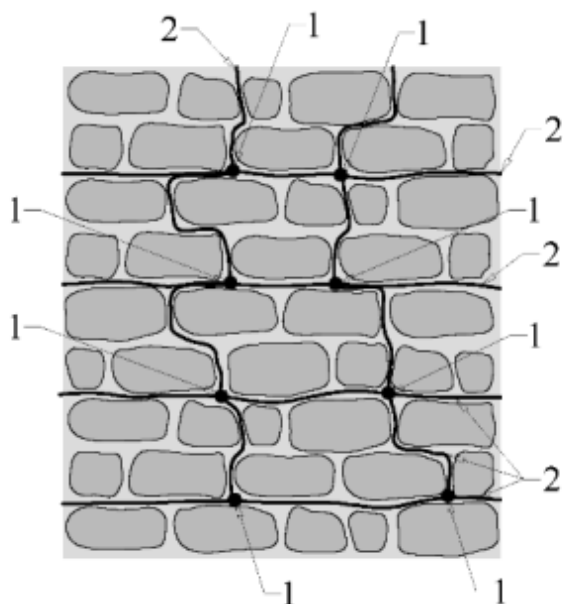
- удаление раствора из швов кладки шва на глубину 6–8 см, продувка сжатым воздухом и смачивание образовавшихся в швах кладки пазов. Эту операцию следует выполнять за несколько часов до нанесения раствора;

- сверление отверстий под анкеры, обычно четыре отверстия на квадратный метр, заполнение их клеем составом на основе эпоксидной смолы и установка анкеров. Рекомендуется устанавливать анкеры на всю толщину кладки или не менее чем на 2/3 ее толщины;

- заполнение пазов раствором, установка высокопрочных стальных тросов, их фиксация при помощи анкеров и натяжение тросов затяжкой гаек;

- окончательное заполнение швов кладки раствором, чтобы полностью покрыть элементы системы армирования, расшивка растворных швов.

Благодаря небольшому диаметру проволок троса, около 1 мм, и форме его сечения, полученной сплетением 3–4 отдельных проволок, трос хорошо взаимодействует с окружающим его раствором. Это обеспечивает хорошие механические свойства соединения камень – раствор – трос [16–18]. Лабораторные испытания подтвердили, что использование системы «Reticolatus» увеличивает прочность каменной кладки на сжатие, сдвиг и растяжение. Следует отметить, что в настоящее время отсутствует расчетная методика, позволяющая учитывать влияние армирования каменной кладки системой «Reticolatus». Решение данной задачи возможно на основе расчетного анализа конечно-элементных моделей армированной кладки [20, 21].



1 – армирующие тросы, 2 – анкера

Рисунок 3 – Система внутреннего армирования каменной кладки «Reticolatus» [6]



Эффективность армирования каменной кладки из ячеистобетонных блоков

С целью анализа эффективности усиления каменных стен из ячеистобетонных блоков системой внутреннего армирования в филиале НТЦ РУП «СТРОЙТЕХНОРМ» были выполнены экспериментальные исследования модели, представляющей замкнутую стальную раму с жесткими узлами, заполненную каменной кладкой из ячеистобетонных блоков. Для минимизации влияния масштабного фактора размеры заполнения ($l \times h = 4 \times 2,5$ м) принимались близкими к размерам реальных конструкций. Кладка выполнялась из блоков класса прочности на сжатие B2,5, плотностью D500 толщиной 250 мм на тонкослойных растворных швах. Горизонтальная, возрастающая ступенями нагрузка F , передавалась на раму в уровне центральной продольной оси ее верхнего ригеля с помощью гидравлического домкрата, размещенного между рамой и металлическим подкосом (рисунок 4а). Подробное описание конструкции опытной модели рамы с каменным заполнением и методики эксперимента приведено в [22].

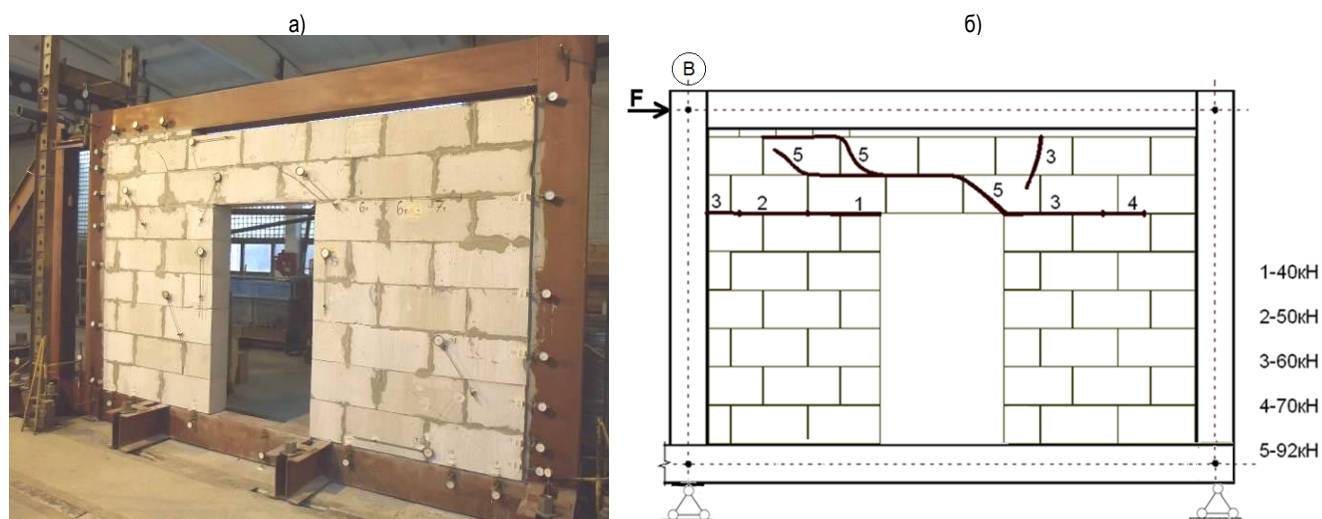
Первоначально была испытана рама с неармированным заполнением, содержащим центральный дверной проем размером $l_{\text{орен}} \times h_{\text{орен}} = 1000 \times 1830$ мм. Заполнение доводилось до разрушения.

Разрушение неармированного заполнения произошло хрупко по наклонной трещине, возникшей в надпроемном поясе кладки при нагрузке на раму 92 кН. Последовательность трещинообразования каменного заполнения и характер его разрушения приведены на рисунке 4б.

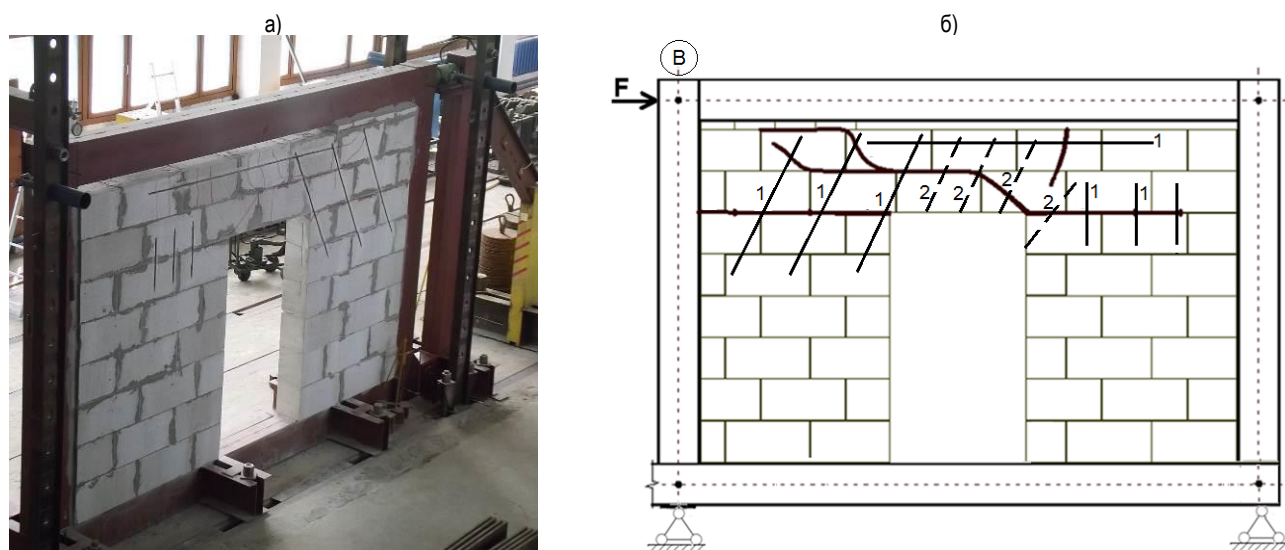
После снятия нагрузки было выполнено усиление заполнения спиральными стержнями диаметром 6 мм. Установка стержней производилась перпендикулярно траекториям образовавшихся трещин. В надпроемной области кладки стержни устанавливались «насухо» путем завинчивания в пилотные отверстия, которые просверливались в створе проема. На остальных участках заполнения стержни устанавливались в прорезанные фрезой пазы глубиной 50–80 мм с последующим их заполнением специальным полимерцементным раствором. Общий вид и схема усиления заполнения показаны на рисунке 5.

По истечении семи суток после усиления были проведены испытания рамы с заполнением на действие горизонтальной нагрузки.

По результатам испытаний получена зависимость величины горизонтальной деформации Δ верхнего узла рамы от сдвигающей нагрузки F , которая сопоставлялась с аналогичной зависимостью, установленной в предыдущих испытаниях (рисунок 6).



а) общий вид рамы с заполнением; б) последовательность трещинообразования
Рисунок 4 – Трещинообразование и разрушение неармированного каменного заполнения



1 – стержни, установленные в пазы, заполненные раствором; 2 – стержни, установленные «насухо» в пилотные отверстия
а) общий вид; б) схема усиления каменного заполнения

Рисунок 5 – Общий вид и схема усиления каменного заполнения с дверным проемом

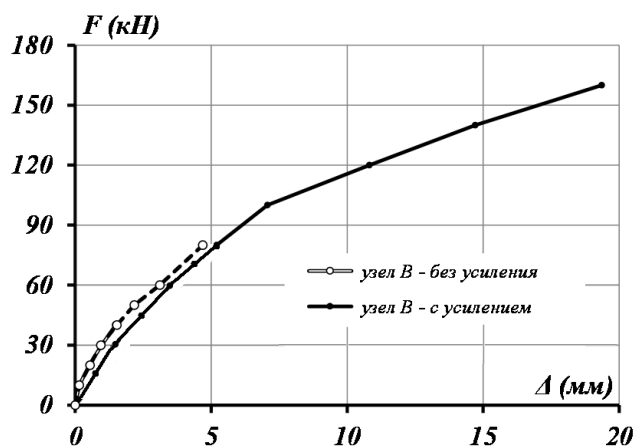


Рисунок 6 – Диаграмма горизонтального перемещения верхнего узла рамы с заполнением до и после усиления

Из рисунка 3 следует, что после усиления заполнения при сравнимой нагрузке $F = 40$ кН перемещение узла В составило 1,8 мм, что на 20 % больше, чем при испытаниях неповрежденного трещинами заполнения.

После выполненного усиления ширина раскрытия ранее образовавшихся трещин была в три-четыре раза ниже, чем при испытаниях неармированного заполнения. Следует отметить, что лучше в совместную работу с кладкой заполнения включались стержни, установленные с помощью раствора. До разрушения заполнения потери их анкеровки не наблюдалось. Увеличение нагрузки сопровождалось возникновением новых трещин в надпроемном поясе кладки, которые были ориентированы перпендикулярно плоскости горизонтальных швов. Ширина указанных трещин не превышала 0,5 мм (рисунок 7).

При нагрузке $F \approx 100$ кН было зафиксировано продергивание стержней, установленных в пилотные отверстия, которое сопровождалось раскрытием магистральной трещины и заметным падением сдвиговой жесткости рамы (см. рисунок 3). При этом наблюдалось разрушение материала стеновых блоков под витками спиральной арматуры. При максимальной нагрузке на раму $F_{\max} = 160$ кН ширина раскрытия магистральной трещины составила около 5 мм. При этом хрупкого разрушения заполнения не произошло.



Рисунок 7 – Характер трещинообразования в заполнении

Проведенные испытания показали, что армирование каменной кладки из ячеистобетонных блоков спиральными стержнями является эффективным средством повышения ее жесткости и трещиностойкости. Стержни следует располагать в направлении ожидаемых траекторий действия главных растягивающих напряжений, которые устанавливаются расчетом конструкции методом конечных элементов. Испытания показали низкую эффективность механического соединения «насухо» спиральных стержней с кладкой из ячеистобетонных блоков.

Заключение

Применение систем внутреннего армирования является эффективным методом повышения и восстановления несущей способности и эксплуатационной пригодности как исторических каменных кладок из кирпича и природного камня, так и каменных кладок из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения. Установку армирующих стержней в кладку из ячеистобетонных блоков следует производить с применением специального полимерцементного раствора в направлении ожидаемых траекторий действия главных растягивающих напряжений, которые определяют расчетом конструкции методом конечных элементов. Назначению схемы армирования поврежденной трещинами каменной кладки должен предшествовать анализ причин образования трещин, а выбранный метод ремонта и усиления должен в первую очередь устранить или, по крайней мере, минимизировать эти причины.

Список цитированных источников

1. Malyszko, L. Konstrukcje murowe. Zarysowania i naprawy / L. Malyszko, R. Orłowicz. – Olsztyn : Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, 2000. – 153 s.
2. Critical review of retrofitting and reinforcement techniques related to possible failure // NIKER, New Integrated Knowledge Based Approaches To The Protection Of Cultural Heritage From Earthquake-Induced Risk. – Italy : Università di Padova, 2010. – P. 35–90.
3. Деркач, В. Н. Каменные и армокаменные конструкции. Оценка технического состояния, ремонт и усиление / В. Н. Деркач. – Минск : Строймедиапроект, 2021. – 255 с.
4. Деркач, В. Н. Актуальные вопросы применения ячеистобетонных кладочных изделий в жилищном строительстве / В. Н. Деркач // Архитектура и строительство. – 2020. – № 4. – С. 46–49.
5. Деркач, В. Н. Проблемы трещиностойкости стенового заполнения каркасных зданий из ячеистобетонных блоков / В. Н. Деркач, А. С. Горшков, Р. Б. Орлович // Строительные материалы. – 2019. – № 3. – С. 52–56.
6. Drobiec, Ł. Naprawy i wzmocnienia konstrukcji murowych / Ł. Drobiec // XXXVIII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. – Wisła, 2024. – Tom 3. – S. 41–141.

7. Рекомендации по усилению каменных конструкций спиральными стержнями Sure Twist из аустенитной нержавеющей стали: Р 5.02168-2017. – Введ. 10.01.2017. – Минск : РУП Стройтехнорм, 2017. – 36 с.
8. Janowski, Z. Remonty i wzmocnianie murów oraz sklepień w obiektach zabytkowych / Z. Janowski // XIII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń 25–27 luty 1999 r. – Tom 1, cz. 1. – S. 223–252.
9. Stawiski, B. Konstrukcje murowe. Naprawy i wzmocnienia / B. Stawiski. – Warszawa : Polcen, 2014. – 320 s.
10. Piekarczyk, A. Uszkodzenia i naprawy niekonstrukcyjnych elementów budynków / A. Piekarczyk // XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. – Szczyrk, 2015. – S. 233–290.
11. Drobiec, L. Investigation of efficiency stitch boss on capacity of cracked masonry wallets / L. Drobiec, R. Jasiński, J. Kubica // 12th International Brick / Block Masonry Conference, Madrid, Spain, 25–28 June 2000. – Vol. 3. – P. 953–970.
12. Drobiec, L. Strengthening of cracked compressed masonry using different types of reinforcement located in the bed joints / Ł. Drobiec, R. Jasiński, J. Kubica // ACEE Architecture, Civil Engineering, Environment. – 2008. – Vol. 1, Iss. 4. – P. 39–48.
13. Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strips – An experimental evaluation / K. M. C. Konthesingha, M. J. Masia, R. B. Peterse [et al.] // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 50. – P. 126–136.
14. Ismail, N. In-situ and laboratory based out-of-plane testing of unreinforced clay brick masonry walls strengthened using near surface mounted twisted steel bars / N. Ismail, J. M. Ingham // Construction and Building Materials. – 2012. – Vol. 36. – P. 119–128.
15. Diagonal shear behaviour of unreinforced masonry wallets strengthened using twisted steel bars / N. Ismail, R. B. Petersen, M. J. Masia, J. M. Ingham // Construction and Building Materials. – 2011. – Vol. 25. – P. 4386–4393.
16. Repair and investigation techniques for stone masonry walls / L. Binda, C. Modena, G. Baronio, S. Abbaneo // Construction and Building Materials. – 1997. – Vol. 11 (3). – P. 133–142.
17. Borri, A. Mur z kamienia łamanego wzmocniony za pomocą systemu „reticolatus” / A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini, A. Giannantoni // Journal of Heritage Conservation. – 2009. – Vol. 26. – P. 110–125.
18. A reinforced repointing grid for strengthening historic stone masonry walls / A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini, A. Giannantoni // 8th International Masonry Conference 2010 in Dresden. – 2010. – S. 1851–1860.
19. Jasieńko, J. Conservation of the structure and materials of historic masonry walls / J. Jasieńko, Ł. Bednarz, D. Bajno // Key Engineering Materials. – 2015. – Vol. 624. – P. 354–362.
20. Paradiso, M. «Reticolatus»: An innovative reinforcement for irregular masonry. A numeric model / M. Paradiso, A. Borri, D. Sinicropi // Structures and Architecture: 2nd International Conference on Structure. – London : Taylor & Francis Group, 2013. – P. 841–848.
21. Borri, A. Un modello per lo studio del comportamento meccanico della muratura rinforzata con la tecnica del Reticolatus / A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini // Conference: XIV Convegno Nazionale L'ingegneria Sismica in Italia – ANIDIS 2011. – 9 p.
22. Деркач, В. Н. Экспериментальные исследования влияния каменного заполнения на сдвиговую жесткость каркасов зданий / В. Н. Деркач, Р. Б. Орлович // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 11. – С. 53–57.

References

1. Malyszko, L. Konstrukcje murowe. Zarysowania i naprawy / L. Malyszko, R. Orłowicz. – Olsztyn : Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, 2000. – 153 s.
2. Critical review of retrofitting and reinforcement techniques related to possible failure // NIKER, New Integrated Knowledge Based Approaches To The Protection Of Cultural Heritage From Earthquake-Induced Risk. – Italy : Università di Padova, 2010. – P. 35–90.

3. Derkach, V. N. Kamennye i armokamennye konstrukcii. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya, remont i usilenie / V. N. Derkach. – Minsk : Strojmediaproekt, 2021. – 255 s.
4. Derkach, V. N. Aktual'nye voprosy primeneniya yacheistobetonnyh kladochnykh izdelij v zhilishchnom stroitel'stve / V. N. Derkach // *Arhitektura i stroitel'stvo*. – 2020. – № 4. – S. 46–49.
5. Derkach, V. N. Problemy treshchinostojkosti stenovogo zapolneniya karkasnykh zdaniy iz yacheistobetonnykh blokov / V. N. Derkach, A. S. Gorshkov, R. B. Orlovich // *Stroitel'nye materialy*. – 2019. – № 3. – S. 52–56.
6. Drobiec, Ł. Naprawy i wzmocnienia konstrukcji murowych / Ł. Drobiec // XXXVIII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. – Wisła, 2024. – Tom 3. – S. 41–141.
7. Rekomendacii po usileniyu kamennykh konstrukcij spiralevidnymi sterzhnyami Sure Twist iz austenitnoj nerzhaveyushchej stali: R 5.02168-2017. – Vved. 10.01.2017. – Minsk : RUP Strojtekhnorm, 2017. – 36 s.
8. Janowski, Z. Remonty i wzmocnianie murów oraz sklepień w obiektach zabytkowych / Z. Janowski // XIII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń 25–27 luty 1999 r. – Tom 1, cz. 1. – S. 223–252.
9. Stawiski, B. Konstrukcje murowe. Naprawy i wzmocnienia / B. Stawiski. – Warszawa : Polcen, 2014. – 320 s.
10. Piekarczyk, A. Uszkodzenia i naprawy niekonstrukcyjnych elementów budynków / A. Piekarczyk // XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. – Szczyrk, 2015. – S. 233–290.
11. Drobiec, L. Investigation of efficiency stitch boss on capacity of cracked masonry wallets / L. Drobiec, R. Jasiński, J. Kubica // 12th International Brick / Block Masonry Conference, Madrid, Spain, 25–28 June 2000. – Vol. 3. – P. 953–970.
12. Drobiec, L. Strengthening of cracked compressed masonry using different types of reinforcement located in the bed joints / Ł. Drobiec, R. Jasiński, J. Kubica // *ACEE Architecture, Civil Engineering, Environment*. – 2008. – Vol. 1, Iss. 4. – P. 39–48.
13. Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strips – An experimental evaluation / K. M. C. Konthesingha, M. J. Masia, R. B. Peterse [et al.] // *Engineering Structures*. – 2013. – Vol. 50. – P. 126–136.
14. Ismail, N. In-situ and laboratory based out-of-plane testing of unreinforced clay brick masonry walls strengthened using near surface mounted twisted steel bars / N. Ismail, J. M. Ingham // *Construction and Building Materials*. – 2012. – Vol. 36. – P. 119–128.
15. Diagonal shear behaviour of unreinforced masonry wallets strengthened using twisted steel bars / N. Ismail, R. B. Petersen, M. J. Masia, J. M. Ingham // *Construction and Building Materials*. – 2011. – Vol. 25. – P. 4386–4393.
16. Repair and investigation techniques for stone masonry walls / L. Binda, C. Modena, G. Baronio, S. Abbaneo // *Construction and Building Materials*. – 1997. – Vol. 11 (3). – P. 133–142.
17. Borri, A. Mur z kamienia łamanego wzmocniony za pomocą systemu „reticolatus” / A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini, A. Giannantoni // *Journal of Heritage Conservation*. – 2009. – Vol. 26. – P. 110–125.
18. A reinforced repointing grid for strengthening historic stone masonry walls / A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini, A. Giannantoni // 8th International Masonry Conference 2010 in Dresden. – 2010. – S. 1851–1860.
19. Jasieńko, J. Conservation of the structure and materials of historic masonry walls / J. Jasieńko, Ł. Bednarz, D. Bajno // *Key Engineering Materials*. – 2015. – Vol. 624. – P. 354–362.
20. Paradiso, M. «Reticolatus»: An innovative reinforcement for irregular masonry. A numeric model / M. Paradiso, A. Borri, D. Sinicropi // *Structures and Architecture: 2nd International Conference on Structure*. – London : Taylor & Francis Group, 2013. – P. 841–848.
21. Borri, A. Un modello per lo studio del comportamento meccanico della muratura rinforzata con la tecnica del Reticolatus / A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini // *Conference: XIV Convegno Nazionale L'ingegneria Sismica in Italia – ANIDIS 2011*. – 9 p.
22. Derkach, V. N. Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya kamennogo zapolneniya na sdvigovuyu zhestkost' karkasov zdaniy / V. N. Derkach, R. B. Orlovich // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. – 2014. – № 11. – S. 53–57.

Материал поступил 17.06.2025, одобрен 13.07.2025, принят к публикации 14.07.2025

ЧЕРТЫ МОДЕРНА И ЭКЛЕКТИКИ В АРХИТЕКТУРЕ СОВЕТСКОЙ БЕЛОРУССИИ 1920-х гг.

Е. В. Морозов

Кандидат искусствоведения, доцент кафедры архитектуры жилых и общественных зданий, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: emorozow@bntu.by

Реферат

В статье исследовано развитие формообразующих черт белорусской архитектуры первых лет советской власти. Определено, что наряду с единичными авангардными постройками в 1920-х гг. существовало значительное количество зданий модерна и эклектики. А. Воинов, А. Шамрук и другие исследователи не обращались к этому эмпирическому материалу, создавая ограниченное представление о предопределённости процессов в архитектуре событиями политической истории. Основываясь на специальных исследованиях отечественных и зарубежных теоретиков (А. Лакотка, А. Иконников, Е. Кириченко, В. Власов), автор данной статьи сформировал модель стилей эклектики и модерна. Предложено использовать термин «эклектика» для описания построек, в которых нельзя отметить явные черты модерна или академического классицизма. «Модерн» при этом рассматривается как стиль, изначально ориентированный на создание принципиально нового, современного формального языка, призванного отметить новый этап в развитии архитектуры. Показана специфическая черта советского авангарда, пришедшего на смену модерну, – доктринальный отказ от всякого рода украшения, т. е. от традиционных декоративных элементов, что компенсировалось использованием актуальных на то время материалов и технических решений. Черты модерна отмечаются в широкой номенклатуре построек: от уникальных представительских до рядовых зданий. Подчёркивается, что ограниченному развитию эклектики способствовало конвенциональное восприятие этого направления как буржуазного. При создании образов эклектики архитекторы обращались к более раннему строительному опыту, к народной традиции, что удачней всего воплотилось в деревянном зодчестве. Немногочисленные сохранившиеся здания, датируемые первыми годами советской власти, требуют дальнейшего изучения, охраны и бережной реконструкции.

Ключевые слова: архитектурный стиль, история архитектуры, эклектика, модерн, архитектурное наследие Беларуси.

FEATURES OF ART NOVELTIES AND ECLECTICISM IN THE ARCHITECTURE OF SOVIET BELARUS IN THE 1920s

E. V. Morozov

Abstract

The article examines the development of formative features of the Belarusian architecture of the first years of Soviet power. It is determined that along with single avant-garde buildings in the 1920s, there were a significant number of Art Nouveau and eclectic buildings. A. Voinov, A. Shamruk and other researchers did not refer to this empirical material, creating a limited understanding of the predestination of processes in architecture by events of political history. Based on special research by domestic and foreign theorists (A. Lakotka, A. Ikonnikov, E. Kirichenko, V. Vlasov), the author of this article has formed a model of eclectic and modern styles. It is proposed to use the term "eclecticism" to describe buildings in which it is impossible to note the obvious features of Art Nouveau or academic classicism. At the same time, "Modern" is considered as a style initially focused on creating a fundamentally new, modern formal language designed to mark a new stage in the development of architecture. A specific feature of the Soviet avant-garde, which replaced modernity, is shown – the doctrinal rejection of all kinds of adornment, i. e. from traditional decorative elements, which was compensated by the use of relevant materials and technical solutions at that time. The features of Art Nouveau are noted in a wide range of buildings: from unique representative to ordinary buildings. It is emphasized that the limited development of eclecticism was facilitated by the conventional perception of this trend as bourgeois. When creating eclectic images, the architects turned to earlier construction experience, to folk tradition, which was most successfully embodied in wooden architecture. The few remaining buildings dating back to the first years of Soviet rule require further study, protection and careful reconstruction.

Keywords: architectural style, architectural history, eclecticism, Art Nouveau, architectural heritage of Belarus.

Введение

Постройки, созданные в первые годы советской власти, сегодня вызывают большой интерес исследователей. Архитектурные формы этих зданий репрезентуют процессы изменения взглядов людей на социальную структуру общества, государственное строительство, национальное образование, литературу и искусство. Буквально за несколько лет в хозяйственной жизни страны произошли существенные трансформации: от военного коммунизма до новой экономической политики, а затем до плановой экономики. Этим можно объяснить тот факт, что в рассматриваемый период было построено сравнительно немного. Множество зданий утеряно вследствие разрушений Второй мировой войны, а также сноса и перестройки в связи с ростом городов. В статье приведены примеры архитектурных объектов, которые удалось безошибочно датировать на основании сведений из периодики тех лет, современной краеведческой литературы и научных статей. Формальный и сравнительно-исторический методы позволяют определить художественные черты зданий в контексте стилей, доминировавших в архитектуре.

Немодернистские постройки 1920-х гг. в советских учебниках, белорусских исследованиях второй половины XX – первой четверти XXI вв.

Градостроительство 1917–1932 гг. в учебниках 1960-х – 1980-х гг. определяли как «архитектуру периода гражданской войны и восстановления народного хозяйства» [1], «архитектуру периода гражданской войны, восстановления народного хозяйства и построения фундамента социалистической экономики СССР» [2]. Несмотря на то, что период не определялся в категориях стиля, иллюстрации из учебников начиная с 1960-х гг. репрезентуют в основном модернистскую архитектуру: постройки М. Гинзбурга, П. Голосова, братьев Весниных и др., ставших своеобразными «иконами» классического советского архитектурного авангарда. Для справедливости нужно сказать, что неоклассические тенденции также упоминались в творчестве И. Жолтовского, И. Фомина и др. Модель смены архитектурных стилей экстраполировалась на столицы союзных республик.

Действительно, со второй половины 1920-х гг. в белорусской архитектуре появляется ряд зданий, построенных видными архитекторами Москвы и Ленинграда (здание Госбанка в Минске (Г. Гольц, 1927 г.), комплекс Белгосуниверситета (И. Запорожец, Г. Лавров, 1926 г.). Широкое распространение советского авангарда можно связать с распределением в Минск в начале 1930-х гг. молодых архитекторов – выпускников архитектурных вузов Москвы и Ленинграда (А. Воинов, И. Володько, Н. Маклецова и других). В то же время очевидно, что массовая архитектурная практика не ограничивалась объектами, запроектированными в духе авангарда. На фоне некоторого оживления строительства под влиянием новой экономической политики 1920-х гг. приходилось реконструировать существующие дореволюционные здания, как писал известный белорусский искусствовед М. Кацер – при ремонте и восстановлении «архитектурных и инженерно-будайных прихотливых пристасованца да канструкцыі і стылю гэтых будынкаў» [3]. Исследователь белорусской советской архитектуры А. Воинов характеризует творческие процессы в отечественной архитектуре как «замедленные», связывая это с одной стороны малым объёмом строительства, с другой – с малочисленностью группы архитекторов [4, с. 16]. Он приводит фамилии А. Денисова, С. Гайдукевича, П. Кирика, В. Вуколова, В. Кибардина, С. Шабуневского, гражданских инженеров Г. Кавокина, И. Бороденко, М. Кириллова. А. Воинов отмечает, что их «творческие взгляды сложились ещё до революции, когда в архитектуре господствовала эклектика» [4, с. 16], однако постройки, приводимые им в книге, имеют явный модернистский характер.

Очевидно, что относительная малочисленность дипломированных архитекторов – это особенность провинциальных городов того времени, к которым следует отнести Минск и другие крупные города современной Беларуси. Предстоит детальное исследование творчества отдельных архитекторов из приведённого выше списка, что позволит найти их постройки того периода. На сегодняшний день опубликовано исследование В. Чернатова, посвящённое С. Шабуневскому, в котором, кроме приведённых в нашем исследовании построек, рассматривается проект клуба на станции «Гомель» Западной железной дороги, решённый в чертах стиля модерн [5, с. 77]. Однако автор ссылается на архивный чертёж, информации о реализации постройки в натуре нет, и в нашу статью этот объект не попадает. В исследованиях архитектуры городов Витебска [6] и Могилёва [7] представлены разделы, посвящённые «началу социалистической реконструкции», здесь рассматриваются в основном крупные здания в стилистике авангарда и социалистического реализма. При этом следует отметить, что в декоре одного из двухэтажных жилых домов для рабочих Витебска теоретики отмечают закономерности использования элементов: «выкарыстаны традыцыі беларускага народнага дойлідства (розныя лішты, карнізы)» [6, с. 72]. В книге А. Шамрук приведены некоторые немодернистские постройки, в соответствии с принятой теоретиком типологией им даётся краткое описание [8]. Структура работы, деление на разделы по типологическому принципу, а также привлечение обширного материала западных белорусских земель, развивавшихся в других экономических и политических условиях, не позволили в полной мере отразить их стилистическую специфику. Сегодня же натурное выявление построек 1920-х гг. без явных черт модернизма – трудно выполнимая задача. Эти здания мало чем отличались от архитектурных объектов предыдущих десятилетий, и даже в достаточно детальных исследованиях краеведческого характера, опирающихся в том числе на периодизку и воспоминания, таких как, например, альбом В. Корбута [9], их скромно называют постройками начала XX века.

Концепции стилей эклектики и модерна

Для определения эпохи в развитии архитектуры «псевдо» и «нео» стилей XIX – начала XX в. чаще всего используют термин «эклектика» (более современное название – «архитектура выбора» [10, с. 26], заключающее в себе коннотации субъективности и плюрализма, – не закрепилось в белорусском искусствоведении). В обобщающем четырёхтомном белорусском исследовании отечественной архитектуры «Архитектура Беларусі: нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславянскім кантэксце» А. Лакотко предлагает ясную схему развития архитектурной стилистики: эклектика, новый стиль (мо-

дерн), новая архитектура [11, с. 5–47]. Исходя из такого понимания, можно использовать термин «эклектика» для описания построек первых лет советской власти, в которых нельзя отметить явные черты модерна или академического классицизма.

К стилю модерн следует относить архитектуру «сознательно и резко восстающую против подражательности, каноничности, выступившую с программой обновления зодчества» [12, с. 251]. Он изначально ориентирован на создание принципиально нового, современного формального языка, призванного отметить следующий этап в развитии архитектуры. Это целеполагание воплощено в названиях стиля, которые в разных странах и на разных языках звучали как «современный», «новый», «юный», «молодой». Архитектурные формы модерна использовались в основном для зданий банков, усадебных домов и становились узнаваемыми преимущественно посредством российских и немецких архитектурных журналов. На фоне других псевдостилей современники связывали модерн с представлениями о новизне, по их мнению, он был способен отражать независимость и богатство заказчиков [13, с. 240–241].

В рамках модерна, который предшествовал советскому архитектурному авангарду, был сформирован отказ от традиции «подстраивания», подражания историческим стилям, а также оформился принцип проектирования «изнутри – наружу», когда первоочередное значение приобретал план, а архитекторы уже не старались маскировать разные по функции объёмы в едином метре фасада. Коренным же отличием советского авангарда являлся доктринальный отказ от всякого рода украшения, т. е. от традиционных декоративных элементов, который должен был компенсироваться эстетикой лёгких конструкций из стали и железобетона, использования больших поверхностей изящных витражных систем, но в условиях экономии и низкого уровня развития строительных технологий в БССР зачастую принимал упрощённые формы [14]. В зданиях стиля модерн присутствовал характерный декор, выполненный не в традициях исторических стилей, а с использованием растительных мотивов либо с применением абстрактного геометрического орнамента. В. Власов отмечает, что модерн в первую очередь характеризуется «стремлением художников, вопреки разобщённости предыдущего периода историзма и эклектики, к синтезу, объединению многообразных источников творчества [...] на основе метода стилизации произвольно выбранного мотива» [15]. Так в стиле модерн проходило переосмысление народного зодчества с применением стилизации.

Историко-архитектурный анализ немодернистских построек 1920-х гг. на территории Советской Белоруссии

Памятник погибшим в годы Первой мировой войны в Бобруйске (ул. Крупской) заложен в 1920 г., вскоре после того, как в городе установилась советская власть, и торжественно открыт в 1924 г. [16]. Это уникальное сооружение, возникшее из стремления увековечить память погибших героев, имеет много схожего с часовнями-усыпальницами. История не сохранила сведений об авторе постройки, очевидно, что он был хорошо знаком с традициями кирпичной гражданской архитектурой тех лет: фасад имеет трёхчастное членение, углы здания оформлены пилястрами (рисунок 1). Необычными элементами для такого сооружения являлись балконы, украсившие три стены здания. Их кронштейны, выполненные из кирпича, имели характерный для стиля модерн рисунок, близкий к изображению удара бича.

Двухэтажное здание больницы на Чичаговских батареях в Борисове (рисунок 2) было построено в 1927–1929 гг. Здесь использован характерный для модерна фронтон и простые столбики-пинакли, которые являются единственными декоративными украшениями фасада, что можно объяснить материальными трудностями государственного строительства в республике.

Значительно более выразительные черты стиля модерн демонстрирует учебное здание в Гомеле на улице Кирова, построенное в 1928 г. Его фасады просты и при этом достаточно гармоничны, стены неоштукатурены, однако кладка выполнена очень качественно, что свидетельствует о довольно высоком уровне профессиональной культуры строителей. В симметричной композиции объёма ясно читается центральная часть и боковые ризалиты, все они имеют ступенчатые фронтоны с характерным для стиля модерн декоративным приёмом – неглубокой нишей со скруглёнными углами (рисунок 3).

Жилой дом (рисунок 4) в Гомеле (1927 г., ул. Ленина, 31) отличается похожей стилистикой. Его автором являлся архитектор С. Шабуневский, ещё до революции активно проектировавший в стиле модерн [17, с. 108]. Неглубокие вертикальные ниши в стенах здания имеют характерное завершение плавными дугами, сочетание гладких плоскостей и неоштукатуренной кирпичной кладки формирует пластику стены.

Черты модерна характерны и для ещё одного жилого дома в Гомеле (1927 г., ул. Пушкина, 26). Архитектор С. Шабуневский использовал здесь прямоугольные вертикальные ниши в качестве основного элемента фасадного решения, а также крупный руст. Фасады здания не имеют других декоративных элементов и решены очень лаконично, можно отметить присутствие некоторых деталей конструктивизма, например, трёхэтажного цилиндрического объёма на углу здания и простого, прямоугольного козырька под ним (рисунок 5). Тем не менее, оценивая общий вид постройки, следует отнести её скорее к формальной традиции модерна с определяющим влиянием авангардных архитектурных течений.



Рисунок 1 – Памятник погибшим в годы Первой мировой войны в Бобруйске (1926 г.)



Рисунок 2 – Больница в Борисове, 1927–1929 гг.



Рисунок 3 – Учебное здание в Гомеле, 1928 г.



Рисунок 4 – Жилой дом для рабочих в Гомеле, 1927 г.



Рисунок 5 – Жилой дом в Гомеле, 1927 г.

В стиле модерн было выполнено и здание психоневродиспансера в Минске (конец 1920-х гг. ул. Володарского) (рисунок 6), которое не сохранилось. Его автор Г. Кавокин, как и С. Шабуневский, принадлежал к старшему поколению специалистов. Разрабатывая проект, Г. Каворкин обратился к знакомому ему языку форм модерна, однако в несколько упрощённом виде, что было обусловлено, очевидно, влиянием нового стиля – конструктивизма, распространявшегося в то время.

Пожалуй, наиболее яркими среди рядовых построек в стиле модерн в Беларуси являются два производственных объекта – водонапорные башни в Горках (железнодорожная станция) [18] и Бобруйске (угол ул. Пролетарской и Пушкина), возведённые в конце 1920-х гг. (рисунок 7). Обе башни кирпичные, ярусные, высотой 25–27 м. Несмотря на то, что их производственная функция утрачена, они достаточно хорошо сохранились. О принадлежности к стилю модерн здесь свидетельствует геометрический декор, а также сочетание фактур красной кирпичной кладки и штукатурки.



Рисунок 6 – Здание психоневродиспансера в Минске, конец 1920-х гг.



Рисунок 7 – Водонапорные башни в Горках и в Бобруйске (1928 г.)

Здание клиники в Минске сохранилось только на фотографиях (рисунок 8). Фасад имел классическую структуру, был выполнен симметрично, с высоким цокольным этажом, декорирован рустом. В дизайне окон применены классические декоративные элементы: замковые камни, ниши в виде арки, сандрики. Заметно влияние стиля модерн в слегка изогнутых линиях фронтона, в эллиптической форме окна, в рисунке поручня балкона, а также в преувеличенном масштабе сухариков венчающего карниза.



Рисунок 8 – Здание клиники в Минске (1923 г.)

В начале 1920-х гг. копирование архитектурных форм прошлого конвенционально осуждалось, стилизация считалась «буржуазным пережитком». В то же время большую часть зданий, возведённых в период между Первой и Второй мировыми войнами, составляли деревянные строения, созданные в традиционных техни-

ках, стилистически относящихся к традициям архитектурной эклектики. Иногда мастера обращались к альбомам образцовых проектов, но в основном строили лишь с опорой на утверждённый план. Жилые дома посёлка для рабочих в Витебске являются сохранившимися примерами таких деревянных зданий (рисунок 9). Посёлок строился единовременно для рабочих близлежащей фабрики по чертежам, составленным архитектором или инженером. Здания можно датировать концом 1920-х гг., однако по всем своим стилевым признакам они не отличаются от аналогичных построек конца XIX – начала XX вв.



Рисунок 9 – Жилой дом в Витебске (1920-е гг.)

Характерный пример деревянной архитектуры первых послевоенных лет находим на иллюстрации в журнале «Наш край» за 1929 г. [19, с. 47]. Сравнительно крупное здание, носившее название Народного дома, было возведено в 1924 г. в приграничном Дзержинске (Койданово) (рисунок 10). Бревенчатые стены не обшиты, боковые ризалиты завершаются высокими шатровыми крышами, центральная двухэтажная часть декорирована треугольным фронтоном. Во внешнем виде здания угадывались стилизованные черты народной архитектуры, напоминавшей сказочные терема и крепости. Образ усиливали острые шпили, размещённые на завершении высокой крыши и центральном фронтоне. Необычный вид постройки следует расценивать как проявление эстетических пристрастий его строителей, но в то же время архитектурные мотивы взяты не из народного зодчества (в начале XX в. не существовало подобных теремов), а скорее являются продолжением традиций эклектичных переосмыслений «русского стиля». В сельской архитектуре 1920–1925-х гг. ещё не было выработано новых средств художественной выразительности, это подтверждают российские исследователи [20, с. 24].

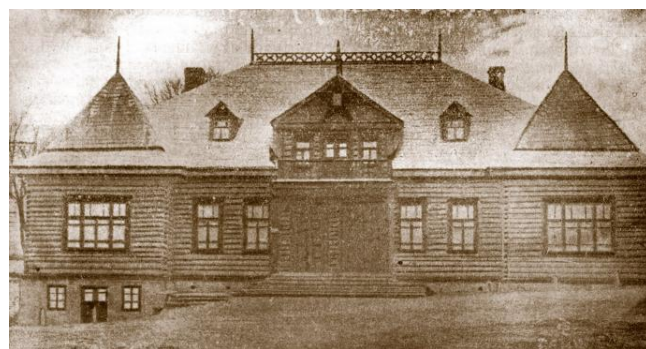


Рисунок 10 – Народный дом в Дзержинске (1924 г.)

Заключение

Развитие белорусской архитектурной стилистики имело свою специфику, отражавшуюся в том числе и в хронологическом несовпадении с событиями политической истории: единичные постройки в авангардных стилях появились только к концу 1930-х гг., архитектура же большинства зданий 1920-х гг. характеризовалась чертами модерна и эклектики. При этом стиль модерн не был преобладаю-

щим, его художественные формы практически не несли традиционной для него смысловой нагрузки – отражение богатства и состоятельности заказчика, что обуславливало применение этого стиля преимущественно в зданиях банков, особняков и доходных домов. В советской практике модерн использовался при проектировании массовых общественных объектов, таких, например, как больницы, школы. Эклектика имела более ограниченное развитие, чему способствовало конвенциональное восприятие этого направления как буржуазного. При создании образов эклектики архитекторы обращались к раннему строительному опыту, к народной традиции, что удачной всего воплотилось в деревянном зодчестве. Немногочисленные сохранившиеся здания, датируемые первыми годами советской власти, требуют дальнейшего изучения, охраны и бережной реконструкции.

Список цитированных источников

1. История советской архитектуры. 1917–1958 гг. : учебное пособие для архитектурных вузов и факультетов / Академия строительства и строительства СССР, Институт теории и истории строительства и строительной техники. – М. : Госстройиздат, 1962. – 347 с.
2. История советской архитектуры (1917–1954 гг.) : учебник для архитектурных вузов. Специальность «Архитектура» / Н. П. Былинкин, В. Н. Калмыкова, А. В. Рябушин, Г. В. Сергеева. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1985. – 256 с.
3. Белорусский государственный архив-музей литературы и искусства. – Фонд 149. – Оп. 3. Д. 35.
4. Воинов, А. А. История архитектуры Белоруссии : Советский период / А. А. Воинов – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Минск, 1987. – 293 с.
5. Чернатов, В. М. Станислав Шабуневский / В. М. Чернатов. – Минск : Беларусь, 2005. – 95 с.
6. Чарняўская, Т. І. Архітэктура Віцебска. 3 гісторыі планіроўкі і забудовы горада / Т. І. Чарняўская. – Мінск : Навука і тэхніка, 1980. – 96 с.
7. Чарняўская, Т. І. Архітэктура Магілёва. 3 гісторыі планіроўкі і забудовы горада / Т. І. Чарняўская. – Мінск : Навука і тэхніка, 1973. – 112 с.
8. Шамрук, А. С. Архитектура Беларуси XX – начала XXI в.: эволюция стиле и художественных концепций / А. С. Шамрук. – Минск : Белорус. наука, 2007. – 335 с.
9. Корбут, В. А. Минск. Спадчына сталіцы Беларусі [Выяўлены матэрыялы]: 1918–2018 / В. А. Корбут, Д. М. Ласко. – Мінск : Беларусь, 2017. – 415 с.
10. Иконников, А. В. Архитектура XX века: Утопии и реальность : в 2 т. / А. В. Иконников. – М. : Прогресс-Традиция, 2001. – Т. 1. – 654 с.
11. Архітэктура Беларусі: нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславянскім і еўрапейскім кантэксце: у 4 т. – Мінск : Беларус. навука, 2006–2007. – Т. 3, кн. 2: Другая палова XIX – пачатак XX ст. / А. І. Лакотка, Т. В. Габрусь, А. М. Кулагін [і інш.]. – 2007. – 549 с.
12. Кириченко, Е. И. Модерн. К вопросу об истоках и типологии / Е. И. Кириченко // Советское искусствознание – 1978. – М., 1979. – Вып. 1. – С. 252–253.
13. Кулагін, А. М. Эклектыка. Архітэктура Беларусі другой паловы XIX – пачатку XX ст. / А. М. Кулагін. – Мінск : Ураджай, 2000. – 304 с.
14. Марозаў, Я. В. Канструктыўізм, рацыяналізм, традыцыяналізм – адценні «палетарскага мінімалізму» у міжваеннай архітэктуры сталіцы Савецкай Беларусі / Я. В. Марозаў // Традыцыі і сучасны стан культуры і мастацтваў : зборнік дакладаў і тэзісаў VIII Міжнароднага навука-практ. канф., Мінск, Беларусь, 7–8 верасня 2017 года. – Мінск : «Права і эканоміка», 2018. – С. 172–178.
15. Власов, В. Г. Триада «историзм, стилизация, эклектика», и постмиленизм в истории и теории искусства / В. Г. Власов // Электронный научный журнал «Архитектон: известия вузов». – 2018. – № 3 (63). – URL: https://web.archive.org/web/20191108121427/http://archvuz.ru/2018_3/18 (дата обращения: 02.05.2025).
16. Одерихо, Золотин, Гершон и другие... Усыпальница для большевиков в Бобруйске. – URL: <https://komkur.info/history-of-bobruisk/oderikho-zolotin-gershon-i-drugie-usypalnitsa-dlya-bolshevikov-v-bobrujske> (дата обращения: 02.05.2025).
17. Архитекторы Советской Белоруссии: Биограф. справ. / Союз архитекторов БССР; сост. В. И. Аникин Л. И. Аникина, Т. В. Габрусь [и др.]. – Минск : Беларусь, 1991. – 262 с.
18. Столетние сестры: водонапорная башня в Горках и бобруйская «Чырвоная вежа». – URL: <https://bobr.by/news/culture/190458> (дата обращения: 02.05.2025).
19. Наш край. – 1929. – № 4. – С. 47.
20. Калмыкова, В. Н. История архитектуры советского села: учеб. для архит. спец. вузов / В. Н. Калмыкова. – М. : Агропромиздат, 1991. – 191 с.

References

1. Istoriya sovetskoy arhitektury. 1917–1958 gg. : uchebnoe posobie dlya arhitekturnykh vuzov i fakul'tetov / Akademiya stroitel'stva i stroitel'stva SSSR, Institut teorii i istorii stroitel'stva i stroitel'noj tekhniki. – M. : Gosstroizdat, 1962. – 347 s.
2. Istoriya sovetskoy arhitektury (1917–1954 gg.) : uchebnik dlya arhitekturnykh vuzov. Special'nost' «Arhitektura» / N. P. Bylinkin, V. N. Kalmykova, A. V. Ryabushin, G. V. Sergeeva. – Izd. 2-e, pererab. i dop. – M. : Strojizdat, 1985. – 256 s.
3. Belorusskij gosudarstvennyj arhiv-muzej literatury i iskusstva. – Fond 149. – Op. 3. D. 35.
4. Voinov, A. A. Istoriya arhitektury Belorussii : Sovetskij period / A. A. Voinov – Izd. 2-e, pererab. i dop. – Minsk, 1987. – 293 s.
5. CHernatov, V. M. Stanislav SHabunevskij / V. M. CHernatov. – Minsk : Belarus', 2005. – 95 s.
6. CHarnyaŭskaya, T. I. Arhitektura Vicebska. Z gistoryi planiroŭki i zabudovy gorada / T. I. CHarnyaŭskaya. – Minsk : Navuka i tekhnika, 1980. – 96 s.
7. CHarnyaŭskaya, T. I. Arhitektura Magilyova. Z gistoryi planiroŭki i zabudovy gorada / T. I. CHarnyaŭskaya. – Minsk : Navuka i tekhnika, 1973. – 112 s.
8. SHamruk, A. S. Arhitektura Belarusi HKH – nachala HKHI v.: evolyuciya stile i hudozhestvennykh koncepcij / A. S. SHamruk. – Minsk : Belarus. nauka, 2007. – 335 s.
9. Korbut, V. A. Minsk. Spadchyna stalicy Belarusi [Vyyaŭlenchy materyyal]: 1918–2018 / V. A. Korbut, D. M. Las'ko. – Minsk : Belarus', 2017. – 415 s.
10. Ikonnikov, A. V. Arhitektura HKH veka: Utopii i real'nost' : v 2 t. / A. V. Ikonnikov. – M. : Progress-Tradiiciya, 2001. – T. 1. – 654 s.
11. Arhitektura Belarusi: narysy evalyucyi va ŭskhodneslavyanskim i eŭrapejskim kanteksce: u 4 t. – Minsk : Belarus. navuka, 2006–2007. – T. 3, kn. 2: Drugaya palova XIX – pachatak XX st. / A. I. Lakotka, T. V. Gabrus', A. M. Kulagin [i insh.]. – 2007. – 549 s.
12. Kirichenko, E. I. Modern. K voprosu ob istokah i tipologii / E. I. Kirichenko // Sovetskoe iskusstvoznaniye – 1978. – M., 1979. – Vyp. 1. – S. 252–253.
13. Kulagin, A. M. Eklektyka. Arhitektura Belarusi drugoy palovy XIX – pachatku HKH st. / A. M. Kulagin. – Minsk : Uradzhaj, 2000. – 304 s.
14. Marozay, YA. V. Kanstruktyvizm, racyanalizm, tradycyanalizm – adcenni «praletarskaga minimalizmu» u mizhvaennaj arhitektury stalicy Saveckaj Belarusi / YA. V. Marozay // Tradycyi i suchasny stan kul'tury i mastactvaŭ : zbornik dakladaŭ i tezisay VIII Mizhnar. navuk.-prakt. kanf., Minsk, Belarus', 7–8 verasnya 2017 goda. – Minsk : «Prava i ekanomika», 2018. – S. 172–178.
15. Vlasov, V. G. Triada «istorizm, stilizaciya, eklektika», i postmillenizm v istorii i teorii iskusstva / V. G. Vlasov // Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Arhitekton: izvestiya vuzov». – 2018. – № 3 (63). – URL: https://web.archive.org/web/20191108121427/http://archvuz.ru/2018_3/18 (data obrashcheniya: 02.05.2025).
16. Oderiho, Zolotin, Gershon i drugie... Usypal'nica dlya bol'shevikov v Bobrujske. – URL: <https://komkur.info/history-of-bobruisk/oderikho-zolotin-gershon-i-drugie-usypalnitsa-dlya-bolshevikov-v-bobrujske> (data obrashcheniya: 02.05.2025).
17. Arhitektory Sovetskoy Belorussii: Biogr. sprav. / Soyuz arhitektorov BSSR; sost. V. I. Anikin L. I. Anikina, T. V. Gabrus' [i dr.]. – Minsk : Belarus', 1991. – 262 s.
18. Stoletnie sestry: vodonapornaya bashnya v Gorkah i bobrujskaya «CHyrvonaya vezha». – URL: <https://bobr.by/news/culture/190458> (data obrashcheniya: 02.05.2025).
19. Nash kraj. – 1929. – № 4. – S. 47.
20. Kalmykova, V. N. Istoriya arhitektury sovetskogo sela: ucheb. dlya arhit. spec. vuzov / V. N. Kalmykova. – M. : Agropromizdat, 1991. – 191 s.

Материал поступил 21.04.2025, одобрен 27.04.2025, принят к публикации 21.07.2025

УДК 624.014.2

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СНЕГОВЫХ НАГРУЗОК НА СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

А. Г. Олѣх

Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов и производств,
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: agoleh@g.bstu.by

Реферат

В статье сравниваются требования к определению величины снеговой нагрузки на покрытия зданий и сооружений при их проектировании в соответствии с правилами, установленными в нормативных документах различных стран и объединений: Беларусь, Россия, Евросоюз, Канада, США. Описан подход к определению расчетного значения снеговой нагрузки на покрытие зданий. Даны разъяснения по определению характеристического значения снеговой нагрузки на грунт (нормативный вес снегового покрова на квадратный метр поверхности). Проведен сравнительный анализ применяемых в нормативных документах формул расчета снеговых нагрузок в виде сопоставительной таблицы. На примере схемы распределения снеговой нагрузки для цилиндрических покрытий (арочных, изогнутых, сводчатых или близких к ним) при отсутствии снегоудерживающих заграждений наглядно продемонстрировано различие в нормативных схемах для равномерного (без учета заноса снега) и неравномерного (с учетом заноса снега) распределения снега по кровле, с учетом различия в определении коэффициентов (коэффициент сноса/ветровой защищенности (учитывающий снос снега с покрытий зданий под действием ветра или иных факторов), термический коэффициент, коэффициент ответственности (значимости снеговой нагрузки) здания, коэффициент учета дождевой нагрузки, коэффициент формы, учитывающий переход от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие, коэффициент наклона крыши, коэффициент накопления снега на покрытии). Оговорены рекомендации для определения снеговых нагрузок, распределенных на покрытие, форма или конфигурация которого отсутствует среди предложенных в нормативном документе схем, а также упомянуты мероприятия по осуществлению процесса очистки крыши от снега.

Ключевые слова: снеговые нагрузки, нормы проектирования, нормативный вес снегового покрова, коэффициент формы, коэффициент ветровой защищенности, термический коэффициент, схемы распределения нагрузок.

FEATURES OF DETERMINING SNOW LOADS ON BUILDING STRUCTURES

A. G. Aliokh

Abstract

The article compares the requirements for determining the magnitude of snow loads on the roofs of buildings and structures during their design according to the rules established in the regulatory documents of various countries and associations: Belarus, Russia, the European Union, Canada, and the USA. It describes the approach to determining the design value of snow load on building roofs. Clarifications are provided for determining the characteristic value of snow load on the ground (the normative weight of the snow cover per square meter of surface). A comparative analysis of the formulas used in regulatory documents for calculating snow loads is presented in the form of a comparative table. Using the example of the distribution of snow load for cylindrical roofs (arched, curved, vaulted, or similar) in the absence of snow-retaining barriers, the differences in regulatory schemes for uniform (without considering snow drift) and non-uniform (considering snow drift) distribution of snow on the roof are clearly demonstrated, taking into account the differences in the determination of coefficients (drift/wind protection coefficient, which considers the drift of snow from building roofs under the influence of wind or other factors; thermal coefficient; importance coefficient of snow load; rain load coefficient; shape coefficient, which accounts for the transition from the weight of the ground snow cover to the snow load on the roof; roof slope coefficient; and snow accumulation coefficient on the roof). Recommendations are provided for determining snow loads distributed on roofs whose shape or configuration is not included among those proposed in the regulatory document, as well as measures for the process of clearing snow from roofs.

Keywords: snow loads, design standards, normative weight of snow cover, shape coefficient, wind protection coefficient, thermal coefficient, load distribution schemes.

Введение

Отрасль строительства постоянно развивается, и с каждым днём возрастает спрос на новые материалы, которые легче, прочнее и долговечнее. Уменьшение собственного веса конструкций в случае применения лёгких и прочных инновационных строительных материалов приводит к существенному увеличению относительного вклада снеговых нагрузок в суммарную нагрузку на покрытие. Поэтому представляется важным уточнение величин снеговых нагрузок и характера их распределения на покрытия зданий и инженерных сооружений различной формы.

Определение снеговых нагрузок на покрытия зданий и сооружений

Снеговые нагрузки на конструкции (в первую очередь, на кровлю) должны устанавливаться в соответствии с нормами для каждой расчетной ситуации и схемы приложения нагрузки [1]. В Республике Беларусь нормативные значения снеговой нагрузки определяют в соответствии с положениями строительных норм Республики Беларусь СН 2.01.04-2025 «Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Снеговые нагрузки» [2]. В Российской Федерации – СП 20.13330.2016. «Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85» (в ред. изменения № 3 от 30.12.2020) [3]. Стандарт

Европейского союза EN 1991-1-3:2003+AC:2009 «Еврокод 1 – Воздействия на конструкции – Часть 1–3: Общие воздействия – Снеговые нагрузки» [4, 15–20]. Стандарт Канады National Building Code of Canada 2015 [5]. Стандарт США Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures ASCE / SEI 7–16: Snow Loads [6].

Подход к определению расчетного значения снеговой нагрузки на покрытие одинаков во всех рассматриваемых в статье нормативных документах: умножение характеристического (нормативного) значения снеговой нагрузки на различные коэффициенты (см. таблицу 1).

Во всех рассматриваемых нормативных положениях характеристическим значением снеговой нагрузки на грунт (нормативный вес снегового покрова на квадратный метр поверхности) является снеговая нагрузка на грунт, определенная с годовой вероятностью превышения 0,02, что соответствует периоду повторяемости $T = 50$ лет. Т. е. значение устанавливается при обработке вероятностными методами (Гумбеля, Фреше, Вейбулла и др. [7]) ежегодных максимумов веса снегового покрова, определяемых по данным маршрутных снегоуборочных работ о запасах воды в снеговом покрове, и означает, что превышение указанной климатической нагрузки допускается в среднем один раз в течение 50 лет [1], что соответствует проектному сроку эксплуатации массового строительства в нормальных условиях эксплуатации [8].

Таблица 1 – Формулы расчета снеговых нагрузок в различных нормативных документах

Нормативные документы	Формулы расчета снеговых нагрузок и значения, принятые в формуле
Строительные нормы Республики Беларусь СН 2.01.04-2025 [2]	$S = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot S_k$ – для постоянных и переходных расчетных ситуаций, $S = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot S_{Ad}$ – для особых расчетных ситуаций, в которых особая снеговая нагрузка рассматривается как особое воздействие, где μ_i – коэффициент формы снеговой нагрузки на покрытие, с помощью которого выполняют переход от снеговой нагрузки на грунт к снеговой нагрузке на покрытие с учетом распределения снега; $C_e = 0,8 \dots 1,56$ – коэффициент экспозиции; $C_t = 0,8 \dots 1,2$ – температурный коэффициент; $S_{Ad} = 2 \cdot S_k$ – расчетное значение особой снеговой нагрузки на грунт для конкретной местности; S_k – характеристическое значение снеговой нагрузки на грунт для конкретной местности
Свод правил (стандарт Российской Федерации) СП 20.13330.2016 (изм.3) [3]	$S = \mu \cdot c_e \cdot c_t \cdot S_g$, где $c_e = 0,5 \dots 1,0$ – коэффициент, учитывающий снос снега с покрытий зданий под действием ветра или иных факторов; $c_t = 0,8$ или $1,0$ – термический коэффициент; $\mu = 0 \dots 6,0$ – коэффициент формы, учитывающий переход от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие; $S_g = 0,5 \dots 4,0$ – нормативное значение веса снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной поверхности земли; $S_g = S_{g,50}^{1/4}$, где $S_{g,50}$ – превышаемый в среднем один раз в 50 лет ежегодный максимум веса снегового покрова
Стандарт Европейского союза EN 1991-1-3 (2003) [4]	$S = \mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot S_k$ – для постоянных / переходных расчетных ситуаций, $S = \mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot S_{ad}$ – для особых расчетных ситуаций (особое воздействие – чрезвычайная снеговая нагрузка), $S = \mu \cdot S_{ad}$ – для особых расчетных ситуаций (особое воздействие – чрезвычайный снежный занос), где μ – коэффициент формы, учитывающий переход от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие; $C_e = 0,8 \dots 1,2$ – коэффициент сноса / ветровой защищенности; C_t (до $1,0$) – термический коэффициент; S_k – нормативный вес снегового покрова на квадратный метр поверхности, $S_{ad} = 2 \cdot S_k$
Стандарт Канады National Building Code of Canada 2015 [5]	$S = I_s [S_s (C_b C_w C_s C_a) + S_r]$, где $I_s = 0,8 \dots 1,25$ – коэффициент ответственности (значимости снеговой нагрузки) здания; S_s – снеговая нагрузка на грунт; S_r – дождевая нагрузка; $C_b = 0,8 \dots 2,0$ – базовый коэффициент формы снеговой нагрузки на крышу; $C_w = 0,5 \dots 1,0$ – коэффициент воздействия ветра (сноса, ветровой защищенности); $C_s = 0 \dots 1,0$ – коэффициент наклона крыши; C_a (от 0) – коэффициент накопления снега на покрытии
Стандарт США ASCE / SEI 7-16: Snow Loads [6]	$p_f = 0,7 \cdot C_e \cdot C_t \cdot I_s \cdot p_g$; $p_m = I_s \cdot p_g$ – для зданий с пологими крышами (минимальная нагрузка); $p_s = C_s \cdot p_f$ – для неравномерной нагрузки, где $C_e = 0,7 \dots 1,2$ – коэффициент сноса/ветровой защищенности; $C_t = 0,85 \dots 1,3$ – термический коэффициент; $I_s = 0,8 \dots 1,2$ – коэффициент ответственности здания; p_g – нормативный вес снегового покрова на квадратный метр поверхности; C_s – коэффициент формы покрытия

Характеристическое значение снеговой нагрузки на грунт определяется по карте снегового районирования. В нормативных документах каждой страны карты районирования имеют различные степени детализации. Количество действующих в Республике Беларусь стационарных пунктов метеорологических наблюдений соответствует действующим инструкциям ВМО (Всемирной метеорологической организации), однако очевидно, что чем ближе будет находиться метеостанция

к проектируемому объекту, тем надежнее будет точность инженерных расчетов и в итоге качество проектируемых мероприятий. Судить о репрезентативности станции можно, если результаты ее наблюдений показательны для окружающего более или менее значительного (порядка нескольких десятков километров) района и по результатам наблюдений этой станции можно получить интерполированные значения в пунктах окружающего ее района с точностью до ошибки принято-

го метода интерполяции, в предположении однородности территории района относительно всех факторов, под влиянием которых формируется метеорологический режим [9].

В нетипичных случаях, когда требуются более точные данные, допускается уточнять характеристическое значение снеговой нагрузки на грунт в установленном порядке на основе данных организаций по гидрометеорологии для места строительства или данных наблюдений за продолжительный период времени, полученных на хорошо закрытой от ветра площадке, расположенной вблизи строительной площадки.

Примером нетипичных местных условий может быть сооружение, расположенное в долине, где от локальных климатических и ветровых воздействий в течение зимы накапливается снег. Обычно при разработке карт снегового покрова такие локальные эффекты не принимаются во внимание. Таким образом, на основе опыта и оценок экспертов и по согласованию с заказчиком и компетентными специалистами заданное по карте характеристическое значение снеговой нагрузки для конкретной площадки может быть увеличено [10].

Для определения коэффициентов (см. таблицу 1) предусмотрены различные таблицы и предоставлены схемы нагрузок.

Коэффициент сноса / ветровой защищенности / экспозиции (C_e , C_w)

В нормативном документе Беларуси данный коэффициент определяется в зависимости от топографических условий местности (не защищенные от ветра участки – $C_{top} = 0.8$; обычные – $C_{top} = 1.0$; защищенные от ветра участки – $C_{top} = 1.25$) и геометрических размеров здания ($C_s = 1.0$ – при условии, что наименьшая длина здания составляет не более 10 высот здания; $C_s = 1.25$ – при условии, что наименьшая длина здания составляет не менее 20 высот здания) и определяется по формуле $C_e = C_{top} \cdot C_s$. В нормах Евросоюза данный коэффициент определяет как уменьшение (не защищенные от ветра территории – $C_e = 0.8$), так и увеличение (закрытые территории – $C_e = 1.2$) нагрузки на покрытие неотапливаемого здания как части характеристической снеговой нагрузки на грунт в зависимости от условия местности. В нормах США данный коэффициент оценивает степень воздействия (уменьшение / увеличение) на крышу по двум шкалам: категория воздействия (три категории) и категория шероховатости поверхности (пять категорий). В нормах России данный коэффициент учитывает только снос снега с покрытий зданий под действием ветра или иных факторов и устанавливается в зависимости от типа местности, формы покрытия и степени его защищенности от прямого воздействия ветра. В нормах Канады, как и нормах России, коэффициент учитывает только снос снега, но в зависимости только от категории важности здания (назначения и количества людей, находящихся в здании) и от типа местности.

Термический / температурный коэффициент (C_t) используется в расчетах для корректировки снеговых нагрузок на покрытия, учитывая их теплоизоляционные свойства. В нормах Беларуси предусмотрены различные варианты условий учета температурного коэффициента: для зданий, которые эксплуатируются при положительной температуре воздуха, с вентилируемым холодным чердаком ($C_t = 1.1$); для неотапливаемых зданий и конструкций на открытом воздухе, неотапливаемых теплиц ($C_t = 1.2$); для теплиц с постоянным обогревом и зданий со стеклянным покрытием ($C_t = 0.85$); для неутепленных покрытий цехов с повышенными тепловыделениями при уклонах кровли более 3 % с обеспеченным отводом талой воды ($C_t = 0.8$); во всех остальных случаях – $C_t = 1.1$. В нормах России и Евросоюза коэффициент используется исключительно только для снижения снеговых нагрузок, т. е. при расчете для покрытий с повышенной теплопередачей ($>1 \text{ Вт/м}^2\text{К}$), а во всех остальных случаях $C_t = 1.0$. В стандарте США учтены варианты как для отапливаемых помещений (теплица с постоянным обогревом и с постоянным дежурством обслуживающего персонала или с системой температурной сигнализации для предупреждения в случае сбоя отопления – $C_t = 0.85$), так и для сооружений, в которых температура чуть выше точки замерзания ($C_t = 1.1$), неотапливаемых и открытых конструкций ($C_t = 1.2$) и морозильных помещений (температура внутри поддерживается на уровне или ниже точки замерзания – $C_t = 1.3$), а также отдельно оговорено, что на оборудовании, температура внешней поверхности которого в зимнее время превышает 45 °F

(7,2 °C), не требуется учитывать скопление снега. В нормах Канады данный коэффициент отсутствует.

Если скорость таяния снега на тепловыделяющих покрытиях (теплицы, парники, доменные цехи) превышает интенсивность умеренных снегопадов, в результате чего отложения снега на покрытия вообще не образуются, целесообразно нормировать не полную снеговую нагрузку, накопленную в течение всей зимы, а нагрузку от одного снегопада, ибо в промежутке между снегопадами снег на покрытии должен полностью растаять [11].

В стандартах Канады и США присутствует **коэффициент ответственности здания (I_s)**. Отображает фактор значимости в зависимости от категории (I–IV, таблицы 1.5-1, 1.5-2 [6]) риска здания (здания, представляющие низкий риск для жизни человека в случае выхода из строя – I категория риска $I_s = 0.8$; здания, выход из строя которых может представлять существенную опасность для общества – IV категория риска $I_s = 1.2$).

В стандарте Канады при расчете снеговой нагрузки отдельным коэффициентом учтена **дождевая нагрузка (S_d)**. В стандарте США дождевая нагрузка также учитывается дополнительно в размере 0,24 кН/м² при условии, если нормативный вес снегового покрова на квадратный метр поверхности p_g составляет 0,96 кН/м² или менее, но не равна нулю, в случае с наклонной крышей (сбалансированной) и не должна использоваться в сочетании с заносными, скользкими, несбалансированными, минимальными или частичными нагрузками (п. 7.10 [6]). В стандарте Европейского союза указывается, что в районах, где возможны дождевые осадки на лежащий снег с последующим его таянием и повторным замерзанием, снеговые нагрузки на кровлю следует увеличивать, особенно в случае, когда снег и образующийся лед могут блокировать систему отвода воды с покрытия (п. 5.2 (6) [4]). Во всех остальных случаях считается, что измерения снеговой нагрузки на грунт содержат данные о воздействии дождя на снег, и предполагается, что эффект "дождь на снегу" был измерен в полном объеме.

Коэффициент формы (μ , C_a , C_b , C_s) учитывает переход от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие. Во всех нормативных документах для определения значения коэффициента формы (в стандарте Канады это три коэффициента: C_a , C_b , C_s) предусмотрены схемы распределения снеговой нагрузки (см. таблицу 2.)

Во всех нормативных документах предложены коэффициенты формы для распределения снеговых нагрузок с заносами и без заносов, т. е. в расчетах необходимо рассматривать схемы равномерно распределенных и неравномерно распределенных снеговых нагрузок на покрытия в их наиболее неблагоприятных расчетных сочетаниях, при этом в нормативных документах Беларуси, Канады и США явно выделяется направления ветра и рассчитывается нагрузка для каждой из сторон отдельно. Во всех документах рассмотрены как случаи беспрепятственного соскальзывания снега с покрытия, так и при наличии на кровле снегоудерживающих заграждений или других элементов кровельных сооружений (в нормах России, Канады и США учитывается шероховатость кровли – коэффициент трения снега по материалу) или когда нижний край ската покрытия заканчивается парапетом.

С целью демонстрации отличий схем распределения снеговой нагрузки в рассматриваемых в статье нормативных документах приведена сравнительная таблица 3. В качестве примера рассмотрена схема распределения снеговой нагрузки для цилиндрических покрытий (арочных, изогнутых, сводчатых или близких к ним) при отсутствии снегоудерживающих заграждений (α – угол наклона между горизонтальной и касательной к контурной кривой). Рассмотрено два варианта распределения нагрузки: вариант 1 – без учета заноса снега (равномерное распределение) и вариант 2 – с учетом заноса снега (неравномерное распределение).

Определение коэффициента формы в зависимости от угла наклона кровли отличается в разных нормативных документах. В Беларуси, России и странах Евросоюза участки крыши с уклоном на краю более 60° считаются свободными от снеговой нагрузки. В США этот угол должен превышать 70°. В Канаде снеговая нагрузка равна нулю на участках крыши, где угол превышает 70°.

а для незагроможденных скользких крыш, с которых снег и лёд могут полностью соскальзывать, угол наклона уменьшен до 60°. При уклонах от 30° (в стандарте Канада, для скользких поверхностей – 15°) используются понижающие коэффициенты. В стандартах Канады и США на части крыши с наветренной стороны нагрузка снега принимается равной нулю. Так же снеговая нагрузка отсутствует на коньке крыши (вариант 2) во всех нормативных документах, кроме стандарта США. В строительных нормах Республики Беларусь рас-

смотрено три варианта схем приложения снеговой нагрузки при расчете с учетом заноса снега (вариант 2.3 учитывает схему одностороннего приложения снеговой нагрузки на покрытие и должен рассматриваться только при условии, если с наветренной стороны (направление ветра ССВ-В-ЮВ перпендикулярно наклону покрытия) высота здания составляет не более 10 м, две высоты здания меньше его длины, а ширина больше высоты и с наветренной стороны находится местность, не защищенная от ветра).

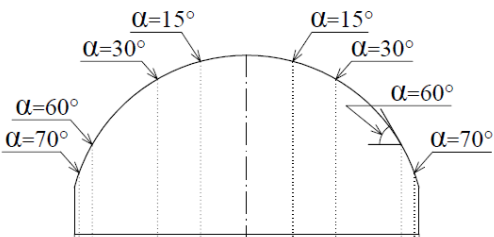
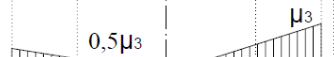
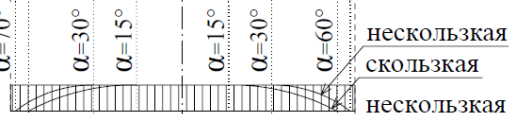
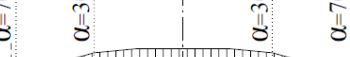
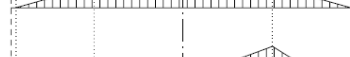
Таблица 2 – Схемы распределения снеговой нагрузки для стандартных профилей покрытий в различных нормативных документах

N п/п	Наименование типа кровли (схемы распределения снеговой нагрузки для стандартных профилей покрытий)	Наименование нормативного документа				
		Строительные нормы Республики Беларусь СН 2.01.04-2025 [2]	Свод правил (стандарт Российской Федерации) СП 20.13330.2016 (изм. 3) [3]	Стандарт Европейского союза EN 1991-1-3 (2003) [4]	Стандарт Канады National Building Code of Canada 2015 [5]	Стандарт США ASCE / SEI 7-16: Snow Loads [6] ¹
1	Однокатные покрытия	п. 7.3.2	Пр. Б1	п. 5.3.2	–	рисунок 7.4-2
2	Двускатные покрытия (шатровые крыши)	п. 7.3.3	Пр. Б1	п. 5.3.3	п. 4.1.6.9.	рисунок 7.6-2
3	Двух- и многопролетные здания с двускатными покрытиями	п. 7.3.4	Пр. Б5	п. 5.3.4, В.2	п. 4.1.6.12	рисунок С7.12-1
4	Цилиндрические покрытия (сводчатые и близкие к ним по очертанию), арочные изогнутые	п. 7.3.5	Пр. Б2	п. 5.3.5	п. 4.1.6.10	–
5	Покрытия в виде стрельчатых арок	–	Пр. Б2	–	–	–
6	Двух- и многопролетные здания со сводчатыми и близкими к ним по очертанию покрытиями	–	Пр. Б6	–	п. 4.1.6.12	–
7	Покрытия здания, примыкающего к более высокому сооружению (покрытия зданий с перепадами высот, ступени крыши в виде рядов, снежный занос с наветренной стороны на соседней крыше)	п. 7.3.6	Пр. Б8, Б9	п. 5.3.6, В3	пп. 4.1.6.5, 4.1.6.6, 4.1.6.7, 4.1.6.11	рисунок 7.7-2, С7.7-1, С7.7-2, С7.7-3
8	Участки покрытий, примыкающие к возвышающимся над кровлей надстройкам (вентиляционным шахтам и т. п.)	п. 8.2	Пр. Б14	п. 6.2, В4	–	–
9	Покрытие с парапетами	–	Пр. Б13	–	–	–
10	Снеговая нагрузка на снегоудерживающих ограждениях и других преградах	п. 8.3	–	п. 6.4	–	–
11	Нависание снега на краю ската покрытия (нагрузка на ледяную плотину на карнизе)	–	–	п. 6.3	–	рисунок С7.4-1
12	Покрытия зданий с продольными фонарями, закрытыми / открытыми сверху	–	Пр. Б3	–	–	–
13	Покрытия зданий с зенитными фонарями	–	Пр. Б3, Б8, Б11	–	–	–
14	Двух- и многопролетные здания с двускатными и сводчатыми покрытиями с продольным фонарем	–	Пр. Б7	–	–	–
15	Шедовые покрытия (пилообразные крыши)	–	Пр. Б4	–	–	рисунок 7.6-3
16	Висячие покрытия цилиндрической формы	–	Пр. Б10	–	–	–
17	Здания с купольными круговыми и близкими к ним по очертанию покрытиями	–	Пр. Б11	–	п. 4.1.6.10	–
18	Здания с коническими круговыми покрытиями и покрытиями в виде сочетания сферической и конической поверхностей	–	Пр. Б12	–	–	–
19	Снежный занос на поворотах: нагрузка на внешнем углу	–	–	–	п. 4.1.6.8	–
20	Снежный занос на поворотах: нагрузка на внутреннем углу	–	–	–	п. 4.1.6.8	рисунок 7.7-3

« – » – в нормативном документе схема отсутствует.

¹ В стандарте США сбалансированные и несбалансированные нагрузки для криволинейных крыш любой формы (изгиба) должны определяться в соответствии со схемами нагрузок, приведенными на рисунке 7.4-2. Сбалансированные и несбалансированные нагрузки для криволинейных крыш.

Таблица 3 – Схемы распределения снеговой нагрузки для цилиндрических покрытий (сводчатых или близких к ним) при отсутствии снегоудерживающих заграждений

Наименование нормативного документа	Схемы распределения снеговой нагрузки без учета заноса снега и с учетом заноса снега	
		
Строительные нормы Республики Беларусь СН 2.01.04-2025, п. 5.3.5 [2]	вариант 1	
	вариант 2.1	
	вариант 2.2	
	вариант 2.3	
Свод правил Российской Федерации – СП 20.13330.2016, Приложение Б2 [3]	вариант 1	
	вариант 2	
Стандарт Европейского союза EN 1991-1-3:2003+AC:2009, п. 5.3.5 [4]	вариант 1	
	вариант 2	
Стандарт Канады National Building Code of Canada 2015, п. 4.1.6.10 [5]	вариант 1	
	вариант 2	
Стандарт США Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures ASCE / SEI 7-16: Snow Loads, рисунок 7.4-2. [6]	вариант 1	
	вариант 2	

Для определения снеговых нагрузок, распределенных на покрытие, форма или конфигурация которого отсутствует среди предложенных схем, рекомендуется провести модельные испытания. В стандарте Европейского союза указывается, что в некоторых случаях испытания и проверенные и/или должным образом подтвержденные численные методы могут быть использованы для получения снеговых нагрузок на сооружения. В своде правил Российской

Федерации [3] указывается, что во всех случаях, не предусмотренных нормативным документом, а также при иных формах покрытий, или при необходимости учета различных направлений переноса снега по покрытию, или близко расположенных зданий и сооружений окружающей застройки и т. п., схемы распределения снеговой нагрузки по покрытиям и значения коэффициента устанавливаются в рекомендациях, разработанных на основе результатов модельных испытаний

в аэродинамических трубах в приложениях данного нормативного документа. В Канаде и США разработан стандарт ASCE/SEI 49 «Испытания в аэродинамической трубе зданий и других сооружений» [12] для испытаний в аэродинамической трубе масштабных моделей, включающий процедуры, помогающие определить снеговую нагрузку на крыши. В строительных нормах Республики Беларусь указания при проектировании здания, формы покрытия которого нет среди предложенных в нормативном документе, отсутствуют.

Влияние соседнего здания на определение снеговой нагрузки в нормативных документах также различное. Например, в нормах России и Евросоюза близость к другим более высоким зданиям (для России – удаленными менее чем на $10 h_1$, где h_1 – разность высот соседнего и проектируемого зданий) расценивается только как защита от прямого воздействия ветра. А в стандартах Канады и США при строительстве более высокого здания (в пределах 5 м – для Канады и 20 футов (6,1 м) – для США) необходимо учитывать потенциальную повышенную снеговую нагрузку на существующую нижнюю крышу и существующие кровли должны быть проверены на предмет увеличения снеговой нагрузки, вызванной пристройками или изменениями. В нормативном документе Беларуси влияние соседнего здания при определении снеговой нагрузки не учитывается.

В нормах Евросоюза учтена чрезвычайная снеговая нагрузка на грунт – нагрузка от веса слоя снежного покрова земли, являющаяся результатом снегопада (выпадения снега), имеющего исключительно низкую вероятность (частоту) появления. При этом рассмотрены постоянная/переходная расчетная ситуация распределения снега и особая (когда снег является особым воздействием) ситуация для трех условий: для районов, где могут появляться чрезвычайные снегопады, но не чрезвычайные снеговые заносы; для районов, где появление чрезвычайных снегопадов маловероятно, но могут появляться чрезвычайные снеговые заносы; для районов, где могут появляться как чрезвычайные снегопады, так и чрезвычайные снеговые заносы. Отдельно разработано приложение, которое содержит коэффициенты формы снеговых нагрузок для определения схемы распределения нагрузок при чрезвычайных снеговых заносах. В строительных нормах Республики Беларусь, при проверках живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, также учитывается особая снеговая нагрузка на грунт – нагрузка от веса снежного покрова земли, образующаяся в результате снегопада (выпадения снега), имеющего частоту появления не более 10^{-5} в год (см. таблицу 1).

В нормах Канады указано, что удаление снега механическими, термическими, ручными или другими способами не должно использоваться в качестве обоснования для снижения расчетных снеговых нагрузок (п. 4.1.6.14. [5]). В нормах России отмечено, что при эксплуатации существующих зданий, запроектированных на более низкие расчетные значения снеговой нагрузки, чем установлено действующим сводом правил, до проведения реконструкции зданий необходимо предусмотреть мероприятия по очистке кровли от снега (п. 10.4, примечание 5 [3]). Согласно требованиям строительных норм Республики Беларусь [13] при эксплуатации зданий крыши должны очищаться от снега, не допускается образование снегового покрова толщиной более 30 см (при оттепелях, если наблюдается обледенение свесов и водоотводящих устройств, снег должен сбрасываться и при меньшей толщине снегового покрова). После сильного снегопада следует немедленно очищать остекление световых фонарей. Необходимо следить, чтобы козырьки не перегружались снегом и наледями. Запрещается сбрасывать снег с крыши здания на козырек.

Надзорные органы МЧС и Минздрава Республики Беларусь осуществляют проверки соблюдения законодательства в части эксплуатации кровель, качество их очистки от снега и наледи. Результатом данной работы зачастую становится приостановка эксплуатации объектов. К примеру, в январе 2016 года после циклона «Даниэлла» в г. Минске была приостановлена работа 6 объектов [14].

Процесс очистки крыши от снега должен быть продуманным и хорошо организованным. Так как в некоторых случаях уменьшение снеговой нагрузки на какой-либо участок приводит к более высоким напряжениям в конструкции крыши, чем при нагрузке на всю крышу.

Хорошим примером могут служить консольные балки крыши, снятие половины снеговой нагрузки с консольной части увеличивает изгибающее напряжение и прогиб смежного неразрезного пролета. В системах кровли из неразрезных балок могут возникать проблемы при уборке снега. Неравномерная нагрузка, возникающая в результате неравномерного удаления снега, может существенно изменить распределение нагрузки по всей кровельной системе и привести к заметному увеличению напряжений и прогибов по сравнению с теми, которые наблюдались при равномерной нагрузке. В других ситуациях это может привести к обратному изменению напряжений. Поэтому проектной организацией должен быть предложен сценарий очистки кровли от снега (например, когда процесс удаления части снега с каждого пролета начинается с одного конца здания и продолжается по направлению к другому концу, или когда работы по уборке должны быть прекращены и возобновлены в другом месте, или когда несколько бригад по уборке снега приступают к работе в разных местах на крыше одновременно) [6].

Заключение

Представленный анализ нормативных документов в области строительства, регулирующих подсчет снеговых нагрузок, базируется на общем подходе использования характеристического значения снеговой нагрузки на грунт. С целью определения значения снеговой нагрузки на покрытия зданий и сооружений вводятся дополнительные корректирующие коэффициенты, учитывающие местные условия, характеристики конструкции (такие как высота здания, уклон кровли, ее форма и т. д.). Однако методики определения данных коэффициентов с учетом различных факторов (ветровая защищенность, температурный режим, категория ответственности здания) значительно отличаются.

Исходя из частного анализа покрытий цилиндрической формы, представленного в статье, для определения величины снеговой нагрузки установлено, что в различных нормативных документах представлены различные подходы к установлению как схем распределения снеговой нагрузки по покрытию, так и определению дополнительных коэффициентов.

Величина снеговой нагрузки, характера её распределения на покрытия зданий и инженерных сооружений различной формы является важной задачей для обеспечения безопасности и надежности строительных конструкций. Дальнейшие исследования в этой области, направленные на разработку более точных и универсальных принципов расчета снеговых нагрузок, будут способствовать повышению эффективности проектирования и строительства. С учетом сложности по экспериментальному определению характеристического значения и вида распределения снеговых нагрузок для различных форм покрытий зданий и сооружений предлагается дальнейшее исследование построить с учетом подходов численного моделирования.

Список цитированных источников

1. Тур, В. В. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Поведение исследований изменения климатических воздействий на строительные конструкции в Республике Беларусь с целью внесения изменений в действующие ТНПА» (заключительный) / В. В. Тур, С. С. Дереченик, О. П. Мешик [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2015 – 229 с.
2. Воздействие на конструкции. Общие воздействия. Снеговые нагрузки : СН 2.01.04-2025. – Минск : Минстройархитектуры, 2025. – 17 с.
3. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 : СП 20.13330.2016. – Введ. 04.06.2017. (в ред. изменения № 3 от 30.12.2020). – М. : МинСтрой России, 2020. – 147 с.
4. Eurocode 1 : Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads : EN 1991-1-3 : 2003 + AC : 2009.
5. National Research Council of Canada. National building code of Canada 2015. – National Research Council Canada, Ottawa, Includes Revisions and Errata released on September 28, 2018. – 1412 p.
6. ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and other Structures. USA: ASCE, 2017. – 889 p.

7. О разработке Национальных приложений к частям ЕН 1991-1-3, ЕН 1991-1-4 Еврокода 1 "Общие воздействия", устанавливающим требования к нормированию значений климатических воздействий / В. В. Тур, Е. Жураньски, С. С. Дереченик, А. В. Черноиван // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. тр. : в 2 ч. / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Институт БелНИИС ; редкол.: М. Ф. Марковский [и др.]. – Минск : Минсктиппроект, 2009. – Ч. 1. – С. 424–457.
8. Строительные нормы. Основы проектирования строительных конструкций : СН 2.01.01-2022. – Введ. 30.06.2022. – Минск : Минстройархитектуры, 2022. – 65 с.
9. Мешик, О. П. Климатический мониторинг / О. П. Мешик // Природообустройство Полесья = Environmental Engineering in Polesye : монография : в 4 кн. / под общ. науч. ред. Ю. А. Мажайского [и др.]. – Рязань : Мещерский филиал ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова, 2017–2019. – Кн. 1 : Белорусское Полесье, т. 1 : Природно-ресурсный потенциал. – 2018. – С. 164–167.
10. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 1: Воздействия на сооружения. Стандарты EN1991-1-1 и 1-3-1-7 : пер. с англ. / Х. Гульванесян, П. Формичи, Ж.-А. Калгаро при участии Джеоффа Хардинга (часть 7) ; М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО. Моск. гос. строит. университет – науч. ред. пер. канд. техн. наук Н.А. Попов, канд. техн. наук И. В. Лебедева при участии канд. физ.-мат. наук И. А. Кириллова (часть 7). – М. : МГСУ, 2011. – 340 с.
11. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В. Н. Гордеев, А. И. Лантух-Лященко, В. А. Пашинский [и др.] ; под общ. ред. А. В. Перельмутера. – изд. 3-е перераб. – М. : Изд-во АСВ, изд-во СКАД СОФТ, изд-во ДМК Пресс, 2009. – 528 с.
12. ASCE STANDART. Wind tunnel testing for buildings and other structures. : ASCE/SEI – 49-21. – American Society of Civil Engineers, 2021. – 81 p.
13. Строительные нормы Республики Беларусь. Техническое состояние зданий и сооружений : СН 1.04.01-2020 – Минск : Минстройархитектуры, 2021. – 68 с.
14. Использование системы мониторинга горизонтальных стальных строительных конструкций для предотвращения чрезвычайных ситуаций, вызванных снеговой нагрузкой / В. С. Рудольф, А. А. Кондратович, А. А. Каминский [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 53–66.
15. DIN EN 1991-1-3 : 2023 Eurocode 1 : Auswirkungen auf Konstruktionen. Teil 1-3 : Allgemeine Schritte. Schneelast; Deutsche und englische Version von prEN 1991-1-3 : 2023.
16. NF P06-113-1/NA / A2 * NF EN 1991-1-3/NA/A2 : 2022 Eurocode 1 - Effets sur la structure-Partie 1-3 : effets Généraux - charges de Neige-annexe Nationale NF EN 1991-1-3 : 2004-effets Généraux-charges de Neige.
17. UNI EN 1991-1-3 : 2015 Eurocodice 1 – impatti strutturali – Parte 1–3 : impatti Generali-carichi di neve.
18. UNE-EN 1991-1-3 : 2018 eurocódigo 1. Impacto en la construcción. Parte 1-3. Acciones comunes. Cargas de nieve.
19. DS/EN 1991-1-3 / AC : 2010 Eurocode 1. Virkninger på strukturer. Del 1-3. Generelle handlinger. Sne belastninger.
20. LST EN 1991-1-3-2004 / AC-2009 Eurocode 1. Poveikis konstrukcijoms. 1-3 dalis. Bendri veiksmi. Sniego apkrovos.
21. Eurocode 1 : Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads : EN 1991-1-3 : 2003 + AS : 2009.
22. National Research Council of Canada. National building code of Canada 2015. – National Research Council Canada, Ottawa, Includes Revisions and Errata released on September 28, 2018. – 1412 p.
23. ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and other Structures. USA: ASCE, 2017. – 889 p.
24. O razrabotke Nacional'nyh prilozhenij k chastyam EN 1991-1-3, EN 1991-1-4 Evrokoda 1 "Obshchie vozdejstviya", ustanavlivayushchim trebovaniya k normirovaniyu znachenij klimaticheskikh vozdejstvij / V. V. Tur, E. ZHuran'ski, S. S. Derechenik, A. V. CHernoivan // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : sb. tr. : v 2 ch. / Ministerstvo arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus', Institut BelNIIS ; redkol.: M. F. Markovskij [i dr.]. – Минск : Minskipproekt, 2009. – CH. 1. – S. 424–457.
25. Stroitel'nye normy. Osnovy proektirovaniya stroitel'nykh konstrukcij : SN 2.01.01-2022. – Vved. 30.06.2022. – Минск : Minstrojarchitektury, 2022. – 65 s.
26. Meshik, O. P. Klimaticheskij monitoring / O. P. Meshik // Prirodobustrojstvo Poles'ya = Environmental Engineering in Polesye : monografiya : v 4 kn. / pod obshch. nauch. red. YU. A. Mazhayskogo [i dr.]. – Ryazan' : Meshcherskij filial VNIIGiM im. A. N. Kostyakova, 2017–2019. – Kn. 1 : Belorusskoe Poles'e, t. 1 : Prirodno-resursnyj potencial. – 2018. – S. 164–167.
27. Rukovodstvo dlya proektirovshchikov k Evrokodu 1: Vozdejstviya na sooruzheniya. Standarty EN1991-1-1 i 1-3-1-7 : per. s angl. / H. Gul'vanesyan, P. Formichi, ZH.-A. Kalgaro pri uchastii Dzeoffa Hardinga (chast' 7) ; M-vo obrazovaniya i nauki Ross. Federacii, FGBOU VPO. Mosk. gos. stroit. universitet – nauch. red. per. kand. fiz.-mat. Nauk I. A. Kirillova (chast' 7). – М. : MGSU, 2011. – 340 s.
28. Nagruzki i vozdejstviya na zdaniya i sooruzheniya / V. N. Gordeev, A. I. Lantuh-Lyashchenko, V. A. Pashinskij [i dr.]; pod obshch. red. A. V. Perel'mutera. – izd. 3-e pererab. – М. : Izd-vo ASV, izd-vo SKAD SOFT, izd-vo DMK Press, 2009. – 528 s.
29. ASCE STANDART. Wind tunnel testing for buildings and other structures. : ASCE/SEI – 49-21. – American Society of Civil Engineers, 2021. – 81 p.
30. Stroitel'nye normy Respubliki Belarus'. Tekhnicheskoe sostoyanie zdaniy i sooruzhenij : SN 1.04.01-2020 – Minsk : Minstrojarchitektury, 2021. – 68 s.
31. Ispolzovanie sistemy monitoringa gorizonta'lnyh stal'nykh stroitel'nykh konstrukcij dlya predotvrashcheniya chrezvychajnykh situacij, vyzvannykh snegovoj nagruzkoj / V. S. Rudol'f, A. A. Kondratovich, A. A. Kaminskij [i dr.] // Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MCHS Belarusi. – 2018. – T. 2, № 1. – S. 53–66.
32. DIN EN 1991-1-3 : 2023 Eurocode 1 : Auswirkungen auf Konstruktionen. Teil 1-3 : Allgemeine Schritte. Schneelast; Deutsche und englische Version von prEN 1991-1-3 : 2023.
33. NF P06-113-1/NA / A2 * NF EN 1991-1-3/NA/A2 : 2022 Eurocode 1 - Effets sur la structure-Partie 1-3 : effets Généraux - charges de Neige-annexe Nationale NF EN 1991-1-3 : 2004-effets Généraux-charges de Neige.
34. UNI EN 1991-1-3 : 2015 Eurocodice 1 – impatti strutturali – Parte 1–3 : impatti Generali-carichi di neve.
35. UNE-EN 1991-1-3 : 2018 eurocódigo 1. Impacto en la construcción. Parte 1-3. Acciones comunes. Cargas de nieve.
36. DS/EN 1991-1-3 / AC : 2010 Eurocode 1. Virkninger på strukturer. Del 1-3. Generelle handlinger. Sne belastninger.
37. LST EN 1991-1-3-2004 / AC-2009 Eurocode 1. Poveikis konstrukcijoms. 1-3 dalis. Bendri veiksmi. Sniego apkrovos.

References

1. Tur, V. V. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote po teme «Povedenie issledovaniy izmeneniya klimaticheskikh vozdejstvij na stroitel'nye konstrukcii v Respublike Belarus' s cel'yu vneseniya izmenenij v dejstvuyushchie TNPA» (zaklyuchitel'nyj) / V. V. Tur, S. S. Derechenik, O. P. Meshik [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2015 – 229 s.
2. Vozdejstviya na konstrukcii. Obshchie vozdejstviya. Snegovye nagruzki : SN 2.01.04-2025. – Минск : Minstrojarchitektury, 2025. – 17 s.
3. Svod pravil. Nagruzki i vozdejstviya. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.01.07-85 : SP 20.13330.2016. – Vved. 04.06.2017. (v red. izmeneniya № 3 ot 30.12.2020). – М. : MinStroj Rosii, 2020. – 147 s.

Материал поступил 25.03.2025, одобрен 09.04.2025, принят к публикации 09.04.2025

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАДКИ ФУНДАМЕНТОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА

Н. Н. Шалобыта¹, П. С. Пойта², Т. П. Шалобыта³

¹ К. т. н., доцент, проректор по научной работе, УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь, e-mail: nnshalobyta@mail.ru

² Д. т. н., профессор, профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ppsbrest@mail.ru

³ К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: t_shalobyta@mail.ru

Реферат

Осадка фундаментов – критически важный параметр при оценке устойчивости и долговечности зданий. Для эксплуатируемых сооружений мониторинг осадки требует особого подхода, так как традиционные методы (например, статические испытания) могут быть неприменимы из-за риска повреждения конструкций. Одним из методов проверки предельных состояний конструкций зданий и сооружений для подтверждения их работоспособности и поведения под нагрузкой является проверка на основе результатов испытаний [1]. Метод нагружения, основанный на контролируемом приложении полезной нагрузки к фундаменту с последующим измерением деформаций, позволяет оценить поведение основания здания и прогнозировать их поведение под нагрузкой, при этом минимизировать риски деформаций и разрушений конструкций, а также оптимизировать затраты при проведении проектных работ при модернизации (реконструкции) здания. Современные технологии, такие как геодезический мониторинг с использованием электронных тахеометров, GPS-датчиков и волоконно-оптических систем, обеспечивают непрерывный контроль осадки в реальном времени. Эти данные интегрируются с численным моделированием в программных комплексах (например, PLAXIS или MIDAS), что позволяет уточнить прогнозы и адаптировать конструкцию фундамента под изменяющиеся условия.

Экспериментальные исследования осадки фундаментов многофункционального центра включали установку измерительных устройств (геодезических марок) на колоннах исследуемых фундаментов с геодезическим мониторингом, с применением электронных тахеометров. Нагрузка создавалась поэтапно с использованием гидробалласта, установленного на перекрытии здания. После каждого этапа нагружения фиксировались вертикальные перемещения, что позволило построить графики «нагрузка – осадка» и определить деформации грунта. Данный метод показал свою эффективность для исследуемого здания, так как сочетал достаточную точность с минимальными рисками. Однако его применение требует комплексного подхода: комбинации геотехнических расчётов, современных средств мониторинга и адаптации к условиям конкретного объекта. Метод нагружения занимает промежуточное положение между теоретическими моделями и полевыми испытаниями, обеспечивая баланс между практичностью и надёжностью.

Ключевые слова: основания и фундаменты, инженерно-геологические условия, деформации, несущий слой грунта, осадки зданий и сооружений, неравномерность осадок.

EXPERIMENTAL STUDIES OF FOUNDATION PRECIPITATION MULTIFUNCTIONAL CENTER

N. N. Shalobyta, P. S. Poyta, T. P. Shalobyta

Abstract

Foundation sedimentation is a critical parameter in assessing the stability and durability of buildings. For operational structures, precipitation monitoring requires a special approach, since traditional methods (for example, static tests) may not be applicable due to the risk of structural damage. One of the methods of checking the proper conditions of structures of buildings and structures to confirm their operability and behavior under load is verification based on test results [1]. The loading method, based on the controlled application of a payload to the foundation followed by the measurement of deformations, makes it possible to evaluate the behavior of the building's foundation and predict their behavior under load, while minimizing the risks of deformations and structural failures, as well as optimizing costs during design work during the modernization (reconstruction) of the building. Modern technologies such as geodetic monitoring using electronic total stations, GPS sensors and fiber-optic systems ensure continuous monitoring of precipitation in real time. These data are integrated with numerical modeling in software complexes (for example, PLAXIS or MIDAS), which makes it possible to refine forecasts and adapt the foundation structure to changing conditions. Experimental studies of the precipitation of the foundations of the multifunctional center included the installation of measuring devices (geodetic grades) on the columns of the studied foundations with geodetic monitoring, using electronic total stations. The load was created in stages using a hydraulic ballast installed on the ceiling of the building. After each stage of loading, vertical movements were recorded, which made it possible to plot load-sediment graphs and determine soil deformations. This method proved to be effective for the building under study, as it combined sufficient accuracy with minimal risks. However, its application requires an integrated approach: a combination of geotechnical calculations, modern monitoring tools and adaptation to the conditions of a particular facility. The loading method occupies an intermediate position between theoretical models and field tests, providing a balance between practicality and reliability.

Keywords: foundations and foundations, engineering and geological conditions, deformations, bearing soil layer, precipitation of buildings and structures, uneven precipitation.

Введение

При выполнении исследований инженерно-геологических условий строительных площадок для проектирования конкретных объектов и их строительства необходимо отметить неопределенность свойств и недостаточную изученность физической сущности процессов и причин развития осадок фундаментов, в том числе неравномерных, учесть при расчетах значительное количество различных факторов, обеспечивающих прочность и надежность эксплуатируе-

мого объекта в течение всего периода его службы [2–6]. Строительство зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях в ряде случаев являются причиной развития чрезмерно больших неравномерных деформаций, приводящих к потере несущей способности отдельных элементов каркаса зданий, а иногда и к авариям зданий [7–11].

Сложность инженерно-геологических условий в большинстве случаев характеризуется неоднородностью основания, обусловлен-

Строительство

ной наличием выстилающих слоев, линзообразным их залеганием при различной мощности, плотности сложения, деформируемости, неодинаковой уплотняемости во времени при различных по величине давлениях от фундаментов.

В процессе возрастания нагрузки на фундаменты, как показано на численных примерах [2], деформационные свойства грунта изменяются. И здесь очень важно знать, какая чувствительность здания, сооружения к деформированию основания, как это влияет на его поведение. Численное решение этой задачи получено с использованием эталона системы «основание – фундамент – сооружение»; представляющего собой точное решение задачи в условиях плоской деформации для упрощенной схемы сооружения в виде плиты конечной жесткости в качестве фундамента, находящейся на основании, представленном трехпараметрической контактной моделью. На фундаменте установлены сжимаемые опоры, на которых расположено верхнее строение в виде плиты конечной жесткости. Результаты расчетов свидетельствуют, что опоры контактных давлений по подошве фундаментной плиты при жесткости верхнего строения D_s , равной соответственно $6D$ и $5D$, практически совпадают, а это означает, что распределение контактных давлений по подошве фундамента не чувствительно к величине реальной жесткости верхнего строения [2].

В то же время проведенные экспериментально-теоретические исследования выявили нелинейный характер перераспределения усилий в зависимости от жесткости надземных конструкций. С увеличением их жесткости разность осадок здания уменьшается, дополнительные усилия в конструкциях возрастают [3, 13]. При относительной разности осадок стремящейся к нулю, роста дополнительных усилий в конструкциях здания при увеличении жесткости практически не происходит. Очевидно, при изучении процессов развития во время деформаций системы «основание – фундамент – сооружение» используются различные подходы, методы.

Возможности применения теоретических решений по отношению к сооружениям, обладающих некоторой ограниченной общей жесткостью еще не достаточны. Использование моделей сооружений для рассматриваемых целей затруднительно, а перенос получаемых с их помощью результатов на натурные условия сложен, особенно при рассмотрении оснований, сложенных слабыми грунтами, характеризующимися большой неоднородностью. Именно в таких условиях расчеты развития во времени длительных неравномерных осадок особенно актуальны. В связи с этим важное значение с целью совершенствования расчетов развития осадок приобретают методы исследований, основанные на использовании результатов обработки геодезических наблюдений как в период строительства зданий, так и в период их эксплуатации. Именно данные геодезических наблюдений являются критерием правильности инженерных решений, принятых в качестве всех основных теоретических положений [5, 11–13].

Такие исследования позволяют получить более полную и достоверную информацию о совместной работе сооружений и их оснований, а также более точные исходные данные для инженерных расчетов осадок проектируемых сооружений, поскольку они определены на реальных объектах, возводимых в конкретных инженерно-геологических условиях. Накопление таких данных благоприятствует их последующей группировке, выполняемой с учетом вида сооружений, конструктивных решений фундаментов, грунтовых условий, что расширяет возможности, достоверность практических расчетов осадок во времени [5, 7, 9].

С учетом этого нами выполнены экспериментальные исследования осадки фундаментов здания многофункционального центра. С этой целью выбраны экспериментальные площадки для нагружения фундаментов, определены места установки осадочных марок, разработана методика последовательности нагружения фундаментов и снятия отсчетов по осадочным маркам, предложена методика обработки полученных результатов. Проведен анализ характера развития осадок фундаментов, установлен ряд факторов, влияющих на величину осадки [11]. Основной причиной осадок являются биогенные грунты, представленные торфом. Его толщина в пределах активной зоны составляет от 32,0 до 89,0 %. В ряде случаев торф является несущим слоем свайных фундаментов. Установлено, что при нагружении переменной нагрузкой первой

площадки имеет место стабилизация осадки во времени. Вместе с тем приложенная нагрузка вызывает осадки не только нагруженных фундаментов, но и фундаментов, удаленных от площадки на значительном расстоянии (до 80 м). Нагружение второй, а тем более третьей площадок вызывает прогрессирующий рост осадок практически по всем фундаментам, удаленным от нагруженных площадок. Величина осадки зависит от несущего слоя грунта [8, 11, 14, 22]. Осадки максимальные, если несущим слоем являются торфы. Наличие деформационных швов между нагруженными полезной нагрузкой фундаментами и фундаментами без нагрузки не оказывает существенного влияния на характер и величину осадки. Фактором, снижающим величину неравномерных осадок, является жесткость каркаса здания.

Строительство и эксплуатация зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях в ряде случаев являются основной причиной развития чрезмерно больших и неравномерных деформаций, приводящих к потере несущей способности конструкций каркаса зданий, а иногда к авариям.

Конструктивное решение здания и инженерно-геологические условия

Многофункциональный центр представляет собой здание прямоугольной формы в плане с размерами 120,0 x 302,0 м при высоте 25 м. В осях 1–14 здание одноэтажное со встроенным антресольным техническим этажом с сеткой колонн 12,0 x 18,0 м имеет высоту до низа парапета 13,5 м [19–21]. Двухэтажная часть здания располагается в осях 15–41 при ячеек колонн каркаса 12,0 x 9,0 м на первом этаже и 12,0 x 18,0 м на втором.

Здание многопролетное, запроектировано в смешанном железобетонном каркасе: железобетонные колонны, монолитные железобетонные ребристые (кессонного типа) перекрытия (в двухэтажной части) и металлические конструкции покрытия. Фундаменты – монолитные железобетонные ростверки на свайном основании из набивных свай в выштампованных скважинах, имеющих форму усеченного конуса и имеющих жесткое сопряжение с ростверком. Пространственная жесткость каркаса здания обеспечивается жестким сопряжением узлов стыковки колонн с монолитными ростверками и балочным диском перекрытия, а так же диафрагмами жесткости в виде лестничных клеток.

Здание разделено на три функциональных блока, каждый из которых, в свою очередь, разделен на несколько температурных отсеков с устройством деформационных швов на парных колоннах.

Экспериментальные исследования развития осадок фундаментов во времени от действия возрастающей полезной нагрузки выполнены для части здания многофункционального центра в осях 15–28/Б-Ф (рисунк 1), т. е. его двухэтажной части. Выбор данной части здания для наблюдений за осадками обоснован наличием в основании свайных фундаментов слабых биогенных грунтов, обладающих большой сжимаемостью и неоднородностью залегания. Мощность данных грунтов в пределах активной зоны составляет от 32 до 89 %.

Физико-механические характеристики грунтов, полученные в результате уточненных инженерно-геологических исследований, приведены в таблице 1. Как видно из таблицы 1, инженерно-геологические условия площадки, отведенной под строительство многофункционального центра, представлены техногенными, озерно-болотными и моренными отложениями до разведенной глубины 20,0 м [15]. В данных инженерно-геологических условиях запроектированы фундаменты из набивных конических свай в выштампованных скважинах длиной 8,0 м.

Насыпные грунты по своему составу, сложению и физико-механическим свойствам резко отличаются от естественных отложений. Характерным для таких грунтов является то, что по своему составу они чаще всего неоднородны и содержат включения неорганических и органических материалов, распределенных хаотично по всему объему насыпи. В насыпных грунтах постоянно происходят различные физические, физико-химические, биологические и другие процессы, приводящие, с одной стороны, к их самоуплотнению, упрочнению и, с другой – разупрочнению, распаду, разложению, как структуры отдельных агрегатов, так и отдельных частиц [3]. Именно

наличие таких техногенных, несменявшихся грунтов, состоящих преимущественно из смеси супеси, песков разнородных, загрязненных строительным мусором (щебень, валуны, древесная щепа, куски бревен, битый кирпич, куски бетона), расположенных с поверхности либо ниже растительного слоя, характерно расположению под значительной частью рассматриваемого многофункционального центра. Ниже, как правило, расположены суглинки лессовидные, туго- и мягкопластичной консистенции, различной мощности, с включениями прослоек и линз, состоящих из песков маловлажных, влажных и водонасыщенных, и супеси различной консистенции. Под лессовидными и насыпными грунтами обнаружены суглинки с включениями органических веществ, с примесью супесей и линз песков влажных и водонасыщенных. В толще болотных отложений вскрыты линзы и прослойки торфа слабой и средней степени разложения и заторфованных грунтов, а также линзы песков средних и мелких, чаще водонасыщенных. Мощность озерно-болотных отложений составляет 0,9...14,4 м [15]. Под лессовидными, а в местах их отсутствия – под озерно-болотными отложениями, вскрыты конечно-моренные грунты, представленные песками пылеватыми, мелкими, средними, крупными от маловлажных до водонасыщенных. Местами расположены глинистые грунты, представленные супесями моренными пластичной консистенции. В толще моренных супесей и песков встречаются валуны. Видимой закономерности в распространении песчаных и глинистых грунтов не наблюдается.

Подземные воды приурочены к прослойкам и линзам песков в толще лессовидных, озерно-болотных и моренных супесей, суглинков. Гидрогеологические условия характеризуются наличием подземных вод спорадического распространения. Они встречаются на глубине 1,0...7,7 м. В некоторых местах подземные воды обладают напором [15]. Так как инженерно-геологические условия строительной площадки многофункционального центра представлены на значительную глубину специфическими грунтами, обладающими небольшой прочностью и высокой сжимаемостью, то в соответствии с [11] площадка характеризуется III категорией сложности основания.

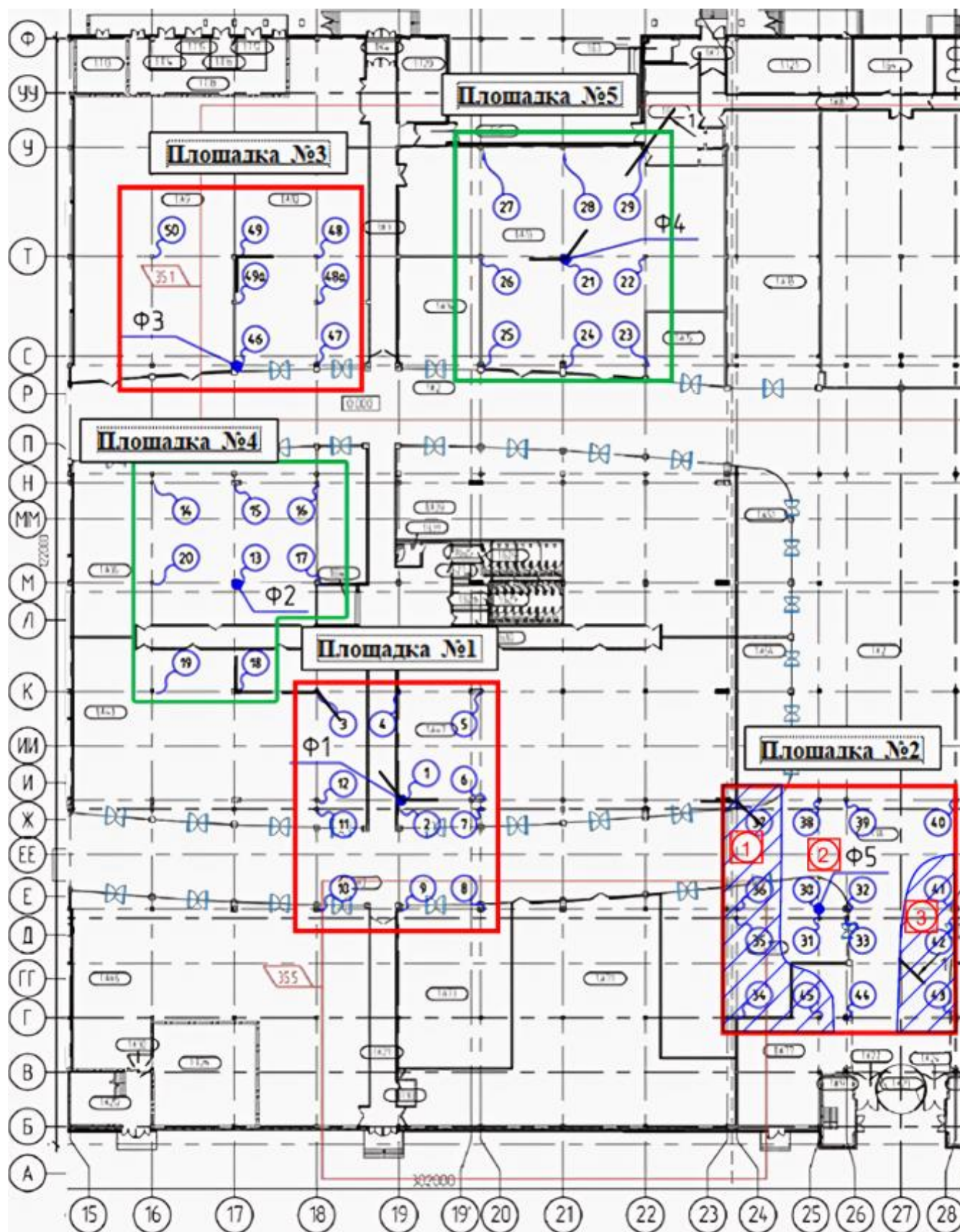
Выполненный нами анализ глубины погружения свай показал, что в ряде случаев их нижние концы опираются на супесь лессовидную слабую и торфы. В некоторых случаях торфы расположены в пределах длины свай и на различных глубинах, не выходящих за пределы активной зоны. Нагрузка на фундаменты в рассматриваемой части здания колеблется от 1500 кН до 3500 кН на колонну. Строительство здания завершено несколько лет назад, но в эксплуатацию не введено.

Учитывая инженерно-геологические условия в рассматриваемой части здания и конструкцию свайных фундаментов, для подтверждения работоспособности и поведения конструкций под нагрузкой [1], а также с целью ввода в эксплуатацию объекта, нами разработана программа и проведены экспериментальные исследования развития осадок фундаментов при их нагружении полезной нагрузкой. Нагрузка прикладывалась последовательно во времени: сначала на площадке № 1, затем на 30-й день от начала испытаний на площадке № 2 и на 61-й день на площадке № 3 (рисунок 1).

Следует отметить, что первые две площадки вначале нагружали полезной нагрузкой 4,0 кН/м², которую затем увеличивали до 6,0 кН/м². Для площадки № 3 сразу планировалось загрузку нагрузкой 6,0 кН/м². Вся нагрузка на трех площадках была снята на 73-й день от начала испытаний. В течение всего периода проведения испытаний велись геодезические наблюдения за осадками фундаментов с определенной цикличностью. Последние отсчеты были сняты через одну неделю после разгрузки всех трех площадок. Наблюдение за осадками велись с использованием деформационных марок не только в местах приложения нагрузки, но и на двух площадках, свободных от нагрузки: площадки № 4 и № 5 (рисунок 1). Расстояние между нагружаемыми площадками № 1 и № 2 составило 51 м, а между площадками № 2 и № 3 – 60 м. Удаление свободной от нагрузки площадки, на которой велось измерение осадок фундаментов, равнялось 31 м от площадки № 1 и 36 м от площадки № 3. Удаление второй, свободной от нагрузки, площадки равно 37 м от площадки № 3 и 66 м и 78 м соответственно от площадок № 1 и № 2.

Таблица 1 – Нормативные и расчетные характеристики грунтов

МГ	Грунт	Удельный вес, кН/м³			Удельное сцепление, кПа			Угол внутреннего трения, градус			Модуль деформации Е, МПа
		γп	γII	γI	Cп	CII	CI	φп	φII	φI	
Техногенные (искусственные) образования											
1а	Насыпной грунт песчаный	17,9	17,8	17,8	—	—	—	—	—	—	—
1б	Насыпной грунт глинистый	19,5	19,3	19,3	—	—	—	—	—	—	—
Лессовидные отложения											
2а	Супесь лессовидная слабая	19,5	19,4	19,4	19	19	13	23	23	20	3,5
2	Супесь лессовидная средней прочности (1,0 ≤ qс ≤ 2,5 МПа)	19,5	19,4	19,4	20	20	13	17	17	15	10
3	Супесь лессовидная средней прочности (2,5 < qс ≤ 4,6 МПа)	19,5	19,3	19,1	26	26	17	21	21	18	20
Озерные, аллювиальные, болотные отложения											
4а	Суглинок слабый	19,0	18,9	18,8	13	13	9	22	22	19	4,3
4б	Суглинок средней прочности	19,1	18,9	18,8	20	20	13	17	17	15	10
4в	Суглинок прочный	19,9	19,7	19,6	28	28	19	22	22	19	31
4	Суглинок с растительными остатками (qс ≤ 3,0 МПа)	19,0	18,8	18,8	18	18	12	17	17	15	7
5	Суглинок с растительными остатками (qс >3,0 МПа)	19,1	18,9	18,8	26	26	17	21	21	18	24
6	Суглинок заторфованный (qс < 3,0 МПа)	16,3	15,9	15,6	20	20	13	11	11	9,6	6
7	Суглинок заторфованный (qс > 3,0 МПа)	16,3	15,9	15,6	22	22	15	12	12	10	15
8	Торф	9,6	9,3	9,2	18	18	12	22	22	19	4
Конечно-моренные отложения											
9а	Супесь слабая	21,7	21,7	21,7	22	22	15	30	30	27	7,1
9	Супесь средней прочности	21,7	21,7	21,7	25	25	16,7	26	26	23	8



1 ; 2 ; 3 – номера зон площадки №2; 1 – позиция осадочного репера

Рисунок 1 – Схема расположения площадок с полезной нагрузкой и осадочными марками

Измерения осадок выполнялись геометрическим нивелированием II класса повышенной точности. Средняя квадратичная ошибка, являющаяся критерием точности, не превышала величины $\pm 0,3$ мм.

В качестве исходной высотной основы использованы три ственных репера, заложенных в монолитной подпорной стенке, расположенной на расстоянии 90 м от здания. Отметка исходного репера на нулевом цикле наблюдений была определена с помощью двухчастотного спутникового приемника в режиме реального времени.

Результаты экспериментальных исследований

Сооружения, возведенные на грунтах с модулем деформации E менее 5,0 МПа, испытывают чрезмерные осадки, обусловленные высокой сжимаемостью грунтов. В соответствии с [16] такие грунты относятся к очень сильно деформируемым. Отметим, что при изменении E от 5,0 МПа до 10,0 МПа грунты относятся к сильно деформируемым. Грунты с примесью растительных остатков, заторфованные, торфы, характеризующиеся в естественном состоянии большой пористостью и повышенной способностью к влагоудержанию за счет гидрофильности органических веществ, приобретают несколько большее сцепление при длительном уплотнении под нагрузкой [6–8, 14]. Однако угол внутреннего трения в процессе уплотнения остается постоянным. Это означает, что такие грунты имеют малую прочность. Учитывая наличие в основании фундаментов большого разнообразия грунтов, в том числе сильносжимаемых, следует ожидать значительных осадок фундаментов, включая неравномерные.

Неравномерность осадок зданий в основном возникает в период строительства. Максимальная разность в осадках зависит от средней осадки. С ростом средней осадки разность осадок возрастает и стремится к своей предельной величине, определяемой жесткостью здания [5].

Среднюю осадку группы фундаментов в пределах экспериментальных площадок определяли по формуле

$$S = \frac{\sum S_i \cdot A_i}{\sum A_i},$$

где S_i – осадка i -го фундамента;

A_i – площадь условного фундамента.

Графики развития осадки фундаментов на нагружаемых площадках приведены на рисунке 2. Их анализ показывает, что при нагрузке 4,0 кН/м², в пределах площадки № 1 осадка фундаментов имеет тенденцию к стабилизации, и даже рост нагрузки до 6,0 кН/м² не меняет её характера. Приращение осадки между 14 и 30 сутками составило 0,12 мм. Предполагаемая траектория развития осадки показана условно на участке А. Однако на 30-й день испытаний была приложена нагрузка интенсивностью 4,0 кН/м² на площадке № 2, и это вызывает прогрессирующий рост осадки фундаментов, расположенных в пределах площадки № 1. Её рост составил 1,4 мм, что в 1,61 раза больше осадки от нагрузки в 6 кН/м², приложенной на площадке № 1. Повышение полезной нагрузки до 6,0 кН/м² на площадке № 2 увеличивает осадку фундаментов на площадке № 1, но её прогрессирующий рост несколько возрастает. Практически за неделю наблюдений её приращение составило 0,13 мм. Рост осадки за этот период времени составил 1,06 мм. И, наконец, нагружение площадки № 3 нагрузкой 6,0 кН/м² вызывает прогрессирующий рост осадки фундаментов на площадке № 1. Её приращение составило 1,1 мм, что больше, чем до приложения нагрузки, почти в 1,4 раза. Весьма примечательным является тот факт, что после снятия нагрузки на всех трех площадках рост деформаций не прекратился, и за неделю приращение осадки составило 0,6 мм.

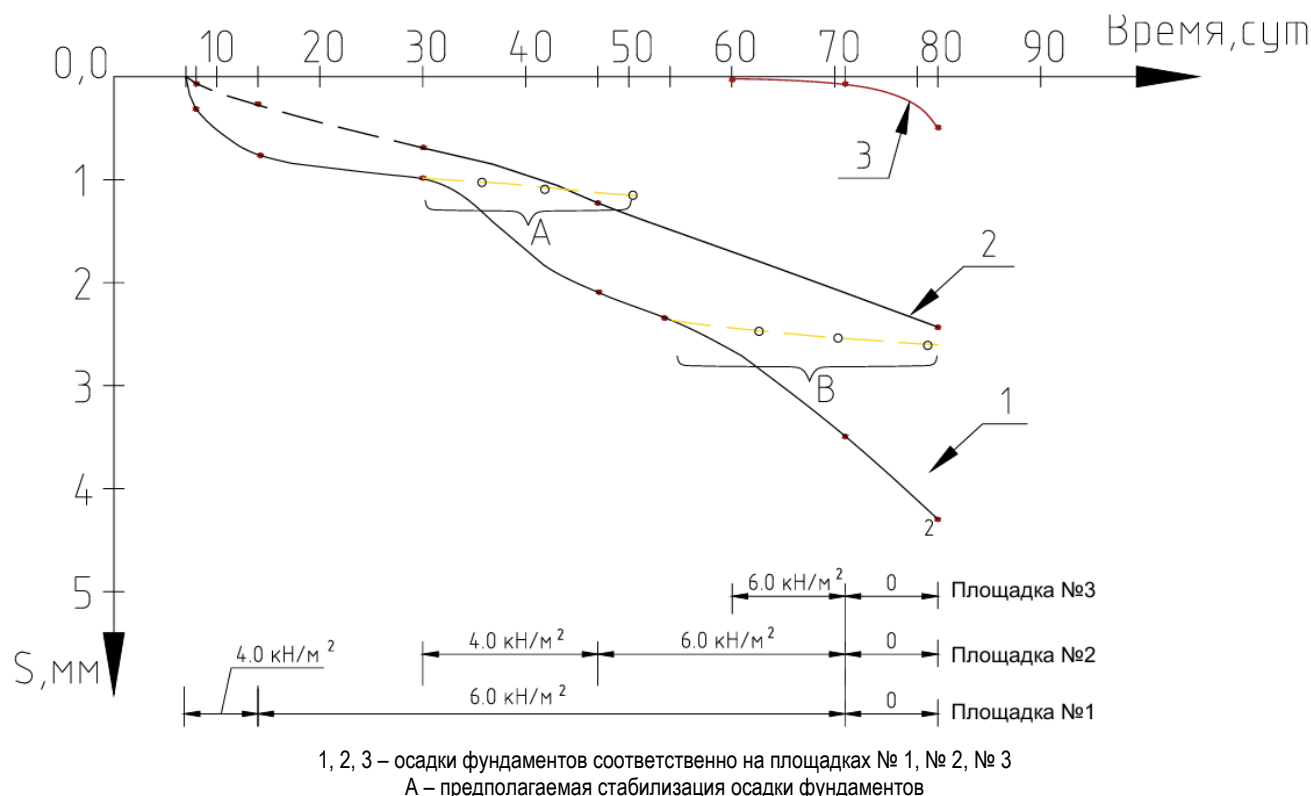


Рисунок 2 – Развитие осадки фундаментов на нагруженных площадках № 1–3 во времени (а); порядок приложения полезной нагрузки

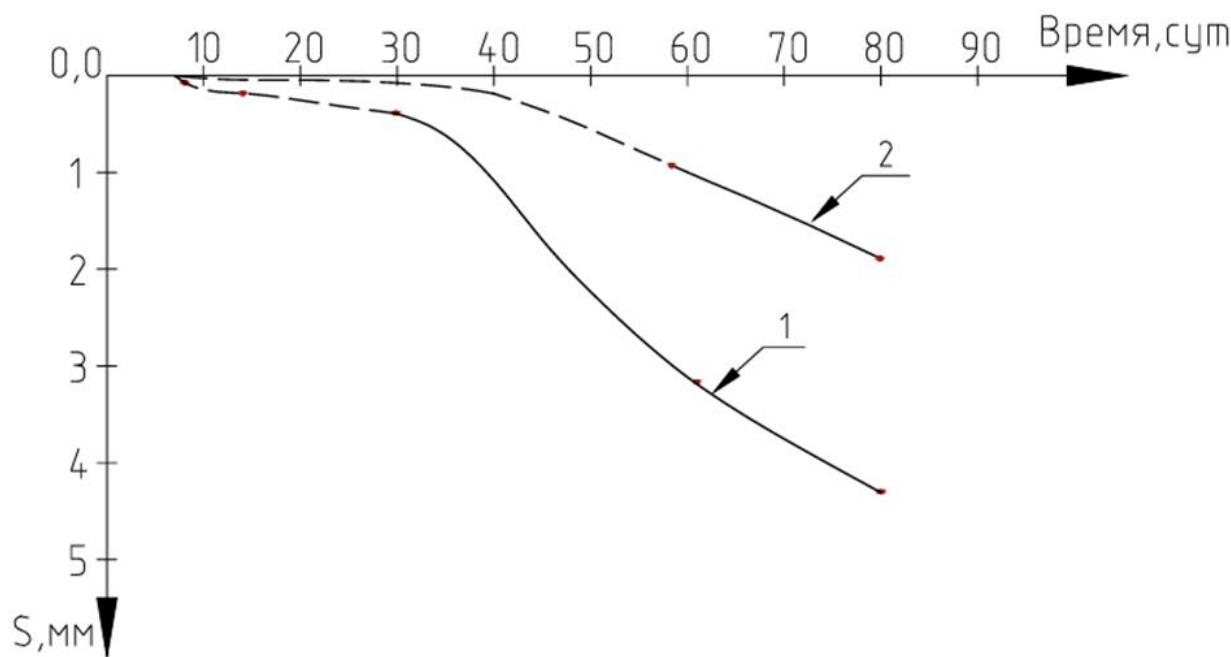
Несколько другой характер развития осадки фундаментов, расположенных в пределах площадки № 2 (кривая 2). Из графика видно, что при нагружении площадки № 1 (на площадке № 2 нагрузка отсутствует), идет рост осадки фундаментов, расположенных в пределах площадки № 2. При нагружении площадки № 2 вначале нагрузкой 4,0 кН/м², а затем дополнительной 2,0 кН/м², тенденция роста осадки

сохраняется одинаковой. После разгрузки всех площадок характер роста осадки практически не изменяется. Следует отметить, что при различных рассмотренных вариантах действия нагрузки осадка фундаментов, расположенных в пределах площадки № 2, меньше, чем в пределах площадки № 1. Если на 30 сутки от начала испытаний это различие составляло 1,4 раза, то на 73-е сутки – 1,8 раза.

Это различие не изменялось и после недельного перерыва после снятия всей нагрузки.

Нагружение первых двух площадок практически не оказало никакого влияния на осадку фундаментов, расположенных в пределах площадки № 3. Нагружение этой площадки нагрузкой $P = 6,0 \text{ кН/м}^2$ вызвало осадку фундаментов $0,3 \text{ мм}$, такое же приращение осадки получено после снятия нагрузки со всех площадок. На рисунке 3 показаны графики развития осадок фундаментов, размещенных на площадках № 4 и № 5, свободных от нагрузки. Кривая 1 дублирует в значительной степени график осадки фундаментов на площадке № 1, с той лишь разницей, что в начальный период величины S меньше. На 30-й день испытаний различие в осадках равно $1,3$ раза, на 47-й день – почти $2,6$ раза; на 54-й день – осадки практически равны, а далее рост осадки ненагруженных

фундаментов незначителен, но опережает величины нагруженных фундаментов. На 5-й площадке при нагружении площадки № 1 нагрузкой $6,0 \text{ кН/м}^2$ осадки фундаментов почти отсутствуют. Их рост проявляется только при нагружении площадки № 2. Нагружение площадки № 3 на величину осадки практически не повлияло. Различия в осадках фундаментов этих двух площадок увеличивается по мере роста нагрузок. На 40-й день испытаний различие в осадках фундаментов площадок № 4 и № 5 составляет $3,9$ раза, на 60-й день – $3,0$ раза, на 80-й – $2,2$ раза. Анализ полученных осадок фундаментов показывает, что их величина и характер распределения свидетельствует о значительной неоднородности грунтового основания по сжимаемости, что оказывает значимое влияние на деформирование системы «основание – фундамент – сооружение».



1 – осадка фундаментов на площадке № 4; 2 – осадка фундаментов на площадке № 5
Рисунок 3 – Развитие осадки фундаментов во времени на площадках № 4 и № 5 при отсутствии полезной нагрузки

Степень изменения сжимаемости основания в пределах здания в плане определяется коэффициентом

$$\alpha_E = \frac{E_{\max}^{np}}{E_{\min}^{np}},$$

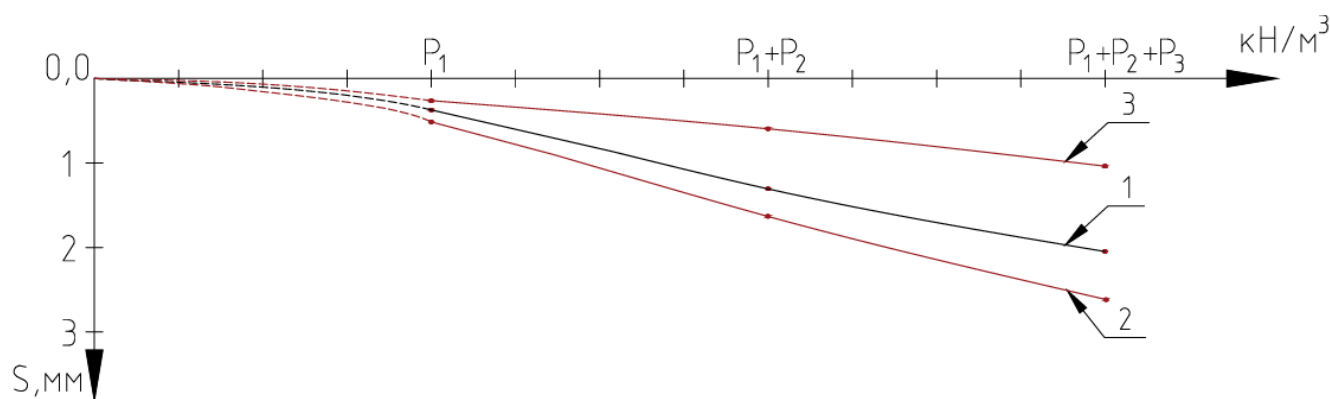
где $E_{\max}^{np}$ и $E_{\min}^{np}$ – соответственно значения наибольшего и наименьшего приведенных по расчетным вертикалям, модулей деформации грунта.

Значение α_E , полученное в результате вычислений, равно $5,23$, что свидетельствует о неоднородности основания [11]. Такая неоднородность объясняется весьма значительным разбросом различных по сжимаемости грунтов в пределах пятна исследуемой части здания. В пределах активной зоны находятся слабые грунты с модулем деформации от $3,5 \text{ МПа}$ до $6,0 \text{ МПа}$, соответственно очень сильно деформируемые и сильнодеформируемые; среднедеформируемые с E , меняющемся от $12,0 \text{ МПа}$ до $37,0 \text{ МПа}$ [16]. В пределах площадки № 1 торфы в активной зоне занимают от $32,0 \%$ до $89,0 \%$ её толщины. Опирающие нижние концы свай на торфы не установлено, однако расстояние от свай до торфа в отдельных случаях составляет от $0,8 \text{ м}$. В большей части оно равно $1,2 \dots 1,6 \text{ м}$, реже – $2,6 \dots 2,2 \text{ м}$. В большинстве случаев сваи опираются на суглинки, содержащие в своем составе растительные остатки, либо торф, для которых удельное сопротивление грунта под законечником зонда $q_c < 3,0 \text{ МПа}$. В отдельных случаях в пределах длины свай имели место слои торфа мощностью до $0,5 \text{ м}$, расположенные на $0,3 \dots 0,5 \text{ м}$ выше концов свай и пригруженные техно-

генными образованиями, мощностью $6,0 \dots 6,5 \text{ м}$. Все отмеченные факторы существенным образом влияют на величину осадки испытуемых фундаментов и скорость её развития. Здесь также важным фактором, влияющим на деформируемость грунтов оснований, являются и гидрогеологические условия площадки, которые характеризуются наличием подземных вод спорадического распространения. Это также имеет значение, так как по отдельным фундаментам ниже техногенного слоя имеют место супеси лессовидные [17, 18].

Сваи фундаментов, расположенных в пределах площадки № 2, в зоне 2 (рисунок 1), заглублены непосредственно в торф. Его мощность в пределах активной зоны составляет от $59,0 \%$ до 79% . Сваи в пределах зон 1 и 3 заглублены в более прочные и менее деформируемые грунты. Расстояние от нижних концов свай до кровли торфа в зоне 1 колеблется от $0,9 \text{ м}$ до $2,5 \text{ м}$, а в зоне 3 – от $0,1 \text{ м}$ до $2,5 \text{ м}$. Именно заглубление свай в несущий слой грунта и определяет величину осадки свайных фундаментов [5].

Осадки фундаментов, расположенных в зоне 2, превышают осадки фундаментов в зонах 1 и 3 (рисунок 4). При нагружении площадки № 1, подчеркнем, нагрузка в пределах площадки № 2 отсутствует, осадка фундаментов в зоне 2 составила почти в $2,5$ раза больше, чем в зоне 1 и в $4,4$ раза больше, чем в зоне 3. Нагружение площадки № 2 нагрузкой $6,0 \text{ кН/м}^2$ сохраняет ту же тенденцию роста осадок: осадка фундаментов в зоне 2 возросла в $4,0$ раза, в зонах 1 и 3 в $4,3$ и $5,3$ раза соответственно. Вместе с тем осадка фундаментов в зоне 2 в $1,3$ раза больше, чем в зоне 1 и в $3,2$ раза больше, чем в зоне 3. Меньший рост осадки в зоне 3 объясняется меньшей мощностью торфа в пределах активной зоны – в среднем 53% , большим расстоянием от конца свай до кровли торфа.



1 – осадки фундаментов, расположенных в зоне 1; 2 – осадки фундаментов, расположенных в зоне 2;
3 – осадки фундаментов, расположенных в зоне 3

Рисунок 4 – Осадки фундаментов на площадке № 2 в зонах 1, 2, 3 в зависимости от нагрузки, приложенной на площадку № 1 – $P_1 = 6,0 \text{ кН/м}^2$, № 2 – $P_2 = 6,0 \text{ кН/м}^2$, № 3 – $P_3 = 6,0 \text{ кН/м}^2$

При нагружении нагрузкой $6,0 \text{ кН/м}^2$ площадки № 3 рост осадок незначителен. Для зон 1, 2, 3 осадка увеличилась соответственно в 1,5, 1,4 и 2,3 раза. Тенденция к уменьшению осадки при нагружении площадки № 3 объясняется её удаленностью (рисунок 1), а также жесткостью здания. Тем не менее, осадка фундаментов в зоне 2 соответственно в 1,2 и 2,0 раза больше, чем в зонах 1 и 3. Приведенный анализ роста осадок фундаментов на данной площадке, и на площадке № 1 показал высокую их чувствительность к действию полезной нагрузки, хотя и значительно удаленной от испытываемых фундаментов, имеющих в качестве несущего слоя торф. Наличие между сваями и торфом менее деформируемого слоя даже незначительной мощности, $0,3 \text{ м}$ и более, способствует уменьшению роста осадок.

Следует обратить внимание, что площадки № 1 и № 2 разделены деформационным швом. Площадку № 3, находящуюся на расстоянии $60,0 \text{ м}$ от площадки № 2, отделяют температурные швы. Тем не менее, влияние нагрузок на площадках № 1 и № 3 на развитие осадок фундаментов площадки № 2 очевидно. Аналогичная картина развития деформаций фундаментов характерна и для площадки № 4, свободной от нагрузки. Необходимо учитывать, что площадки № 1, № 3 и № 4, № 5 находятся в одном блоке, где деформационные швы отсутствуют. Тем не менее нагружение только площадки № 1 нагрузкой $6,0 \text{ кН/м}^2$ не вызывает прогрессирующих осадок практически на любой из экспериментальных площадок и характер развития во времени предполагает их стабилизацию. Дополнительная нагрузка на любой из следующих площадок вызывает прогрессирующий рост осадок (рисунки 2–4). На уплотнение торфа существенное влияние оказывает ряд факторов: структурная прочность, ползучесть скелета торфа, начальный градиент напора и др. [8, 13]. И эти грунты проявляют повышенную сжимаемость при давлениях, превышающих их структурную прочность. Более того, для торфов, тем более водонасыщенных, характерно медленное развитие осадок. Это предполагает, что при давлении на торфы, не превышающем структурной прочности, осадки оснований стабилизируются во времени. При превышении структурной прочности для оснований свайных фундаментов, представленных торфами, осадки оснований приобретают прогрессирующий характер.

Заключение

1. В результате проведенных экспериментальных исследований для подтверждения работоспособности и поведения под нагрузкой конструкций здания (проверка предельных состояний конструкций на основе результатов испытаний [1]), установлено влияние жесткости надземных конструкций здания на развитие неравномерных осадок. Последовательная загрузка полезной нагрузкой экспериментальных площадок позволила выявить характер развития осадки фундаментов в пределах этих площадок. При загрузке первой площадки замечена стабилизация осадки во времени. Нагружение второй и третьей площадки вызвало прогрессирующий рост осадки. Влияние нагрузки любой из площадок отражается на росте осадок фундаментов остальных площадок, несмотря на наличие между ними деформационных швов.

При необходимости минимизации неравномерности осадок жесткость здания должна быть максимально возможной, когда её дальнейшее увеличение является неоправданным.

2. Установлено, что использование грунтов, обладающих большой сжимаемостью, неоднородностью, в качестве оснований фундаментов способствует более интенсивному развитию неравномерных осадок. В таких условиях достигнутая стабилизация деформаций от действия постоянной нагрузки не является окончательной, ибо приложение незначительной по величине переменной нагрузки может вызвать прогрессирующий рост осадки даже при её полном снятии.

3. Результаты испытаний показали, что при величине полезной нагрузки, не превышающей структурной прочности торфа (ориентировочно $26,0 \text{ кПа}$), осадка стабилизируется во времени. При использовании торфа в качестве основания фундаментов обязательным является не только расчет деформаций от действующих нагрузок, но и их развития во времени. Применение для расчета одномерной консолидации грунтов линейного и нелинейного вариантов фильтрационной теории не даст удовлетворительных результатов. Необходим учет реологических свойств скелета грунта.

4. При проектировании фундаментов зданий с использованием оснований III категории сложности необходимым является обязательное выполнение работ по их геотехническому мониторингу. Частота наблюдений должна определяться интенсивностью и длительностью протекающих процессов деформирования массива грунта основания и конструкций подземной и наземной частей объекта.

Список цитированных источников

1. Основы проектирования строительных конструкций = Основы проектирования будаўнічых канструкцый : СН 2.01.01-2022. – Введ. 30.06.2022. – Минск : Минстройархитектуры, 2022. – 122 с.
2. Барващов, В. А. Расчет осадок и кренов сооружений с учетом неопределенности свойств грунтовых оснований / В. А. Барващов // Геотехника, 2016. – № 1. – С. 4–21.
3. Камаев, В. С. Экспериментально-теоретические исследования жесткостных параметров строительных конструкций и деформируемого основания / В. С. Камаев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения – СПб. : ПГУПС, 2007. – № 3 (12) – С. 126–136.
4. Крутов, В. Н. Основания и фундаменты на насыпных грунтах / В. Н. Крутов. – М. : Стройиздат, 1988. – 224 с.
5. Коновалов, П. А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий / П. А. Коновалов. – 2-е изд. – М. : Стройиздат, 1988. – 287 с.
6. Механика грунтов, основания и фундаменты: учебное пособие для строит. спец. вузов / С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский [и др.] ; под ред. С. Б. Ухова. – 3-е изд., испр. – М. : Высш. школа, 2004. – 566 с.
7. Пойта, П. С. Основания и фундаменты : учеб. пособие / П. С. Пойта, П. В. Шведовский, Д. Н. Клебанюк. – Минск : Вышэйшая школа, 2020. – 400 с.

8. Морарескул, Н. Н. Основания и фундаменты в торфяных грунтах : учеб. пособие / Н. Н. Морарескул. – СПб. : Петербургский гос. уни-т путей сообщения, 1999. – 49 с.
9. Multi-storeved building slab foundation settlement / P. S. Poita, N. N. Shalobyta, T. P. Shalobyta, E. N. Shalobyta // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – № 3 (132). – P. 11–14. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-11-14.
10. Пойта, П. С. Некоторые проблемы проектирования и строительства фундаментов зданий и сооружений / П. С. Пойта, Н. Н. Шалобита, Т. П. Шалобита // Материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. «Перспективные направления инновационного развития и подготовки кадров», 31 октября – 2 ноября 2024 г., Брест. – Брест, 2024. – С. 280–288.
11. Общие положения по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений = Агульнія палажэнні па праектаванню асноў і фундаментаў будынкаў і збудаванняў: СП 5.01.01-23. – Введ. 27.02.2023. – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – 144 с.
12. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть 1. Общие правила производства работ : СП 11-102-97. Введ. 15.08.1997. – М. : Госстрой РФ, 1977. – 37 с.
13. Инженерные изыскания для строительства = Інжынерныя вышуканні для будаўніцтва : СН 1.02.01-2019. – Введ. 26.12.2019. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 109 с.
14. Бусел, И. А. Прогнозирование строительных свойств грунтов / И. А. Бусел. – Минск : Наука и техника, 1989. – 246 с.
15. Спортивно-оздоровительный и торгово-развлекательный центр на пересечении ул. Казимировской – ул. Каменногогорской в г. Минске : технический отчет по инженерно-геологическим изысканиям. – Минск, 2014. – 13 с.
16. Грунты. Классификация : ГОСТ 25100-2020. – Взамен ГОСТ 25100-2011 ; введ. 01.01.2021. – М. : Стандартиформ, 2020. – 38 с.
17. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. ГОСТ 19912-2012. – Взамен ГОСТ 19912-2001 ; введ. 01.11.2013. – М. : Стандартиформ, 2013. – 23 с.
18. Пойта, П. С. О взаимодействии определенных в лабораторных условиях параметров грунтов с данными по статическому зондированию / П. С. Пойта, Т. П. Шалобита // Вестник БрГТУ. Серия Строительство и архитектура. – 2005. – № 2. – С. 83–85.
19. Общие положения по обследованию строительных конструкций зданий и сооружений. СП 1.04.02-2022. – Введ. 02.03.2022. – Минск : МАиС, 2022. – 73 с.
20. Основы проектирования конструкций. Оценка существующих конструкций: СТБ ISO 13822-2017. – Введ. 11.04.2017. – Минск : Госстандарт, 2017. – 40 с.
21. Рекомендации по оценке прочности, жесткости и трещиностойкости сборных бетонных и железобетонных изделий, периодичности их испытаний нагружением и применению методов неразрушающего контроля. Р 1.03.042.07. – Брест : БрГТУ, 2010. – 48 с.
22. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В. А. Ильичева, Р. А. Мангушева. – М. : Изд-во АСВ, 2014. – 728 с.
23. Krutov, V. N. Osnovaniya i fundamenty na nasypnyh gruntah / V. N. Krutov. – M. : Strojizdat, 1988. – 224 s.
24. Konovalov, P. A. Osnovaniya i fundamenty rekonstruirovemykh zdaniy / P. A. Konovalov. – 2-e izd. – M. : Strojizdat, 1988. – 287 s.
25. Mekhanika gruntov, osnovanie i fundamenty: uchebnoe posobie dlya stroit. spec. vuzov / S. B. Uhov, V. V. Semenov, V. V. Znamenskiy [i dr.]; pod red. S. B. Uhova. – 3-e izd., ispr. – M. : Vyssh. shkola, 2004. – 566 s.
26. Pojta, P. S. Osnovaniya i fundamenty : ucheb. posobie / P. S. Pojta, P. V. Shvedovskiy, D. N. Klebanyuk. – Minsk : Vysheishaya shkola, 2020. – 400 s.
27. Morareskul, N. N. Osnovaniya i fundamenty v torfyanyh gruntah : ucheb. posobie / N. N. Morareskul. – SPb. : Peterburgskiy gos. uni-t putej soobshcheniya, 1999. – 49 s.
28. Multi-storeved building slab foundation settlement / P. S. Poita, N. N. Shalobyta, T. P. Shalobyta, E. N. Shalobyta // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – № 3 (132). – P. 11–14. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-11-14.
29. Pojta, P. S. Nekotorye problemy proektirovaniya i stroitel'stva fundamentov zdaniy i sooruzhenij / P. S. Pojta, N. N. Shalobyta, T. P. Shalobyta // Materialy HKHIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Perspektivnye napravleniya innovacionnogo razvitiya i podgotovki kadrov», 31 oktyabrya – 2 noyabrya 2024 g., Brest. – Brest, 2024. – S. 280–288.
30. Obshchie polozheniya po proektirovaniyu osnovanij i funda-mentov zdaniy i sooruzhenij = Agul'nyya palazhenni pa praektavannyu asnoy i fundamentay budynka y zbudavannya y: SP 5.01.01-23. – Vved. 27.02.2023. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2023. – 144 s.
31. Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva. CHast' 1. Obshchie pravila proizvodstva rabot : SP 11-102-97. Vved. 15.08.1997. – M. : Gosstroj RF, 1977. – 37 s.
32. Inzhenernye izyskanie dlya stroitel'stva = Inzhynernyya vyshukanni dlya buda ynictva : SN 1.02.01-2019. – Vved. 26.12.2019. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2020. – 109 s.
33. Busel, I. A. Prognozirovanie stroitel'nyh svojstv gruntov / I. A. Busel. – Minsk : Nauka i tekhnika, 1989. – 246 s.
34. Sportivo-ozdorovitel'nyj i torгово-razvlekatel'nyj centr na pereesechenii ul. Kazimirovskoj – ul. Kamennogorskoj v g. Minske : tekhnicheskij otchet po inzhenerno-geologicheskim izyskaniyam. – Minsk, 2014. – 13 s.
35. Grunty. Klassifikaciya : GOST 25100-2020. – Vzamen GOST 25100-2011 ; vved. 01.01.2021. – M. : Standartinform, 2020. – 38 s.
36. Grunty. Metody polevyh ispytaniy staticheskim i dinamicheskim zondirovaniem. GOST 19912-2012. – Vzamen GOST 19912-2001 ; vved. 01.11.2013. – M. : Standartinform, 2013. – 23 s.
37. Pojta, P. S. O vzaimodeystvii opredelennykh v laboratornykh usloviyah parametrov gruntov s dannymi po staticheskomu zondirovaniyu / P. S. Pojta, T. P. Shalobyta // Vestnik BrGTU. Seriya Stroitel'stvo i arhitektura. – 2005. – № 2. – S. 83–85.
38. Obshchie polozheniya po obsledovaniyu stroitel'nyh konstrukcij zdaniy i sooruzhenij. SP 1.04.02-2022. – Vved. 02.03.2022. – Minsk : MAiS, 2022. – 73 s.
39. Osnovy proektirovaniya konstrukcij. Ocenka sushchestvuyushchih konstrukcij: STB ISO 13822-2017. – Vved. 11.04.2017. – Minsk : Gosstandart, 2017. – 40 s.
40. Rekomendatsii po ocenke prochnosti, zhestkosti i treshchinostojkosti sbornyyh betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij, periodichnosti ih ispytaniy nagruzheniem i primeneniyu metodov nerazrushayushchego kontrolya. R 1.03.042.07. – Brest : BrGTU, 2010. – 48 s.
41. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya / pod obshch. red. V. A. Il'icheva, R. A. Mangusheva. – M. : Izd-vo ASV, 2014. – 728 s.

References

1. Osnovy proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij = Asnovy praektavannya buda ynych kanstrukcyj : SN 2.01.01-2022. – Vved. 30.06.2022. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2022. – 122 s.
2. Barvashov, V. A. Raschet osadok i krenov sooruzhenij s uchetoм neopredelennosti svojstv gruntovyh osnovanij / V. A. Barvashov // Geotekhnika, 2016. – № 1. – S. 4–21.
3. Kamaev, V. S. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya zhestkostnyh parametrov stroitel'nyh konstrukcij i deformiruемого osnovaniya / V. S. Kamaev // Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya – SPb. : PGUPS, 2007. – № 3 (12) – S. 126–136.

Материал поступил 11.04.2025, одобрен 12.07.2025, принят к публикации 12.07.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.785.532:539.234

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ АПУ-N, ПОЛУЧЕННЫХ КАТОДНО-ДУГОВЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ПРИ ИОННОМ АССИСТИРОВАНИИ

И. П. Акула¹, М. Ю. Хома²

¹ К. т. н., ведущий научный сотрудник лаборатории наноматериалов и ионно-плазменных процессов ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: i.akula@phti.by

² Научный сотрудник лаборатории наноматериалов и ионно-плазменных процессов ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: mihmauzer@phti.by

Реферат

Особенность азота – легко встраиваться в структуру алмаза, замещая атомы углерода, что делает его наиболее подходящим элементом для модификации механических, трибологических и электрических свойств алмазоподобных углеродных пленок и покрытий. В настоящей работе исследовано влияние состояния азота на фазовый состав, структуру и свойства покрытий алмазоподобного углерода, полученных методом катодно-дугового осаждения. Азот в процессе осаждения покрытий алмазоподобного углерода подавался в вакуумную камеру как в молекулярном виде, так и ионизированном виде из ионно-лучевого источника. Установлено, что наблюдается существенный рост содержания азота в покрытии алмазоподобного углерода в случае его допирования азотом в ионизированном состоянии. Наличие азота в структуре алмазоподобного углерода приводит к образованию химических связей C-N в конфигурации как с sp^2 , так и с sp^3 , связанными с атомами углерода. Рост энергии ионов азота стимулирует увеличение содержания sp^2 гибридинизированных атомов углерода в сформированных покрытиях со структурой ароматических колец. Установлено, что в полученных аморфных покрытиях АПУ-N присутствуют трех- и четырехкоординированные атомы углерода, а количество четырехкоординированных атомов углерода и степень беспорядка в трехкоординированных атомах углерода зависят от условий осаждения покрытий. Полученные покрытия обладают высокой твердостью до 4500 кгс/мм², что позволяет отнести их к классу сверхтвердых материалов. Присутствие азота в составе покрытия позволяет изменять его удельное электрическое сопротивление в широких пределах, а также трибологические характеристики в условиях сухого трения. Полученный тонкопленочный материал является перспективным для получения структур с требуемой электропроводимостью, в том числе для изготовления детекторов ионизирующих излучений.

Ключевые слова: алмазоподобный углерод, катодно-дуговое осаждение, ионное ассиствирование, структура покрытия, фазовый состав, твердость, электрическое сопротивление.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF DLC-N COATINGS OBTAINED BY CATHODIC ARC DEPOSITION WITH ION ASSISTANCE

I. P. Akula, M. Y. Khoma

Abstract

The ability of nitrogen to easily integrate into the diamond structure, replacing carbon atoms, makes it the most suitable element for modifying the mechanical, tribological and electrical properties of diamond-like carbon films and coatings. In this paper, we study the effect of the nitrogen state on the phase composition, structure and properties of diamond-like carbon coatings obtained by cathodic arc deposition. During the deposition of diamond-like carbon coatings, nitrogen was supplied to the vacuum chamber both in molecular form and in ionized form from an ion-beam source. It was found that a significant increase in the nitrogen content in the diamond-like carbon coating is observed in the case of its doping with nitrogen in the ionized state. The presence of nitrogen in the structure of diamond-like carbon leads to the formation of C-N chemical bonds in the configuration with both sp^2 and sp^3 bonded to carbon atoms. An increase in the energy of nitrogen ions stimulates an increase in the content of sp^2 hybridized carbon atoms in the formed coatings with the structure of aromatic rings. It was found that the obtained amorphous coatings DLC-N contain three- and four-coordinated carbon atoms, and the number of four-coordinated carbon atoms and the degree of disorder in three-coordinated carbon atoms depend on the conditions of coating deposition. The obtained coatings have a high hardness of up to 4500 kgf/mm², which allows them to be classified as superhard materials. The presence of nitrogen in the coating allows changing its specific electrical resistance over a wide range, as well as tribological characteristics under dry friction conditions. The obtained thin-film material is promising for obtaining structures with the required electrical conductivity, including for the manufacture of ionizing radiation detectors.

Keywords: diamond-like carbon, cathodic arc deposition, ion-assisted deposition, coating structure, phase composition, hardness, electrical resistance.

Введение

Азот является уникальным химическим элементом в отношении алмаза, поскольку в отличие от других элементов он наиболее легко встраивается в структуру алмаза, замещая атомы углерода. Азот является основной примесью, по содержанию которой можно судить о свойствах алмаза. Такая особенность делает азот наиболее подходящим элементом для модификации физико-механических свойств покрытий алмазоподобного углерода (АПУ) [1].

Азотсодержащие покрытия алмазоподобного углерода (АПУ-N) обладают рядом ценных качеств и представляют несомненный практический интерес [2–4]. Это обусловлено особенностями взаимодействия азота с углеродом с образованием различных

нитридных фаз и, главным образом, его способностью замещать углерод, образующий четвертные валентные σ -связи в структуре алмаза и алмазоподобных материалов, эффективно насыщать оборванные sp^3 связи на межфазных границах АПУ покрытия. При определенных условиях формирования и достаточно большом содержании азота в углеродном покрытии возможно образование предсказанной β фазы нитрида углерода C_3N_4 , расчетная твердость которой превосходит твердость алмаза [5].

При синтезе различных составов АПУ-N используются те же самые методы, как и для осаждения покрытий АПУ [6, 7]. Наиболее широко представлены химические (CVD) методы осаждения, в которых реакционный углеводородсодержащий газ содержит

азот как в молекулярном виде, так и в виде соединений (аммиак и другие) [8]. В настоящее время выполнено большое количество работ по получению покрытий АПУ-N посредством микроволновой или радиочастотной плазмы. Было показано, что гидрогенизированные аморфные покрытия АПУ-N, α -C(N):H, полученные методом радиочастотного плазмостимулированного химического осаждения из газовой фазы (PECVD) в смеси азота и метана, могут быть столь же твердыми, как алмазные покрытия [9]. Радиочастотное осаждение продемонстрировало, что добавление небольшого количества азота приводит к значительному снижению уровня остаточных напряжений при небольшом уменьшении твердости покрытия [9].

По физическим методам осаждения (PVD), используемых для получения покрытий АПУ-N, накоплено меньше информации, чем по химическим методам. Имеются лишь единичные работы, посвященные осаждению азотсодержащих АПУ покрытий с использованием графитовых мишеней [10]. Энергия столкновений ионов углерода с подложкой в физических методах осаждения обычно составляет около 20 эВ, но она может быть увеличена подачей напряжения смещения на подложку [11]. При увеличении энергии ионов азота до 100–200 эВ отношение N/C увеличивается с 0,25 до 0,4; при более высоких энергиях изменение N/C отношения не существенно [12]. Кроме того, состав покрытия АПУ-N сильно зависит от скорости осаждения ионов углерода и азота на подложку. Значения N/C больше чем 0,4 были получены в случае, когда количество ионов азота, внедряемых в растущее покрытие, значительно превышало число ионов углерода [13].

Достижение высокого значения N/C в покрытии АПУ-N является только одним из необходимых условий для получения форм АПУ-N высокой плотности. Однако если атомы углерода не образуют sp^3 связей между собой, то материал вряд ли будет обладать необхо-

димыми свойствами, характерными для алмазоподобных материалов. Во всех случаях, когда концентрация азота в покрытии становится больше 10 %, спектры РФЭС показывают сильное уменьшение числа sp^3 связей с одновременным ростом пиков, идентифицируемых с C=N и C≡N [14]. Так же уменьшаются величины таких принципиально важных с технической точки зрения параметров, как твердость (с 56 до 10 ГПа), плотность (с 2,8 до 2,0 г/см³), ширина запрещенной зоны (с 0,75 эВ до 0,2 эВ), показатель преломления (с 2,5 до 1,6). Однако неоспоримым преимуществом таких покрытий является существенное снижение остаточных напряжений с 4,0 до 1,7 ГПа [15]. В связи с этим представляется перспективным исследование структуры и свойств покрытий АПУ-N с высоким содержанием азота.

Методики получения и исследования покрытий

В настоящей работе покрытия АПУ-N были получены методом импульсного катодно-дугового осаждения. Часть образцов подвергалась одновременному ассистированию ростовой поверхности ионами азота с помощью ионно-лучевого источника (ИЛИ) "Радиокал". В качестве подложек использовались полированные пластины из стали 40X, ситалла и кремния. После размещения образцов в вакуумной камере установки УВНИПА-1-001 выполнялась откачка до остаточного давления около 10^{-3} Па. Перед формированием покрытия образцы обрабатывались пучком высокоэнергетических ионов аргона с помощью ИЛИ при следующих параметрах: давление аргона $7,5 \times 10^{-3}$ Па, ускоряющее напряжение 3500 В при токе 0,05 А, время обработки 30 минут. Выполнено четыре эксперимента по осаждению покрытий АПУ и АПУ-N, условия которых указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Условия получения покрытий АПУ и АПУ-N

№ эксп.	Тип покрытия	Источник углеродной плазмы				ИЛИ			d, мкм
		U _i , В	U _d , В	f, Гц	t, мин	P(N ₂), мПа	U _a , В	I _a , А	
1	ta-C	300	300	2	60	–	–	–	0,15
2	ta-CN				60	11-13	–	–	0,27
3	ta-CN				55	11-13	500	0,05	0,29
4	ta-CN				60	10-11	1000	0,05	0,28

Примечание – U_i – напряжение поджига; U_d – напряжение разряда; f – частота импульсов; t – время осаждения покрытия; U_a – ускоряющее напряжение; I_a – ускоряющий ток.

Элементный анализ полученных покрытий и определение типов углеродных структур были выполнены с помощью метода РФЭС. Рентгеновские фотоэлектронные спектры были записаны для свежесозданных покрытий на спектрометре ЭС-2401 с использованием отфильтрованного MgK α излучения (1253,6 эВ). Разрешающая способность прибора составляла 1,4 эВ, точность определения положения линий 0,1 эВ. Для очистки и травления внутри камеры образцов использовался пучок ионов Ag с энергией 1 кэВ и плотностью ионного тока 2,3 мкА/см². Фазовый состав осажденных покрытий исследовался с использованием методик спектроскопии комбинационного рассеяния света на спектрометре Confotec NR-500 (SOL Instruments, Республика Беларусь) на длине волны аналитического излучения 532 нм при мощности 30 мВт. Съем спектра проводился десять раз в течение 5 секунд, после чего получался итоговый усредненный спектр. Твердость покрытий оценивалась с использованием метода восстановленного отпечатка на микротвердометре ПМТ-3. В качестве индентора применялась алмазная пирамида Кнупа при нормальной нагрузке 20 г и времени выдержки 10 с. Было выполнено по 4 измерения длины вытянутой диагонали отпечатка для каждого образца. Удельное электрическое сопротивление покрытий (Ω), осажденных на полированные ситалловые пластины, измерялось с помощью прибора UNI-T 533. Трибологические исследования проводились на стенде, работающем по схеме "палец-диск". В качестве контртела использовался шарик с полированной поверхностью из стали ШХ15 с диаметром 5,5 мм. Исследования проводились при нормальной нагрузке на контртело 1 Н и радиусе вращения контртела 10 мм.

Обсуждение результатов

Отношение содержания азота к углероду N/C для осажденных покрытий АПУ-N определялось по отношению интенсивности линий N1s и C1s из данных РФЭС. В покрытиях АПУ-N, осажденных без ионного ассистирования, углерод взаимодействует только с молекулами азота в окружающем газе, что приводит к незначительному внедрению атомов азота в растущее покрытие. При этом содержание азота в покрытии составляет 11,0 ат.%. В случае ионизации азота при ускоряющем напряжении ИЛИ 500 В во время осаждения покрытия АПУ-N ионы углерода взаимодействуют с активными ионами азота. Это обеспечивает более активное внедрение азота в формируемое покрытие с образованием химической связи между углеродом и азотом, а также приводит к увеличению концентрации химически активных ионов азота до 40,4 ат.%, что в свою очередь ведет к более глубокому внедрению атомов азота в покрытие. Однако рост ускоряющего напряжения источника ионов до 1000 В приводит к распылению осаждаемого тонкопленочного материала, что сказывается на снижении содержания азота в покрытии до 37,9 ат.%.

В таблице 2 представлены результаты обработки спектров РФЭС – позиция линии и % каждого пика для C1s и N1s спектров покрытий АПУ-N, полученных при различном ускоряющем напряжении источника ионов. Если азот при осаждении покрытия АПУ-N используется в молекулярном состоянии, то содержание sp гибридных атомов углерода (38,3 %) превышает количество sp^3 (23,7 %) и sp^2 (23,7 %) гибридных атомов углерода. Большинство атомов азота (66,5 %) в таком случае связаны с sp^2

атомами углерода $C\equiv N$ связями. При осаждении покрытия АПУ-N с ассистированием ионами азота при ускоряющем напряжении 500 В содержание атомов углерода в sp^2 конфигурации возрастает до 46 %, в то время как содержание sp^3 и sp^1 гибридных атомов углерода уменьшается до 12,4 % и 28,5 % соответственно. В то же время содержание атомов азота, связанных с sp^2 углеродом, уменьшается до 63,5 %. Количество атомов азота, связанных с sp^3

и sp углеродом, возрастает до 24,1 % и 7,6 % соответственно. Дальнейший рост ускоряющего напряжения источника ионов до 1000 В приводит к увеличению числа sp^2 атомов углерода и атомов азота, связанных с sp углеродом, и уменьшению количества sp атомов углерода и атомов азота, связанных с sp^2 углеродом. Содержание sp^3 атомов углерода и атомов азота, связанных с sp^3 атомами углерода, изменяется не существенно.

Таблица 2 – Результаты разложения $C1s$ и $N1s$ спектров для покрытия АПУ-N

Пик	Тип связи	Номер образца (таблица 1)					
		2		3		4	
		$E_{св}$, эВ	%	$E_{св}$, эВ	%	$E_{св}$, эВ	%
$C1s$ (1)	C-C	284,6	4,1	284,9	7,1	284,6	7,9
$C1s$ (2)	$C\equiv N$	285,4	28,7	285,3	46,0	285,4	50,0
$C1s$ (3)	C-N	286,3	38,3	286,4	28,5	286,5	17,7
$C1s$ (4)	$C\equiv N$	287,1	23,7	287,6	12,4	287,4	13,6
$C1s$ (5)	C-O	288,7	5,2	289,0	6,0	288,6	10,8
$N1s$ (1)	C-N	398,3	18,0	398,1	24,1	398,2	24,4
$N1s$ (2)	$C\equiv N$	399,0	4,5	399,2	7,6	399,2	12,7
$N1s$ (3)	C=N	400,0	66,5	400,6	63,5	400,7	47,5
$N1s$ (4)	N-N N-O	401,6	11,0	403,3	4,8	402,9	15,4

Результаты исследования структуры покрытий АПУ и АПУ-N с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния света представлены на рисунке 1. В области $(1200-1700) \text{ см}^{-1}$ можно наблюдать наличие широкого пика, что говорит об аморфной структуре полученного тонкопленочного материала [1]. Можно видеть, что добавка молекулярного азота в объем вакуумной камеры приводит к незначительному нарушению формы спектра в области низких частот. В то же время присутствие азота в ионизированном состоянии существенно преобразует форму спектра из-за явного появления сигнала в области частот 1350 см^{-1} . Такое поведение связано с ростом D пика, ассоциируемого с атомами углерода с конфигурацией ароматических колец, находящихся в sp^2 гибридном состоянии. Для более точного описания фазового состояния углерода было выполнено разложение основного пика спектра КРС на составляющие D и G пики. Обработка была выполнена с помощью функции Гаусса-Лоренца в пакете MathLab. Результаты представлены в таблице 3.

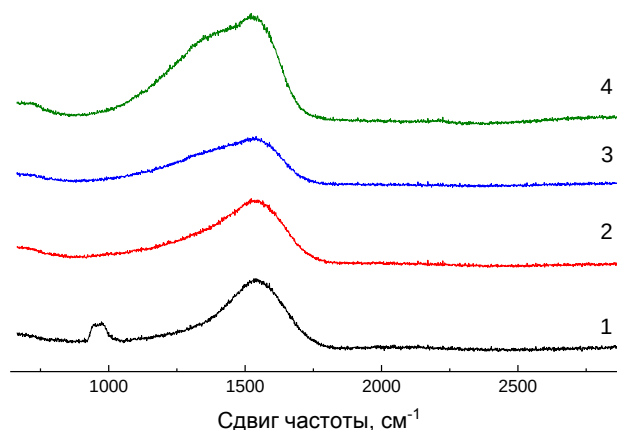


Рисунок 1 – Спектры КРС для покрытий АПУ (номер спектра соответствует номеру образца из таблицы 1)

Таблица 3 – Результаты разложения спектра КРС

№ эксп.	I_D/I_G	D пик			G пик		
		$K, \text{ см}^{-1}$	$I, \text{ отн.ед.}$	$W, \text{ см}^{-1}$	$K, \text{ см}^{-1}$	$I, \text{ отн.ед.}$	$W, \text{ см}^{-1}$
1	0,30	1383,2	447,9	313,4	1554,5	1512,1	214,8
2	0,65	1383,3	766,4	383,4	1555,5	1186,7	204,1
3	1,30	1389,2	905,2	379,8	1557,8	701,0	169,2
4	1,49	1380,0	2258,1	373,0	1554,8	1506,7	156,7

Примечание – K – положение максимума пика; I – интенсивность пика; W – ширина пика на полувысоте.

Исследования показали, что при добавлении азота в поток углеродной плазмы и по мере роста энергии ионов азота наблюдается рост и уширение пика D с одновременным снижением интенсивности и ширины пика G. Подобный результат наблюдался в [16], где энергию ионов азота регулировали подачей напряжения смещения на основу. Согласно [17] подобное изменение пиков D и G говорит либо о наличии четырехкратно координированных атомов углерода, либо о беспорядке углов связи для атомов углерода с тройной связью. Таким образом, можно сделать вывод, что в полученных аморфных пленках АПУ-N присутствуют трех- и четырехкоординированные атомы углерода, а количество четырехкоординированных атомов углерода и степень беспорядка в трехкоординированных атомах углерода зависят от условий

осаждения покрытий. Из данных, представленных в таблице 3, наиболее важным является параметр I_D/I_G , который характеризует степень разупорядоченности сформированной структуры тонкопленочного материала.

Можно видеть, что как добавка азота в молекулярном состоянии, так и его ионизация приводят к росту разупорядоченности структуры покрытия алмазоподобного углерода. Считается [18], что бомбардировка частицами с высокими энергиями увеличивает подвижность атомов на растущей поверхности при высоких температурах осаждения и этим вызывает структурный беспорядок. Затем кластер C-N, аналогичный неупорядоченной турбостратной фазе (хаотично повернутое расположение гексагональных слоев), может развиваться в аморфной матрице [19].

На рисунке 2 представлены результаты исследования твердости покрытий. Покрытия АПУ показали твердость около 4100 кгс/мм². С учетом малой толщины покрытий и достаточно высокой нагрузки на индентор, при которой на результаты оказывает влияние основа, данное покрытие можно классифицировать как сверхтвердое. Добавка молекулярного азота привела к снижению твердости покрытий до порядка 3000 кгс/мм², что вероятно связано с потерей энергии ионов углерода на упругих столкновениях с молекулами газа. В то же время азот в ионизированном состоянии при ускоряющем напряжении 500 В вероятно приводит как к образованию С-N связей в растущем покрытии, так и способствует формированию С-С связей в sp³ конфигурации, что привело к получению покрытия АПУ-N с твердостью порядка 4500 кгс/мм². Дальнейший рост ускоряющего напряжения, прямо связанного с энергией ионов азота, привел к падению твердости до порядка 2100 кгс/мм².

Вероятно, большие энергии ионов в потоке плазмы стимулируют преимущественное образование С-С связей в sp² конфигурации, поскольку имеется диапазон энергий (40–70) эВ, в котором содержание связей алмазного типа в покрытиях АПУ является максимальным для типа ta-C [20].

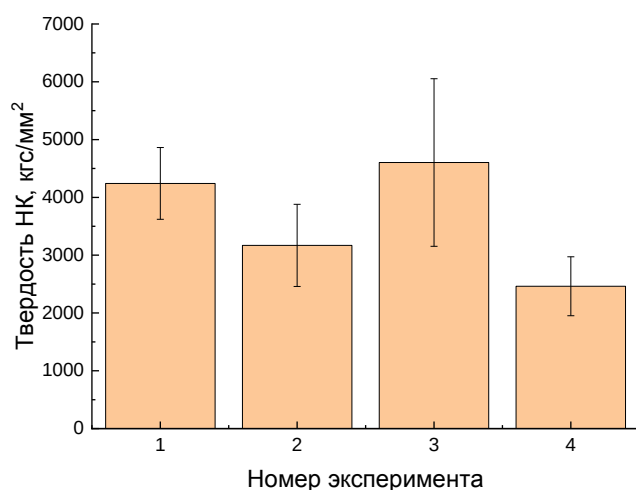


Рисунок 2 – Твердость покрытий АПУ и АПУ-N

Результаты определения удельного электрического сопротивления покрытий АПУ-N представлены на рисунке 3. Добавка азота оказывает существенное влияние на удельное электрическое сопротивление покрытий ($\Omega/\text{кв.}$).

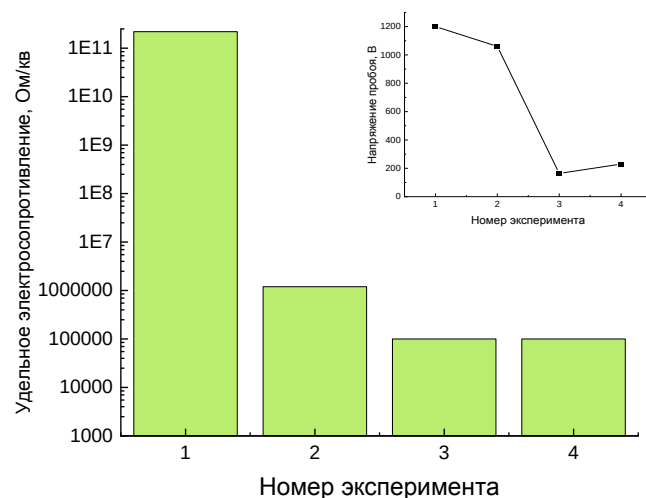


Рисунок 3 – Удельное электрическое сопротивление и напряжение пробоя (вставка) покрытий АПУ и АПУ-N

Азот, попадающий в плазму в молекулярном/атомарном состоянии, приводит к снижению параметра $\Omega/\text{кв}$ более чем на 5 порядков. Ионизация газа способствует дальнейшему снижению $\Omega/\text{кв}$ с 10⁶ Ом/кв для атомарного газа до порядка (1–2) × 10⁵ Ом/кв для покрытий АПУ-N, полученных с использованием ассистирования ионами азота. Причем параметр $\Omega/\text{кв}$ слабо зависит от энергии ионов азота в нашем случае. В то же время стоит обратить внимание на напряжение пробоя, которое для покрытия АПУ-N, полученного при ускоряющем напряжении 1000 В источника ионов "Радикал", составляет 230 В и превышает значение этого параметра для покрытия АПУ-N, полученного при напряжении 500 В и равного 164 В.

Результаты трибологических испытаний представлены на рисунке 4. Испытания показали, что наличие молекулярного азота в реакционной области приводит к существенному повышению коэффициента трения до 0,30 с 0,26 для не содержащего азот покрытия АПУ.

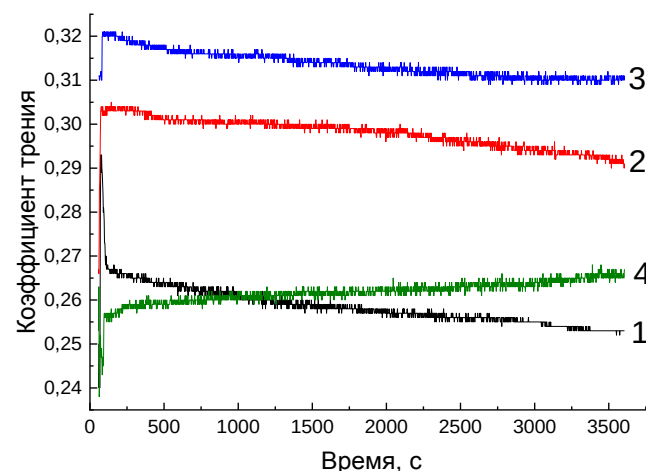


Рисунок 4 – Коэффициент трения покрытий АПУ-N (номер на графике соответствует номеру эксперимента из таблицы 1)

В случае ионизированного азота (ускоряющее напряжение 500 В) происходит дальнейший рост коэффициента трения до 0,315. Однако при более высоких энергиях ионного источника (1000 В) коэффициент трения покрытия АПУ-N+ снижается до 0,26. Вероятно, такой характер трения связан с процессами, проходящими в области контакта покрытия с контртелом.

На рисунке 5 представлены изображения области износа контртела и дорожки трения на поверхности покрытия, образованные в результате испытаний.

Во-первых, изображения дорожек трения показывают, что не наблюдается какого-либо заметного износа покрытия для всех условий эксперимента. В дорожке нет следов отслаивания покрытия, что говорит о его хорошей адгезии к основе. Во-вторых, не наблюдается интерференционного окрашивания в границах дорожек, что подтверждает минимальное присутствие процессов абразивного изнашивания покрытия. В то же время на периферии области износа контртела присутствуют следы продуктов износа, которые, скорее всего, представляют собой мелкодисперсную фракцию материала самого контртела. Это говорит о существенно более высокой твердости покрытия по сравнению с контртелом. Причем, чем выше значение устоявшегося коэффициента трения покрытия, тем больше вынесенного материала присутствует на периферии пятна износа. Вероятно, данный материал может образовывать отдельный слой в зоне контакта покрытия с контртелом, наличие которого и определяет величину коэффициента трения трибопары. Область контакта, определяемая по диаметру пятна износа контртела, коррелирует с коэффициентом трения и составляет 3,14 × 10⁻² мм² для минимальных значений коэффициента трения 0,26 (образцы 1 и 4) и 5,39 × 10⁻² мм².

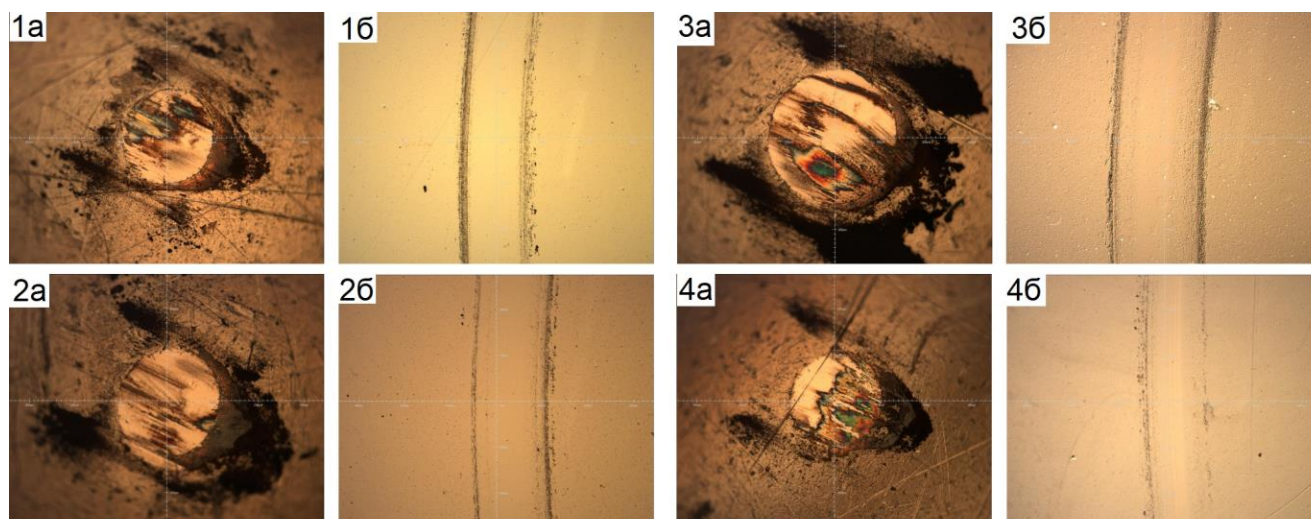


Рисунок 5 – Изображение области износа контртела (а) и дорожки трения (б) для образцов покрытия (1–4, номер измерения соответствует номеру эксперимента из таблицы 1)

Заключение

Проведенные исследования показали, что способ введения азота в состав покрытий АПУ-Н оказывает существенное влияние на формирование их структуры. Азот встраивается в структуру алмазоподобного углерода в виде примеси замещения, образуя sp^2 и sp^3 связи с атомами углерода типа C – N и C = N – C соответственно. Следствием азотирования является повышение количества sp^2 связанных атомов углерода в покрытии, что подтверждается данными как РФЭС, так и спектроскопии КРС. При этом высокая энергия ионов азота способствует графитизации покрытия в результате тепловыделения и значительного нагрева соударительной области в растущем покрытии. Показано, что можно управлять удельным электросопротивлением тонкопленочных алмазоподобных материалов в широких пределах (10^5 – 10^{12} Ом/кв) при изменении условий внедрения азота в формируемое покрытие. Получен тонкопленочный материал, твердость которого достигает 4500 кгс/мм², что позволяет отнести его к классу сверхтвердых материалов. Трибологические испытания показали, что не наблюдается какого-либо заметного износа покрытия для всех условий эксперимента. В дорожке трения отсутствуют следы отслаивания покрытия, что говорит о его хорошей адгезии к основе.

Полученные результаты являются важными для изготовления детекторов ионизирующих излучений, используемых в частности при создании сверхпроводящего коллайдера протонов и тяжелых ионов НИКА (Дубна, Россия).

Список цитированных источников

1. Nitrogen-doped CVD diamond: Nitrogen concentration, color and internal stress / A. M. Zaitsev, N. M. Kazuchits, V. N. Kazuchits [et al.] // *Diamond and Related Materials*. – 2020. – Vol. 105. – Paper 107794.
2. Effects of nitrogen incorporation on N-doped DLC thin film electrodes fabricated by dielectric barrier discharge plasma: Structural evolution and electrochemical performances / M. Nilkar, F. E. Ghodsi, S. Jafari [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 853. – Paper 157298.
3. Nitrogen-doped diamond-like carbon as optically transparent electrode for infrared attenuated total reflection spectroelectrochemistry / N. Menegazzo, M. Kahn, R. Berghauser [et al.] // *Analyst*. – 2011. – Vol. 136. – P. 1831–1839.
4. Nitrogen doping for adhesion improvement of DLC film deposited on Si substrate by Filtered Cathodic Vacuum Arc (FCVA) technique / D. Bootkul, B. Supsermpol, N. Saenphinit [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2014. – Vol. 310. – P. 284–292.
5. Liu, A. Y. Prediction of new low compressibility solids / A. Y. Liu, M. L. Cohen // *Science*. – 1989. – Vol. 245. – P. 841–845.
6. Корсунский, Б. Л. На пути к нитриду углерода / Б. Л. Корсунский, В. И. Пепекин // *Успехи химии*. – 1997. – № 11. – С. 1003–1014.
7. Muhl, S. A review of the preparation of carbon nitride films / S. Muhl, J. M. Me'ndez // *Diamond and Related Materials*. – 1999. – Vol. 8. – P. 1809–1830.
8. Zhang, Y. Crystalline carbon nitride films formation by chemical vapor deposition / Y. Zhang, Z. Zhou, H. Li // *Applied Physics Letters*. – 1996. – Vol. 68. – P. 634–636.
9. Freire, F. L. Amorphous hydrogenated carbon-nitrogen films deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition / F. L. Freire // *Japan Journal of Applied Physics*. – 1997. – Vol. 36, N 7B. – P. 4886–4892.
10. Structural investigation of two carbon nitride solids produced by cathodic arc deposition and nitrogen implantation / A. R. Merchant, D. G. McCulloch, D. R. McKenzie [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 1996. – Vol. 79. – P. 6914–6919.
11. Amorphous carbon and carbon nitride films prepared by filtered arc deposition and ion assisted arc deposition / J. P. Zhao, X. Wang, Z. Y. Chen [et al.] // *Materials Letters*. – 1997. – Vol. 33. – P. 41–45.
12. Preparation of CN_x films by ion beam assisted filtered cathodic arc deposition / C. Spaeth, M. Kühn, U. Kreissig, F. Richter // *Diamond and Related Materials*. – 1997. – Vol. 6. – P. 626–630.
13. Hartmann, J. Characterization of carbon nitride produced by high-current vacuum arc deposition / J. Hartmann, P. Siemroth, J. Schultrich // *Journal of Vacuum Science Technology A*. – 1997. – Vol. 15. – P. 2983–2987.
14. X-ray diffraction studies of the effects of N incorporation in amorphous CN_x materials / J. K. Walters, M. Kuhn, C. Spaeth [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 1998. – Vol. 83. – P. 3529–3534.
15. Optical emission spectroscopy of the nitrogen arc in an arc-heated beam source used for synthesis of carbon nitride films / N. Xu, Y. Du, Z. Ying [et al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1997. – Vol. 30. – P. 1370–1376.
16. Optical and mechanical properties of amorphous CN films / S. Lee, S. Jin Park, Soo-ghee Oh [et al.] // *Thin Solid Films*. – 1997. – Vol. 308–309. – P. 135–140.
17. Modeling studies of amorphous carbon / D. Beeman, J. Silverman, R. Lynds, M. R. Anderson // *Physics Review B*. – 1984. – Vol. 30, Iss. 2. – P. 870–875.
18. Dillon, R. O. Use of Raman Scattering to Investigate Disorder and Crystallite Formation in As-Deposited and Annealed Carbon Films / R. O. Dillon, J. A. Woolam, V. Katkanant // *Physical Review B*. – 1984. – Vol. 29. – P. 3482–3489.

19. Preparation of carbon nitride thin films by ion beam assisted deposition and their mechanical properties / M. Kohzaki, A. Matsumuro, T. Hayashi [et al.] // *Thin Solid Films*. – 1997. – Vol. 308–309. – P. 239–244.
20. Preparation and properties of high density, hydrogen free hard carbon films with direct ion beam or arc discharge deposition / J. P. Hirvonen, J. Koskinen, R. Lappalainen, A. Anttila // *Materials Science Forum*. – 1990. – Vol. 52. – P. 197–216.

References

1. Nitrogen-doped CVD diamond: Nitrogen concentration, color and internal stress / A. M. Zaitsev, N. M. Kazuchits, V. N. Kazuchits [et al.] // *Diamond and Related Materials*. – 2020. – Vol. 105. – Paper 107794.
2. Effects of nitrogen incorporation on N-doped DLC thin film electrodes fabricated by dielectric barrier discharge plasma: Structural evolution and electrochemical performances / M. Nilkar, F. E. Ghodsi, S. Jafari [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 853. – Paper 157298.
3. Nitrogen-doped diamond-like carbon as optically transparent electrode for infrared attenuated total reflection spectroelectrochemistry / N. Menegazzo, M. Kahn, R. Berghauer [et al.] // *Analyst*. – 2011. – Vol. 136. – P. 1831–1839.
4. Nitrogen doping for adhesion improvement of DLC film deposited on Si substrate by Filtered Cathodic Vacuum Arc (FCVA) technique / D. Bootkul, B. Supsermpol, N. Saenphinit [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2014. – Vol. 310. – P. 284–292.
5. Liu, A. Y. Prediction of new low compressibility solids / A. Y. Liu, M. L. Cohen // *Science*. – 1989. – Vol. 245. – P. 841–845.
6. Korsunskij, B. L. Na puti k nitridu ugleroda / B. L. Korsunskij, V. I. Pepekin // *Uspekhi himii*. – 1997. – № 11. – S. 1003–1014.
7. Muhl, S. A review of the preparation of carbon nitride films / S. Muhl, J. M. Me'ndez // *Diamond and Related Materials*. – 1999. – Vol. 8. – P. 1809–1830.
8. Zhang, Y. Crystalline carbon nitride films formation by chemical vapor deposition / Y. Zhang, Z. Zhou, H. Li // *Applied Physics Letters*. – 1996. – Vol. 68. – P. 634–636.
9. Freire, F. L. Amorphous hydrogenated carbon-nitrogen films deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition / F. L. Freire // *Japan Journal of Applied Physics*. – 1997. – Vol. 36, N 7B. – P. 4886–4892.
10. Structural investigation of two carbon nitride solids produced by cathodic arc deposition and nitrogen implantation / A. R. Merchant, D. G. McCulloch, D. R. McKenzie [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 1996 – Vol. 79. – P. 6914–6919.
11. Amorphous carbon and carbon nitride films prepared by filtered arc deposition and ion assisted arc deposition / J. P. Zhao, X. Wang, Z. Y. Chen [et al.] // *Materials Letters*. – 1997. – Vol. 33. – P. 41–45.
12. Preparation of CNx films by ion beam assisted filtered cathodic arc deposition / C. Spaeth, M. Kühn, U. Kreissig, F. Richter // *Diamond and Related Materials*. – 1997. – Vol. 6. – P. 626–630.
13. Hartmann, J. Characterization of carbon nitride produced by high-current vacuum arc deposition / J. Hartmann, P. Siemroth, J. Schultrich // *Journal of Vacuum Science Technology A*. – 1997. – Vol. 15. – P. 2983–2987.
14. X-ray diffraction studies of the effects of N incorporation in amorphous CNx materials / J. K. Walters, M. Kuhn, C. Spaeth [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 1998. – Vol. 83. – P. 3529–3534.
15. Optical emission spectroscopy of the nitrogen arc in an arc-heated beam source used for synthesis of carbon nitride films / N. Xu, Y. Du, Z. Ying [et al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1997. – Vol. 30. – P. 1370–1376.
16. Optical and mechanical properties of amorphous CN films / S. Lee, S. Jin Park, Soo-ghee Oh [et al.] // *Thin Solid Films*. – 1997. – Vol. 308–309. – P. 135–140.
17. Modeling studies of amorphous carbon / D. Beeman, J. Silverman, R. Lynds, M. R. Anderson // *Physics Review B*. – 1984. – Vol. 30, Iss. 2. – P. 870–875.
18. Dillon, R. O. Use of Raman Scattering to Investigate Disorder and Crystallite Formation in As-Deposited and Annealed Carbon Films / R. O. Dillon, J. A. Woolam, V. Katkanant // *Physical Review B*. – 1984. – Vol. 29. – P. 3482–3489.
19. Preparation of carbon nitride thin films by ion beam assisted deposition and their mechanical properties / M. Kohzaki, A. Matsumuro, T. Hayashi [et al.] // *Thin Solid Films*. – 1997. – Vol. 308–309. – P. 239–244.
20. Preparation and properties of high density, hydrogen free hard carbon films with direct ion beam or arc discharge deposition / J. P. Hirvonen, J. Koskinen, R. Lappalainen, A. Anttila // *Materials Science Forum*. – 1990. – Vol. 52. – P. 197–216.

Материал поступил 07.07.2025, одобрен 15.07.2025, принят к публикации 16.07.2025

УДК 614.846.63

МЕТОД РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОЖАРНЫХ АВТОЦИСТЕРН

Е. Г. Казутин¹, А. М. Гоман², А. С. Скороходов³

¹ К. т. н., профессор кафедры пожарной аварийно-спасательной техники Университета гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь, e-mail: evgeny_kazutin@tut.by

² К. т. н., доцент, начальник отдела динамического анализа и вибродиагностики машин НТЦ «Карьерная техника» Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: ark.goman@gmail.com

³ К. т. н., доцент, ведущий научный сотрудник отдела динамического анализа и вибродиагностики машин НТЦ «Карьерная техника» Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: skanst@yandex.ru

Реферат

Рассмотрены вопросы надежности и ресурса пожарных автоцистерн (далее – ПАЦ), показана актуальность оценки их остаточного ресурса при эксплуатации. Предложен метод расчета остаточного ресурса основных составных частей ПАЦ, учитывающий средневзвешенный расход их ресурсного потенциала и являющийся дальнейшим развитием разрабатываемого авторами подхода, основывающегося на учете факторов пробега и времени эксплуатации. Предлагаемый метод позволяет определять остаточный ресурс для ПАЦ в целом и дифференцированно учитывать расход ресурса всех ее основных частей, в том числе замененных во время эксплуатации. Приведены зависимости для определения расхода ресурса основных частей ПАЦ по пробегу и времени эксплуатации, критерии разделения ПАЦ на категории с учетом расхода их ресурса. Рассмотрен пример расчета остаточного ресурса пожарного автомобиля с цистерной емкостью 5000 л, эксплуатирующийся в Университете гражданской защиты (далее – УГЗ) МЧС Республики Беларусь. В целях обеспечения качества и оперативности обработки данных о состоянии имеющейся техники, а также подготовки необходимой информации для принятия решений по обеспечению подразделений материальными и финансовыми средствами, планирования ремонтов и списания, дается оценка состояния ПАЦ с учетом величины остаточного ресурса. В перспективе полученные данные могут быть использованы для планирования в Производственно-технических центрах МЧС фонда агрегатов, узлов и деталей для проведения ремонтных работ, с определением их номенклатуры, в зависимости от количества эксплуатируемых пожарных автомобилей.

Ключевые слова: пожарная автоцистерна, расход ресурса, остаточный ресурс, предельное состояние, пробег, время эксплуатации.

THE METHOD OF CALCULATING THE REMAINING RESOURCE OF FIRE TANK TRUCKS

E. G. Kazutin, A. M. Goman, A. S. Skorokhodov

Abstract

The issues of reliability and resource of fire tank trucks (hereinafter referred to as FTT) are considered, the relevance of assessing their residual resource during operation is shown. A method is proposed for calculating the remaining resource of the main components of FTT, which takes into account the weighted average consumption of their resource potential and is a further development of the approach developed by the authors, based on factors mileage and operating time. The proposed method makes it possible to determine the remaining resource for a FTT as a whole and to take into account the resource consumption of all its main parts, including those replaced during operation. Dependencies for determining the resource consumption of the main parts of the FTT by mileage and operating time, criteria for dividing FTT into categories, taking into account the consumption of their resource, are given. An example of calculating the residual resource of a fire truck with a tank capacity of 5,000 liters, operated at the University of Civil Protection (hereinafter referred to as UCP) of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, is considered. In order to ensure the quality and efficiency of data processing on the condition of existing equipment, as well as the preparation of the necessary information for decision-making on providing material and financial resources to the divisions, planning repairs and decommissioning, an assessment of the condition of a FTT is given, taking into account the remaining resource. In the future, the data obtained can be used for planning in the Production and Technical Centers of the Ministry of Emergency Situations of the fund of units, assemblies and parts, with the definition of their nomenclature, depending on the number of fire trucks in operation.

Keywords: fire tanker truck, resource consumption, residual resource, limit condition, mileage, operating time.

Введение

К пожарным автомобилям предъявляется ряд требований, изложенных в СТБ 11.13.24-2017 «Система стандартов пожарной безопасности. Автомобили пожарные основные. Общие технические требования. Методы испытаний» и ГОСТ 34350-2017 «Техника пожарная. Основные пожарные автомобили. Общие технические требования. Методы испытания». ПАЦ является наиболее распространенным типом пожарного автомобиля и должна обеспечивать высокую боевую готовность, оперативность прибытия к месту вызова и эффективность подачи огнетушащих веществ. Поэтому для ПАЦ надежность является важнейшей характеристикой.

Согласно ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике. Термины и определения», одним из составляющих элементов надежности является долговечность – «свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта». В свою очередь предельное состояние (далее – ПС) – это «состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно», а остаточный ресурс – «суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние». При этом прогнозирование остаточного ресурса включает в себя комплекс задач: оценку текущего состояния объекта и развития этого состояния на ближайшем будущем, выдачу на основе этого прогноза рекомендаций по предотвращению возможных отказов и выполнению корректирующих действий с целью продлить срок службы машины.

Таким образом, оценка остаточного ресурса ПАЦ является актуальной во время ее эксплуатации и после проведения ремонтных работ. Зная остаточный ресурс, технический персонал и ремонтные службы могут корректировать интервалы диагностики машин при обслуживании, планировать ремонты, заменять большие ремонты мелкими и т. д. Кроме того, при оценке остаточного ресурса серьезное внимание должно уделяться оптимизации затрат на устранение отказов, вызванных простоем техники, т. е. сокращению эксплуатационных расходов [1–3]. Следует также отметить, что для оценки ресурса ПАЦ

необходим подход, позволяющий спрогнозировать остаточный срок службы при минимуме имеющейся исходной информации [4, 5].

В статье [6] приведена методика оценки расхода ресурса ПАЦ, учитывающая специфические особенности ее практической эксплуатации, основывающаяся на учете факторов пробега и времени эксплуатации. Задачей данной работы является дальнейшее развитие разрабатываемого авторами подхода, обеспечивающего возможность без проведения разборки дифференцированно определять остаточный ресурс основных составных частей ПАЦ, учитывая средневзвешенный расход их ресурсного потенциала.

Прогнозирование остаточного ресурса

Согласно методическим указаниям РД 50-423-83 [7], номенклатура контролируемых параметров, которые определяют остаточный ресурс, устанавливается в отраслевой нормативно-технической документации. Для автомобилей (в том числе ПАЦ) естественной мерой остаточного ресурса служит пробег в километрах или продолжительность эксплуатации, измеряемая временным параметром [8–10]. Под прогнозированием понимают определение срока исправной работы автомобиля до возникновения ПС, обусловленного технической документацией [11].

В зависимости от требуемой достоверности прогноза и возможностей получения информации применяют два подхода к прогнозированию: упрощенный, основанный на детерминистических оценках показателей, и уточненный, основанный на вероятностных оценках [4].

Остаточный ресурс сложного объекта со многими составными частями, как правило, определяется вероятностным методом с помощью ряда логических условий, описывающих комбинации ПС основных составных частей [12, с. 115]. Прогнозирование остаточного ресурса узлов в этом случае обеспечивает их рациональное использование и замену только в случае крайней необходимости [13].

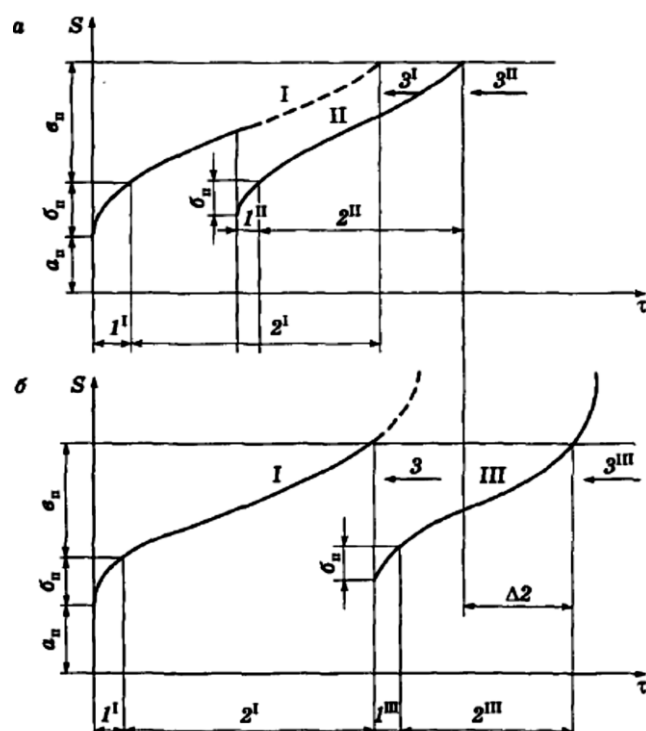
Однако вероятностно-статистические методы, применяемые для групповой оценки срока службы оборудования, малопригодны для индивидуальной оценки остаточного ресурса во время эксплуатации [5]. Достоверный индивидуальный прогноз долговечности конкретного механизма или агрегата этим методом получить сложно. Более приспособлены для индивидуальных прогнозов инженерные методы, информационной основой которых являются результаты мониторинга эксплуатационных параметров конкретного контролируемого объекта. Например, экстраполяционный метод прогнозирования [5].

Оценка остаточного ресурса (остаточного срока службы) пожарной аварийно-спасательной техники в Беларуси опирается на нормативный срок службы. При этом для конкретных ПАЦ, эксплуатируемых в пожарных частях, применяется планово-предупредительная система технического обслуживания, в рамках которой в некоторых случаях использование статистики невозможно (если изделие новое или единичное), что характерно для изделий, которые имеют ограниченный срок службы в силу быстрого функционального и морального старения (военной и специальной техники) [14].

Наиболее рациональным в данном случае является обслуживание машины по следующей схеме: определение потребности в техническом вмешательстве – проведение необходимых работ – контроль качества проведенных работ – исправление выявленных отклонений – испытание машины [15, с. 19]. Однако обслуживание машины по такой рациональной схеме требует решения ряда организационно-технических задач: определения времени, места и объема работ по выявлению потребности в техническом вмешательстве и проведению его. Как видно из рисунка 1, несвоевременное техническое вмешательство в процесс эксплуатации приводит к сокращению срока работы машины. Оптимальным моментом технического вмешательства будет точка перехода эксплуатационного периода в аварийный, при этом будет использован весь ресурс.

На рисунке 2 показана функциональная зависимость расхода ресурса ПАЦ $P(\%)$ от времени эксплуатации t (ч), которую можно представить и как зависимость от пробега L (тыс. км). Период эксплуатации длится по времени до точки k (контроля технического состояния), где ПАЦ имеет определенный пробег L_k и расход ресурса P_k . Таким образом, можно спрогнозировать работу по времени до точки c (наступления ПС), в которой ПАЦ будет иметь пробег L_c и расход ресурса P_c , это и будет остаточный ресурс работы ПАЦ.

ПАЦ достигает ПС в момент пересечения реализацией $P(t)$ уровня P_c , устанавливаемого нормативно-технической документацией. Фактические моменты достижения объектами этого состояния могут существенно различаться в зависимости от их индивидуальных свойств и условий эксплуатации [16].



а – при преждевременном (кривая II) техническом вмешательстве; б – при своевременном (кривая III) вмешательстве; t^I, t^II, t^III – приработка; $2^I, 2^{II}, 2^{III}$ – нормальная эксплуатация; $3^I, 3^{II}, 3^{III}$ – аварийный период; a_n – исходное состояние показателя (расхода ресурса, обусловленного предшествующим хранением либо неполным ремонтом); b_n и b_n – изменение показателя (расхода ресурса) за периоды приработки и нормальной эксплуатации

Рисунок 1 – Изменение показателя состояния машины (расхода ресурса) в процессе ее эксплуатации [15]



Рисунок 2 – Прогнозирование остаточного ресурса ПАЦ

Функциональная зависимость расхода ресурса позволяет вычислить срок службы ПАЦ. При оценке ресурса по функциональной зависимости наиболее распространенной является линейная аппроксимация. Однако в большинстве случаев линейную аппроксимацию можно считать лишь грубым приближением к описанию реальных процессов. В более общей форме деградационные процессы старения и износа описываются зависимостью полиномиального вида [17–18]:

$$X(t) = X_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots + c_n t^n. \quad (1)$$

В этом случае оценка полного и остаточного ресурса при известных значениях коэффициентов c_i ($i = 1...n$) и n производится решением уравнения (1) при $X = X_{пр}$ [18]. Величина предельного значения $X_{пр}$ определяется по нормативно-технической документации или исходя из требований безопасности.

Определение остаточного ресурса ПАЦ

В работе [6] предлагается использовать для определения расхода ресурса ПАЦ расчетный метод, позволяющий судить об остаточном ресурсе автомобиля и его основных частей. Расход ресурса K_p основных частей ПАЦ определяется по выражению:

$$K_p = 1 - (1 - K_L)(1 - K_T), \quad (2)$$

где K_L – расход ресурса по пробегу в относительных единицах для любой из основных частей ПАЦ либо расход ресурса по накоплению циклической усталости в относительных единицах; K_T – расход ресурса по возрасту в относительных единицах для любой из основных частей ПАЦ либо расход ресурса по коррозионно-механическому износу в относительных единицах.

Зависимости для определения расхода ресурса основных частей ПАЦ по пробегу и времени эксплуатации (K_L и K_T) приведены в работе [6].

Для определения остаточного ресурса можно использовать следующую последовательность действий [4, 5]:

- 1) через определенные периоды эксплуатации $t_1, t_2, \dots$ и т. д. определяется расчетным путем расход ресурса основных частей ПАЦ по пробегу и времени эксплуатации;
- 2) производится аппроксимация временного ряда с целью выявления детерминированного закона изменения параметра во времени [5];
- 3) зависимость экстраполируется до предельно допустимой величины расхода ресурса [4].

Такой метод позволяет получить достаточно точные инженерные оценки остаточного ресурса как разницу между значением пробега/наработки в момент перехода в ПС и их текущим значением.

Пример определения остаточного ресурса ПАЦ

Срок службы АЦ-5,0-40 (модель 5309) с емкостью цистерны 5000 л, эксплуатируемой в учебной пожарной аварийно-спасательной части (далее – УПАСЧ) УГЗ (рисунок 3), составляет 10 полных лет. Фактический пробег – 50 тыс. км. Фактическая наработка в стационарном режиме – 300 ч. Общая масса рассматриваемых основных частей ПАЦ m_0 составляет 5165 кг. Нормативный пробег каждой основной части до капитального ремонта (K_P) L_n принят по значению пробега до КР для ПАЦ на шасси МАЗ – 200 тыс. км [19]. В ПАЦ кузов выполняется в виде пожарной надстройки. Эксплуатируется ПАЦ в г. Минске на дорогах с асфальтобетонным покрытием.



Рисунок 3 – Автоцистерна АЦ-5,0-40 (модель 5309), эксплуатируемая в УПАСЧ УГЗ

Сведения о замене отдельных основных частей ПАЦ приведены в таблице 1. Для двигателя, установленного после КР, учтена фактическая наработка при пробеге и наработка в стационарном режиме, связанном с приводом пожарного насоса. Для заднего моста учтен пробег после замены. При определении наработки основных частей ПАЦ в стационарных режимах 1 ч работы соответствует пробегу 50 км [19].

Таблица 1 – Сведения о замене основных частей АЦ-5,0-40 (модель 5309)

Показатель	Основная часть, пробег (тыс. км) и наработка в стационарном режиме (часы) после установки	
	двигатель, 15 тыс. км, 300 ч	задний мост, 25 тыс. км
Пробег после установки, тыс. км	30	25
Срок службы после установки, лет	3	5

Результаты определения расхода ресурса АЦ-5,0-40 (5309) для 10 лет службы приведены в таблице 2.

Данные по остаточному ресурсу АЦ-5,0-40 (5309) и ее основных частей – за 10 лет с несколькими контрольными точками сведены в таблицу 3. Остаточный ресурс определяется как разница между значением ресурса объекта при достижении ПС (90 %) и текущим значением расхода ресурса.

Таблица 2 – Определение расхода ресурса АЦ-5,0-40 (модель 5309)

Основная часть	Нормативный пробег до КР или списания L_n , тыс. км	Фактический пробег L , тыс. км	Относительный пробег $L_{отн} = 100 \cdot L / L_n$, %	Срок службы, T , лет	Расход ресурса основной части K_P , %	Расход ресурса основной части, прошедшей КР, $K_{P-1,2}$, %	Масса основной части m , кг	Удельный показатель ξ_p , %	Расход ресурса ПАЦ $K_{ПАЦ}$, %
Кабина	200	50	25	10	77,4	–	420	8,1	58,6
Кузов	200	50	25	10	77,4	–	770	14,9	
Рама	200	50	25	10	60,9	–	650	12,6	
Двигатель	200	30	15	3	26	31,2	640	12,4	
Коробка передач	200	50	25	10	47,2	–	350	6,8	
Раздаточная коробка	200	50	25	10	47,2	–	320	6,2	
Передний мост	200	50	25	10	54,6	–	670	13	
Задний мост	200	25	12,5	5	32,1	38,5	650	12,6	
Цистерна	200	50	25	10	86,1	–	630	12,2	
Пожарный насос	200	50	25	10	56,9	–	65	1,2	

Таблица 3 – Определение остаточного ресурса АЦ-5,0-40 (модель 5309)

Основная часть	Срок службы					
	1 год		5 лет		10 лет	
	Расход ресурса K_P , %	Остаточный ресурс K_O , %	Расход ресурса K_P , %	Остаточный ресурс K_O , %	Расход ресурса K_P , %	Остаточный ресурс K_O , %
1	2	3	4	5	6	7
Автомобиль	9,9	80,1	36,7	53,3	58,6	31,4
Кабина	14	76	52,7	37,3	77,4	12,6
Кузов	14	76	52,7	37,3	77,4	12,6
Рама	8,7	81,3	37	53	60,9	29,1
Двигатель	9,2	80,8	40	50	31,2	58,8
Коробка передач	5,9	84,1	26,8	63,2	47,2	42,8
Раздаточная коробка	5,9	84,1	26,8	63,2	47,2	42,8
Передний мост	7,3	82,7	32,1	57,9	54,6	35,4
Задний мост	7,3	82,7	0	90	38,5	51,5
Цистерна	14,3	75,7	56,6	33,4	86,1	3,9
Пожарный насос	7,7	82,3	33,7	56,3	56,9	33,1

Остаточный ресурс обычно оценивают в процентном соотношении: 100 % – ресурс нового ПАЦ; 0 % – ресурс ПАЦ, полностью исчерпавшего ресурс использования.

В СТБ 11.13.24-2017 и ГОСТ 34350-2017 определено, что полный средний срок службы до списания для новых ПАЦ установлен не менее 10 лет с момента ввода в эксплуатацию, однако предлагаемый метод позволяет продлить их использование. Связано это с тем, что остаточный ресурс оборудование может иметь не только до истечения расчетного срока службы, но и после него [5]. Это обусловлено действующими нормами и правилами расчета сроков службы оборудования, предусматривающими обеспечение прочности и износостойкости изделий при наиболее неблагоприятных режимах нагружения в заданных условиях эксплуатации, а также при минимальных уровнях механических характеристик конструкционных материалов, обеспечиваемых по государственным стандартам. Фактические режимы нагружения при соблюдении правил эксплуатации оказываются, как правило, менее напряженными, чем расчетные, что снижает интенсивность расходования заложенных запасов (по прочности, износо- и коррозионной стойкости) и обеспечивает резерв по остаточному ресурсу оборудования [5].

В зависимости от технического состояния, а также выработки (расхода) ресурса ПАЦ в работе [20] предложено разделение пожарных автоцистерн на категории с учетом расхода их ресурса:

I – новая, исправная, не бывшая в использовании, в пределах гарантийных сроков использования (хранения), с расходом ресурса менее 20 %;

II – исправная, находившаяся в использовании (на хранении), а также прошедшая капитальный ремонт, с расходом ресурса от 20 до 50 %;

III – неисправная, по техническому состоянию требующая проведения текущего ремонта, с расходом ресурса от 50 до 70 %;

IV – неисправная, выработавшая установленные сроки эксплуатации и требующая по своему техническому состоянию проведения капитального ремонта, с расходом ресурса от 70 до 90 %;

V – неисправная, выработавшая установленные сроки эксплуатации, восстановление которой технически невозможно или экономически нецелесообразно, с расходом ресурса более 90 %.

На основании полученных данных (таблица 4) определен расход ресурса эксплуатируемой в УПАСЧ УГЗ АЦ-5,0-40 (5309) (рисунок 4), при этом после 10 лет использования ПАЦ находится в III категории (неисправная, по техническому состоянию требующая проведение текущего ремонта).

Графики расхода ресурса ПАЦ аппроксимируются зависимостями:

от наработки $y = 0,0097x^3 - 0,413x^2 + 8,771x + 1,4262$;

от пробега $y = 8E-05x^3 - 0,0165x^2 + 1,7754x + 1,4262$.

Прогнозирование остаточного ресурса показывает, что:

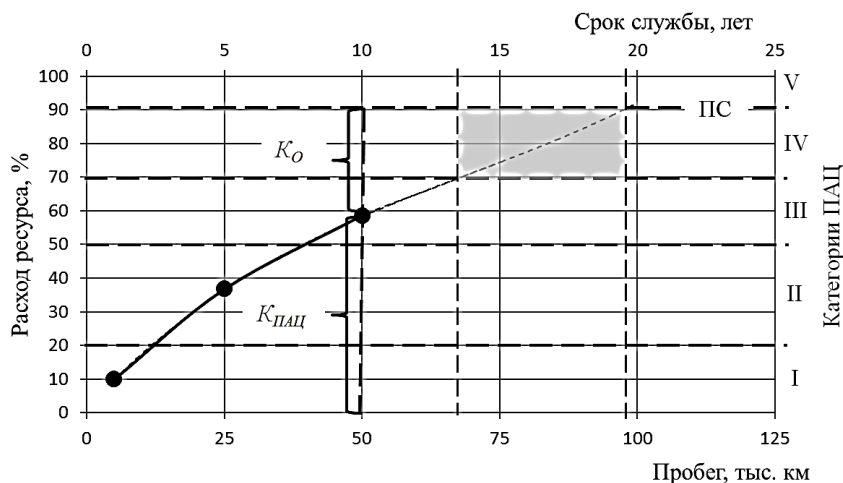
до перехода в IV категорию по наработке $\approx 3,4$ года;

до перехода в IV категорию по пробегу $\approx 17,0$ тыс. км;

до наступления ПС по наработке $\approx 9,36$ года;

до наступления ПС по пробегу $\approx 46,8$ тыс. км.

Результаты определения расхода ресурса некоторых характерных основных частей (задний мост, коробка передач, цистерна) АЦ-5,0-40 (5309), эксплуатируемой в УПАСЧ УГЗ, проиллюстрированы на рисунке 5. Задний мост и коробка передач имеют расход ресурса менее 50 % и, как показывает прогноз, могут еще длительное время эксплуатироваться. В то же время цистерна после 10 лет использования практически достигла своего ПС и требует проведения ремонта или замены.



ПС – предельное состояние ПАЦ (расход ресурса 90 %); K_O – остаточный ресурс ПАЦ (%); $K_{ПАЦ}$ – расход ресурса ПАЦ (%)

Рисунок 4 – Ресурс АЦ-5,0-40 (модель 5309) и его составляющие

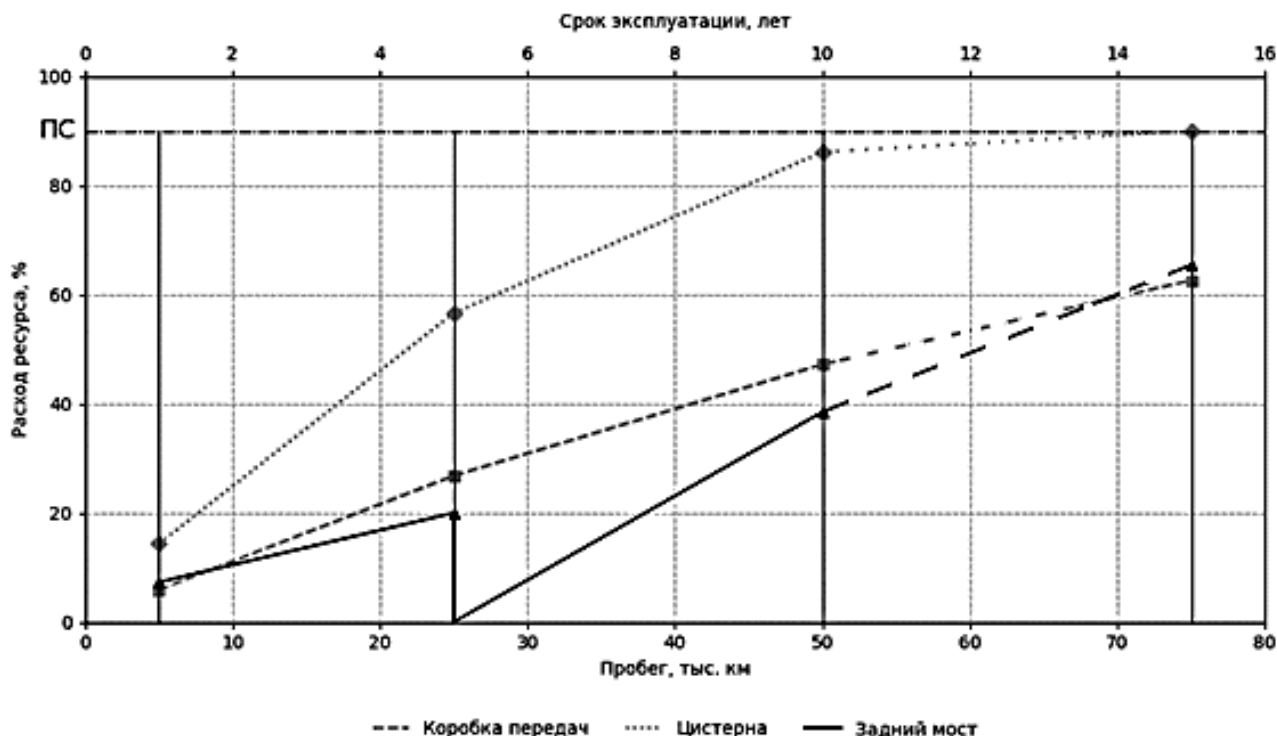


Рисунок 5 – Расход ресурса основных частей АЦ-5,0-40 (модель 5309)

Заключение

Предложен метод оценки остаточного ресурса ПАЦ с учетом расхода ресурса ее основных частей, учитывающий износ под воздействием факторов пробега и времени эксплуатации. Особенностью рассмотренного подхода является применение различных по виду и параметрам законов, описывающих воздействие нагружающих факторов и времени эксплуатации на расход ресурса основных составных частей ПАЦ.

Предлагаемый метод позволяет определять остаточный срок службы или остаточный пробег для ПАЦ в целом и дифференцированно учитывать расход ресурса всех ее основных частей, в том числе замененных во время эксплуатации, с учетом их пробега и работы в стационарном режиме. Это дает возможность устанавливать периодичность проведения ремонтов и технического обслуживания ПАЦ и тем самым влиять на его показатели надежности.

Приведен пример расчета с использованием разработанного метода остаточного ресурса образца АЦ-5,0-40 (5309) с емкостью цистерны 5000 л, эксплуатируемой в УПАСЧ УГЗ. Расчет показал, что при пробеге 50 тыс. км (срок службы 10 лет) ПАЦ выработала полный средний срок службы до списания согласно нормативной документации, однако ее эксплуатация может быть продлена, т. к. расход ресурса ПАЦ составляет 58,6 %, что позволяет отнести ее к III категории – неисправная, по техническому состоянию требующая проведения текущего ремонта. Задний мост и коробка передач имеют расход ресурса менее 50 % и могут еще длительное время эксплуатироваться. Цистерна приближается к своему ПС, требуя проведения ремонта или замены.

В настоящее время предлагаемый метод оценки остаточного ресурса ПАЦ используется в учебном процессе ГУО «Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь» при изучении учебной дисциплины «Пожарная аварийно-спасательная техника», а также проходит апробацию в УПАСЧ УГЗ.

Список цитированных источников

- Дубровин, В. И. Методы оценки остаточного ресурса изделий (обзор) / В. И. Дубровин, В. А. Клименко // Математичні машини і системи. – 2010. – № 4. – С. 162–168.
- Nagy, J. Predictive maintenance and predictive repair of road vehicles—opportunities, limitations and practical applications / J. Nagy, I. Lakatos // Engineering Proceedings. – 2024. – DOI: 10.1007/s10010-020-00415-0.

- Vietze, D. Method for a cloud based remaining-service-life-prediction for vehicle-gearboxes based on big-data-analysis and machine learning / D. Vietze, M. Hein, K. Stahl // Forsch Ingenieurwes. – 2020. – DOI: 10.3390/engproc2024079027.
- Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации: РД 26.260.004-91. – М. : НИИХИММАШ, 1992. – 50 с.
- Равин, А. А. Инженерные методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования / А. А. Равин, О. В. Хруцкий // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2018. – № 1. – С. 33–47. – DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-33-47.
- Методика оценки расхода ресурса пожарных автоцистерн / Е. Г. Казутин, А. В. Коваленко, А. М. Гоман, А. С. Скороходов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2024. – № 3 (68). – С. 63–70.
- Методические указания. Надежность в технике. Методика прогнозирования остаточного ресурса машин и деталей, подверженных изнашиванию: РД 50-423-83. – М., 1984. – 38 с. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=2033945> (дата обращения: 25.03.2025).
- Дубов, А. А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / А. А. Дубов // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – № 3. – С. 46–49.
- Шевнин, В. М. Методы оценки остаточного ресурса металлических конструкций грузоподъемных кранов, отработавших нормативный срок службы / В. М. Шевнин, Ю. М. Гофман // Подъемные сооружения и спец. техника. – 2001. – № 2. – С. 25–26.
- Зудов, Г. Ю. Методика расчета остаточного срока службы автомобиля / Г. Ю. Зудов, А. М. Ишков, А. И. Левин // Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 12 (95). – С. 161–165.
- Жданко, Д. А. Прогнозирование остаточного ресурса мобильных энергетических средств : учебное пособие / Д. А. Жданко, В. Е. Тарасенко, Т. А. Непарко. – Минск : БГАТУ, 2022. – 280 с.
- Волков, Д. Н. Надежность строительных машин и оборудования / Д. Н. Волков, С. Н. Николаев. – М. : Высш. школа, 1979. – 400 с.

13. Kumar, A. Visual Defect Identification and Prediction of Remaining Useful Lifefor Automobile Components / A. Kumar, D. Gupta, R. P. Singh // 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kamand, India, 2024. – DOI: 10.1109/ICCCNT61001.2024.10725095.
14. Андриян, К. Э. Анализ и планирование технического обслуживания и ремонта сложного объекта на основе его функционального состояния / К. Э. Андриян, Д. А. Курсин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2011. – № 8. – С. 11.
15. Диагностирование автомобилей. Практикум : учеб. пособие / А. Н. Карташев, В. А. Белоусов, А. А. Рудашко, А. В. Новиков ; под ред. А. Н. Карташевича. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2011. – 208 с.
16. Баженов, Ю. В. Прогнозирование остаточного ресурса конструктивных элементов автомобилей в условиях эксплуатации // Ю. В. Баженов, М. Ю. Баженов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 4. – С. 16–21.
17. Окладникова, Е. Н. Вероятностная оценка ресурса узлов трения износа / Е. Н. Окладникова, Е. В. Сугак // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. – 2005. – № 3. – С. 148–152.
18. Сугак, Е. В. Надежность технических систем : лаб. практикум / Е. В. Сугак. – Красноярск : СибГАУ, 2004. – 141 с.
19. Правила организации технической службы в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь : приказ МЧС Республики Беларусь от 15 апр. 2024 г., № 165. – Минск, 2024. – 269 с.
20. Казутин, Е. Г. Категорирование пожарных автоцистерн с учетом расхода их ресурса / Е. Г. Казутин, А. С. Скороходов // Актуальные вопросы машиноведения. – Минск, 2024. – Вып. 13. – С. 205–209.
7. Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost' v tekhnike. Metodika prognozirovaniya ostatochnogo resursa mashin i detalej, podverzhennyh iznashivaniyu: RD 50-423-83. – М., 1984. – 38 с. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=2033945> (data obrashcheniya: 25.03.2025).
8. Dubov, A. A. Problemy ocenki ostatochnogo resursa stareyushchego oborudovaniya / A. A. Dubov // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. – 2003. – № 3. – С. 46–49.
9. Shevnin, V. M. Metody ocenki ostatochnogo resursa metallicheskih konstrukcij gruzopod'emnyh kranov, otrabotavshih normativnyj srok sluzhby / V. M. Shevnin, YU. M. Gofman // Pod'emnye sooruzheniya i spec. tekhnika. – 2001. – № 2. – С. 25–26.
10. Zudov, G. YU. Metodika rascheta ostatochnogo sroka sluzhby avtomobilya / G. YU. Zudov, A. M. Ishkov, A. I. Levin // Vestnik IrGTU. – 2014. – № 12 (95). – С. 161–165.
11. Zhdanko, D. A. Prognozirovanie ostatochnogo resursa mobil'nyh energeticheskikh sredstv : uchebnoe posobie / D. A. Zhdanko, V. E. Tarasenko, T. A. Neparko. – Minsk : BGATU, 2022. – 280 s.
12. Volkov, D. N. Nadezhnost' stroitel'nyh mashin i oborudovaniya / D. N. Volkov, S. N. Nikolaev. – М. : Vyssh. shkola, 1979. – 400 s.
13. Kumar, A. Visual Defect Identification and Prediction of Remaining Useful Lifefor Automobile Components / A. Kumar, D. Gupta, R. P. Singh // 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kamand, India, 2024. – DOI: 10.1109/ICCCNT61001.2024.10725095.
14. Andriyan, K. E. Analiz i planirovanie tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta slozhnogo ob'ekta na osnove ego funktsional'nogo sostoyaniya / K. E. Andriyan, D. A. Kursin // Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. Bauman. – 2011. – № 8. – С. 11.
15. Diagnostirovanie avtomobilej. Praktikum : ucheb. posobie / A. N. Kartashevich, V. A. Belousov, A. A. Rudashko, A. V. Novikov ; pod red. A. N. Kartashevicha. – Minsk : Novoe znanie ; М. : INFRA-M, 2011. – 208 s.
16. Bazhenov, YU. V. Prognozirovanie ostatochnogo resursa konstruktivnykh elementov avtomobilej v usloviyakh ekspluatatsii // YU. V. Bazhenov, M. YU. Bazhenov // Fundamental'nye issledovaniya. – 2015. – № 4. – С. 16–21.
17. Okladnikova, E. N. Veroyatnostnaya ocenka resursa uzlov treniya iznosa / E. N. Okladnikova, E. V. Sugak // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M. F. Reshetneva. – 2005. – № 3. – С. 148–152.
18. Sugak, E. V. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem : lab. praktikum / E. V. Sugak. – Krasnoyarsk : SibGAU, 2004. – 141 s.
19. Pravila organizatsii tekhnicheskoy sluzhby v organah i podrazdeleniyah po chrezvychajnym situatsiyam Respubliki Belarus' : prikaz MCHS Respubliki Belarus' ot 15 apr. 2024 g., № 165. – Minsk, 2024. – 269 s.
20. Kazutin, E. G. Kategorirovanie pozharnykh avtocistern s uchetom rashkoda ih resursa / E. G. Kazutin, A. S. Skorohodov // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya. – Minsk, 2024. – Vyp. 13. – С. 205–209.

References

Материал поступил 16.05.2025, одобрен 20.06.2025, принят к публикации 20.06.2025

УДК 621.9.08, 621.83.06

СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ ШУМОВЫХ ПОМЕХ ОТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕДУЦИРУЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ

А. В. Капитонов¹, О. А. Капитонов², В. С. Дроздов³

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, МОУВО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь, e-mail: kavbru@gmail.com

² Старший преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, МОУВО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь, e-mail: kapitonov1987@gmail.com

³ Студент машиностроительного факультета МОУВО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь

Реферат

В статье рассматриваются вопросы, относящиеся к проблеме устранения шумовых помех при получении сигнала с датчика частоты вращения во время измерений и контроля кинематических параметров редуцирующих механизмов на испытательном специализированном стенде. Показаны недостатки испытательных стендов при их использовании для измерений кинематической погрешности и ее гармонических составляющих с понижением частоты вращения ведущего вала редуктора. Показано, что преобразователь частоты, подключенный к электродвигателю на испытательном стенде и используемый для понижения частоты вращения электродвигателя, является источником шумовых помех, искажающих полезный сигнал, поступающий с датчика частоты вращения. Отмечено, что известные методы фильтрации сигнала на основе математических зависимостей не обеспечивают полное устранение шума и не могут быть использованы при контроле показателей точности передач после их изготовления. С целью полного устранения шумовых помех разработаны три способа фильтрации на основе численных методов, которые могут эффективно использоваться на испытательных стендах при измерениях и контроле кинематических параметров, представляющих показатели точности редуцирующих механизмов. Представлены графики кинематической погрешности редуктора и ее численные значения до и после фильтрации сигнала с помощью разработанных способов. Показана зашумленность сигнала, полученная с разной частотой вращения ведущего вала редуктора. Даны рекомендации по использованию разработанных способов фильтрации сигнала при измерениях в зависимости от частоты вращения ведущего вала. Разработанные способы фильтрации сигнала позволяют получить достоверные измеряемые значения и обеспечить высокую точность контроля испытательных стендов.

Ключевые слова: способы фильтрации, шумовые помехи, измерения кинематических параметров, редуцирующие механизмы, показатели точности.

WAYS TO ELIMINATE NOISE INTERFERENCE FROM A FREQUENCY CONVERTER WHEN MEASURING KINEMATIC PARAMETERS OF REDUCING MECHANISMS

A. V. Kapitonov, O. A. Kapitonov, V. S. Drozdov

Abstract

The article discusses issues related to the problem of eliminating noise interference when receiving a signal from a speed sensor during measurements and monitoring of kinematic parameters of reducing mechanisms on a specialized test bench. The disadvantages of the test benches are shown when they are used to measure the kinematic error and its harmonic components with a decrease in the speed of rotation of the drive shaft of the gearbox. It is shown that a frequency converter connected to an electric motor on a test bench and used to lower the speed of the electric motor is a source of noise interference that distorts the useful signal coming from the speed sensor. It is noted that the known signal filtering methods based on mathematical dependencies do not provide complete noise elimination and cannot be used to control the accuracy of transmissions after their manufacture. In order to completely eliminate noise interference, three filtration methods based on numerical methods have been developed that can be effectively used on test benches for measuring and controlling kinematic parameters representing the accuracy of reducing mechanisms. Graphs of the kinematic error of the gearbox and its numerical values before and after filtering the signal using the developed methods are presented. The noise level of the signal obtained with different rotational speeds of the drive shaft of the gearbox is shown. Recommendations are given on the use of the developed signal filtering methods for measurements depending on the speed of rotation of the drive shaft. The developed signal filtering methods make it possible to obtain reliable measured values and ensure high accuracy of control of test benches.

Keywords: filtering methods, noise interference, measurements of kinematic parameters, reduction mechanisms, accuracy indicators.

Введение

Контроль качества изготовления редуцирующих механизмов выполняется на универсальных и специализированных стендах. В настоящее время известны испытательные стенды [1] для силовых установок, трансмиссионных компонентов, оснащенные датчиками крутящего момента и скорости, гистерезисными и магнитными порошковыми тормозными устройствами, преобразователями частоты и другим оборудованием. Известны также стенды Atestman [2] для испытания редукторов и трансмиссий, оснащенные различным оборудованием, включая динамометры с малой инерцией нагрузки, высокоскоростные приводные двигатели, преобразователи частоты, климатические камеры, системы охлаждения, высокоточные датчики, системы мониторинга и оповещения о вибрации, системы управления и другие устройства. Испытательные стенды этих производителей являются универсальными и многофункциональными и используются для контроля, диагностики и мони-

торинга различных механизмов (редукторов, трансмиссий, двигателей) по большому количеству кинематических, динамических параметров, температурных и других характеристик. В этих стендах используются дорогостоящие аппаратные и программные системы для устранения шумовых помех при получении и обработке сигналов с датчиков на основе известных математических методов фильтрации, которые могут не полностью устранять случайные сигналы с энкодеров (датчиков частоты вращения) [3]. Кроме того, использование универсальных многофункциональных испытательных стендов только в области контроля точности представляется неэффективным. Для этого применяются конструкции специализированных стендов и устройств. Авторами статьи разработаны стенды и устройства контроля показателей точности в соответствии со стандартами ГОСТ после изготовления зубчатых и других типов передач и редукторов [4–8]. Для большей информативности испытания механизмов на стендах проводятся с разной частотой вращения электродвигателя, соединенного с ведущим валом редуктора.

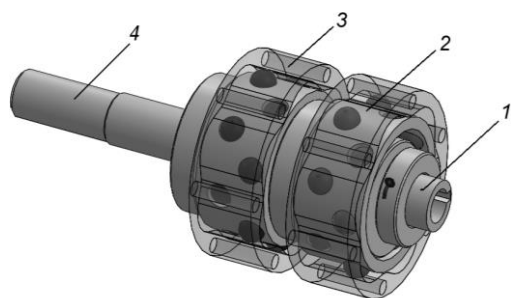
В этом случае к электродвигателю подключают преобразователь частоты. Если не использовать фильтры по устранению шума, источником которого является преобразователь частоты, то полученный сигнал с энкодеров искажается и зашумляется, при этом получают недостоверные значения показателей точности передач. Поэтому одной из основных проблем при измерениях кинематических параметров редуцирующих механизмов на специализированных стендах является устранение шумовых помех, идущих от преобразователей частоты при изменении скорости вращения электродвигателя.

Целью исследования является разработка более эффективных и менее затратных способов устранения шумовых помех при получении сигнала с энкодера специализированного стенда по сравнению с известными методами фильтрации и дорогостоящими средствами универсальных стендов.

Известны способы фильтрации и фильтры низких частот, основанные на математических методах расчета, Баттерворта, Чебышева, инверсный Чебышева, Кауэра, Бесселя, отличие которых друг от друга обусловлено различным подходом к выбору коэффициентов полиномов, которые обеспечивают наилучшее приближение к желаемой амплитудно-частотной или фазо-частотной характеристике фильтра [9]. Однако эти способы фильтрации обладают одним общим недостатком – малой эффективностью при подавлении импульсных помех. К тому же применяемые при подавлении шумов фильтры низких частот смазывают крутые перепады сигнала. Известен способ медианной фильтрации, основанный на методике сглаживания зашумленных сигналов, обеспечивающей подавление импульсных помех и в то же время сохранение крутых перепадов [10]. Этот способ фильтрации основан на вычислениях медианы отсчетов сигнала. Однако он, уменьшая искажения формы сигнала, полностью их не устраняет, сохраняя зашумление сигналов. Известные математические методы фильтрации сигналов не устраняют полностью шумовые помехи, поэтому поставлена задача разработать способы фильтрации на основе численных методов.

Разработка способов устранения шумовых помех при измерениях кинематических параметров редуцирующих механизмов

Для устранения шумов из полезного сигнала энкодера разработано три уровня фильтрации, которые представляют собой три способа обработки импульсных сигналов. Для исследований использовался двухступенчатый планетарный редуктор [11–14] (рисунок 1) с передаточным отношением $i = 49$.



1 – ведущий вал; 2 – первая ступень; 3 – вторая ступень;
4 – ведомый вал

Рисунок 1 – Планетарный редуктор

На рисунке 2 показано окно разработанного программного обеспечения измерительной системы специализированного стенда [15, 16], выполненного на основе патента [7] с графиком импульсных сигналов, полученных с энкодера стенда на ПЭВМ без фильтрации шумов сигналов. График получен при измерениях кинематических характеристик планетарного редуктора с передаточным отношением $i = 49$, с пониженной регулятором скорости частотой вращения ведущего вала 100 об/мин, без нагрузки. При такой небольшой частоте вращения регулятор скорости создает наибольшее количество шумов. При этой частоте вращения ведущего вала редуктора за время одного оборота его выходного вала число импульсных сигналов, исходящих из энкодера, составляет 792 934. На графике без фильтрации сигналов и на последующих графиках с отфильтрованными сигналами показано только 256 импульсных сигналов за время их следования.

Машиностроение

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-137-2-62-67>

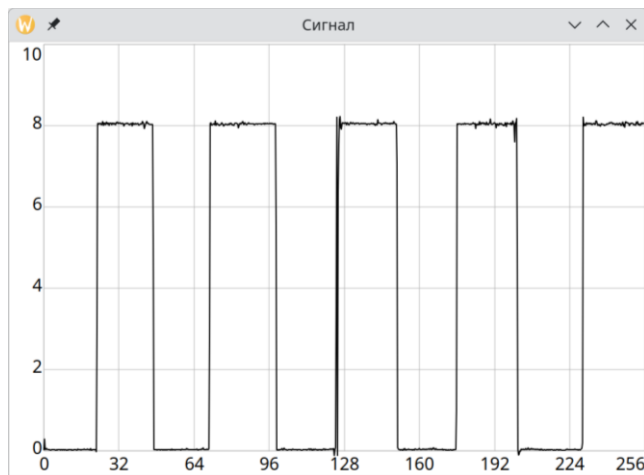


Рисунок 2 – Окно программы с графиком импульсных сигналов с зависимостью напряжения от времени без фильтрации шумов

На графике (рисунок 2) по вертикальной оси показано напряжение в вольтах (В), а по горизонтальной оси – число импульсных сигналов. Напряжение наименьшего и наибольшего сигналов 0 В и 8,1 В соответственно. На графике видны случайные сигналы в виде больших и малых скачков, являющиеся шумами, искажающих форму прямоугольных импульсов.

Первый способ фильтрации сигнала. От датчика частоты вращения (энкодера) на два канала аналого-цифрового преобразователя (АЦП) стенда поступают импульсные сигналы в виде групп прямоугольных импульсов «напряжение – время» в противофазе. Сигналы проходят через черные и прозрачные сектора оптического диска датчика. Сигнал u_{ni} , проходящий через прозрачный сектор (номинальный 8,1 В) на один канал АЦП, совпадает с сигналом u_{ci} , проходящим через черный сектор (номинальный 0 В) на второй канал. Рассчитывается разность этих сигналов, которая дает отфильтрованный сигнал:

$$u_{fi} = u_{ni} - u_{ci}, \quad (1)$$

Первый фильтр уменьшает влияние шума при измерениях, однако он не устраняет его полностью. Эффективность первого фильтра зависит от степени зашумленности (количества импульсов, числовые значения которых не соответствуют значениям импульсов без влияния шума). Чем больше степень зашумленности получаемого сигнала, тем менее эффективен этот способ фильтрации.

На рисунке 3 показано окно разработанной программы с графиком импульсных сигналов, полученных с энкодера специализированного стенда после первой фильтрации шумов.

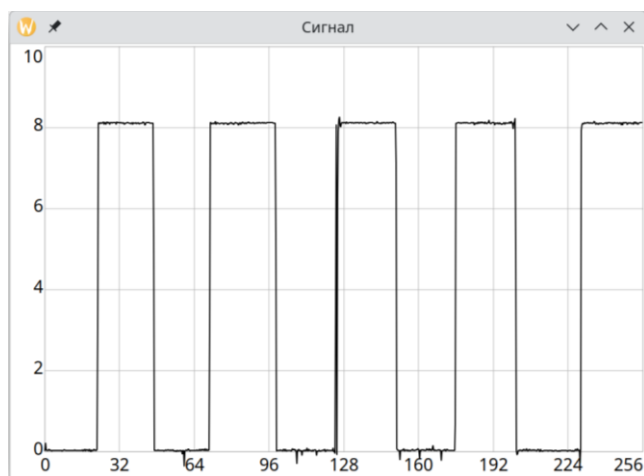


Рисунок 3 – Окно программы с графиком импульсных сигналов с зависимостью напряжения от времени после первой фильтрации шумов

График (рисунок 3) после первой фильтрации шумов показывает незначительные уменьшения случайных сигналов и мало отличается от графика без фильтрации на рисунке 2. Первый способ фильтрации для данной степени зашумленности оказался недостаточно эффективным и незначительно уменьшил влияние шумов на полезный сигнал.

Второй способ фильтрации сигнала. Устанавливаются верхняя и нижняя границы (горизонтальные линии) числовых значений импульсных сигналов ($u_{\text{вг}} = 7,5$ В и $u_{\text{нг}} = 0,5$ В) близкие к наибольшему и наименьшему номинальным значениям, определяемым датчиком частоты вращения. Если величина поступившего сигнала u_i с датчика на АЦП больше значения верхней границы $u_{\text{вг}}$, то числовое значение этого сигнала u_i приравнивается к числовому номинальному значению верхней границы ($u_{\text{вг}}^{\text{н}}$ = 8,1 В). Если величина поступившего сигнала u_i с датчика на АЦП меньше значения нижней границы $u_{\text{нг}}$, то числовое значение этого сигнала u_i приравнивается к числовому номинальному значению нижней границы ($u_{\text{нг}}^{\text{н}}$ = 0 В). Если сигнал находится между верхней и нижней границей, то его числовое значение u_i принимается равным числовому значению предыдущего сигнала u_{i-1} , равного $u_{\text{вг}}^{\text{н}}$ или $u_{\text{нг}}^{\text{н}}$:

$$\begin{cases} \text{если } u_i > u_{\text{вг}}, \text{ то } u_i = u_{\text{вг}}^{\text{н}}; \\ \text{если } u_i < u_{\text{нг}}, \text{ то } u_i = u_{\text{нг}}^{\text{н}}; \\ \text{если } u_{\text{вг}} < u_i < u_{\text{нг}}, \text{ то } u_i = u_{i-1}. \end{cases} \quad (2)$$

Второй фильтр устанавливает для всех сигналов, поступающих с датчика частоты вращения, либо номинальное максимальное (8,1 В), либо номинальное минимальное (0 В) значение. Все сигналы принимают одно из двух значений, при этом выстраивается и многократно чередуется последовательность групп из номинальных максимальных и номинальных минимальных значений. Среди группы максимальных значений могут появляться случайные минимальные значения и наоборот, при этом остается зашумленность сигналов случайными максимальными и минимальными значениями «ложными сигналами», которые нужно отфильтровать.

На рисунке 4 показано окно разработанной программы с графиком импульсных сигналов, полученных с энкодера специализированного стенда после второй фильтрации шумов.

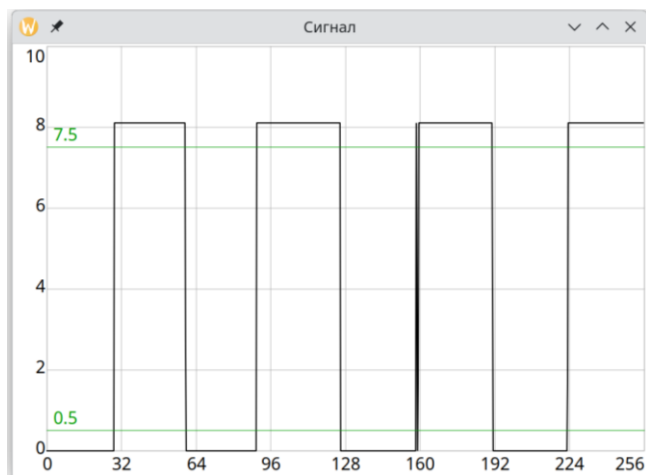


Рисунок 4 – Окно программы с графиком импульсных сигналов с зависимостью напряжения от времени после второй фильтрации шумов

Из графика (рисунок 4) видно значительное уменьшение случайных сигналов и соответственно уменьшение влияния шумов по сравнению с графиками на рисунках 2 и 3. Форма графика практически идеальная (рисунок 4), но на графике виден ложный сигнал в окрестности 160-го импульса из 256 показанных. Такие же случайные ложные сигналы проявляются за время следования всех импульсов за оборот выходного вала редуктора.

Третий способ фильтрации сигнала. Выбираются последовательно группы значений из трех, четырех, пяти, шести и семи им-

пульсных сигналов от начала следования импульсов со смещением на один импульс. Если крайние числовые значения группы u_1 и u_m оба минимальные (0 В) и равны u_0 или оба максимальные (8,1 В) и равны $u_{8,1}$, то числовые значения внутри группы u_i принимаются равными крайним значениям группы u_0 или $u_{8,1}$. Фильтрация группы из семи импульсных сигналов принята завершающей, т. к. после нее все случайные сигналы исключаются.

$$\begin{cases} u_1, u_2, u_3 \dots u_n, n = 7; \\ \text{если } u_1 = u_m = u_0, \text{ то } u_i < u_i < u_m, u_i = u_0; \\ \text{если } u_1 = u_m = u_{8,1}, \text{ то } u_i < u_i < u_m, u_i = u_{8,1}. \end{cases} \quad (3)$$

Оценка импульсных сигналов и кинематической погрешности редуктора после фильтрации шумов. На рисунке 5 показано окно разработанной программы с графиком импульсных сигналов, полученных с энкодера специализированного стенда после третьей фильтрации шумов.

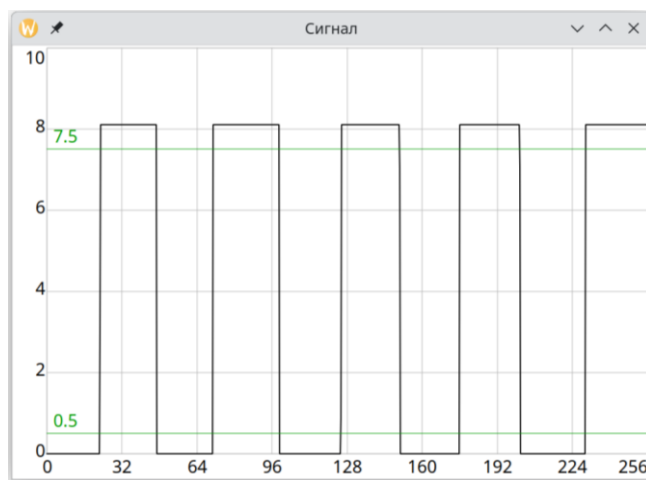


Рисунок 5 – Окно программы с графиком импульсных сигналов с зависимостью напряжения от времени после третьей фильтрации шумов

Из графика (рисунок 5) видно, что после третьего способа фильтрации шумов устранены, на графике нет случайных сигналов.

По численным значениям сигналов, полученных с энкодера и представленных на графике (рисунки 2–5), разработаны компьютерные программы для расчета кинематических параметров в виде угловых перемещений, угловых скоростей, передаточных отношений и кинематической погрешности редукторов. Кинематическая погрешность и ее гармонические составляющие характеризуют показатели точности передачи (редуктора), значения которых определяют при измерениях и контроле качества изготовления передачи и сравнивают со значениями ГОСТов [17–20].

На рисунке 6 показано окно разработанной программы с графиками кинематической погрешности и ее амплитудно-частотного спектра исследуемого планетарного редуктора, представленного на рисунке 1 без фильтрации шумов. Кинематическая погрешность и ее гармонические составляющие характеризуют показатели точности передачи (редуктора).

На графике (рисунок 6) кинематическая погрешность имеет высокочастотные шумы и график от нулевого значения уходит вверх и не возвращается в ноль, что объясняется накоплением импульсного шума. Наибольшая кинематическая погрешность (разность между наибольшим и наименьшим значением на графике) в данном случае составила 8,95 градуса. Она значительно превышает действительную кинематическую погрешность из-за наличия шумов. На амплитудно-частотном спектре кинематической погрешности редуктора видно большое количество гармоник небольшой амплитуды и большие значения амплитуд первых гармоник, что характеризует наличие импульсных шумов, которые создают ложные гармоники и увеличивают амплитуды действительных гармоник.

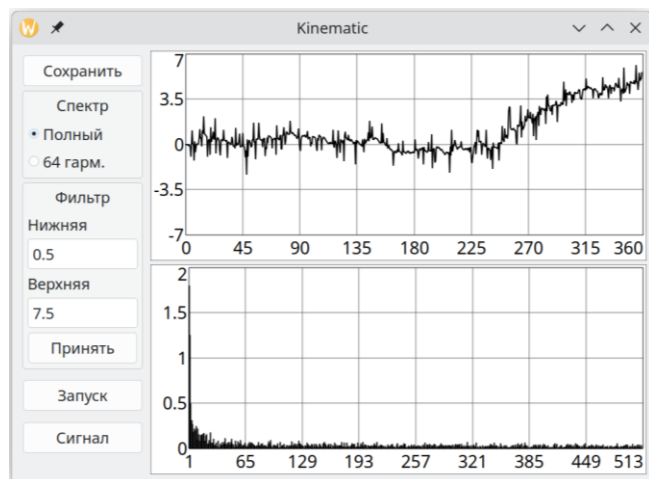


Рисунок 6 – Окно программы с графиком кинематической погрешности редуктора без фильтрации шумов

После применения первого способа фильтрации форма графика и его наибольшее значение мало изменились, наибольшая кинематическая погрешность при этом составила 8,39 градуса. На рисунке 7 показано окно разработанной программы с графиками кинематической погрешности и ее амплитудно-частотного спектра исследуемого планетарного редуктора после применения второго способа фильтрации шумов.

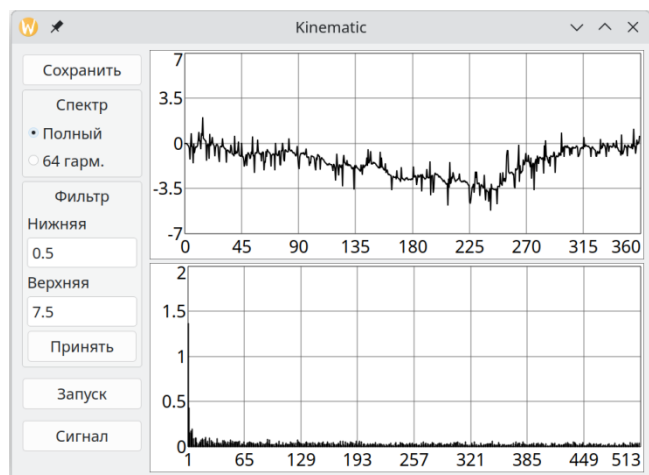


Рисунок 7 – Окно программы с графиком кинематической погрешности редуктора после второй фильтрации шумов

График кинематической погрешности (рисунок 7) начинается и заканчивается нулевым значением, что характеризует отсутствие накопления и уменьшение импульсных шумов, при этом после второй фильтрации шумов уменьшилась наибольшая кинематическая погрешность редуктора, она составила 7,26 градусов. На амплитудно-частотном спектре заметно уменьшились амплитуды первых гармоник.

На рисунке 8 показано окно разработанной программы с графиками кинематической погрешности и ее амплитудно-частотного спектра исследуемого планетарного редуктора после применения третьего способа фильтрации шумов, который после предыдущих двух способов окончательно устраняет шумы. На рисунке 8 представлены отфильтрованные графики кинематической погрешности и амплитудно-частотного спектра с действительными гармониками без влияния шума. Наибольшая кинематическая погрешность после применения третьего способа фильтрации составила 0,93 градуса.

Исследования показали, что при фильтрации шумов передач с понижением частоты вращения ведущего вала преобразователем частоты третий способ фильтрации является наиболее эффективным, однако первый и второй способы фильтрации подготавливают данные

для фильтрации сигналов третьим способом и поэтому необходимо использовать последовательно три способа фильтрации.

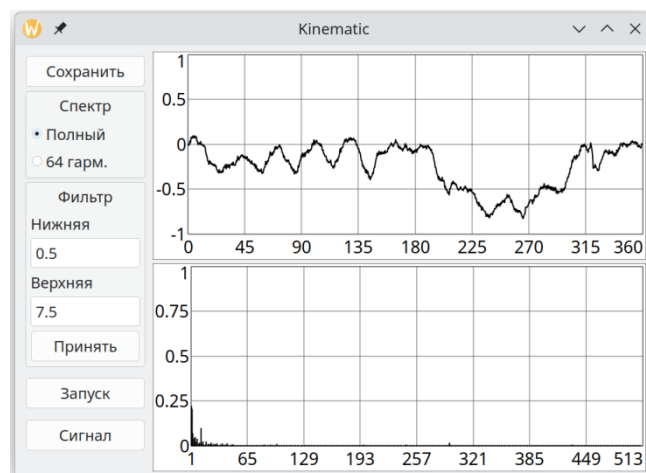


Рисунок 8 – Окно программы с графиком кинематической погрешности редуктора после третьей фильтрации шумов

Форма графика, амплитудно-частотный спектр с гармоническими составляющими, значение наибольшей кинематической погрешности, изображенные на рисунке 8, представляют собой действительную кинематическую погрешность исследуемого планетарного редуктора с $i = 49$.

При исследованиях кинематических параметров редукторов с частотой вращения электродвигателя 1500 об/мин, соединенного с ведущим валом редуктора, без снижения частоты вращения ведущего вала редуктора и поэтому без применения преобразователя частоты, достаточно использовать только второй способ фильтрации, который полностью устраняет случайные сигналы.

На рисунках 9 и 10 показаны окна разработанной программы с графиками импульсных сигналов, полученных с энкодера специализированного стенда без фильтрации и после второй фильтрации шумов при частоте вращения электродвигателя 1500 об/мин.

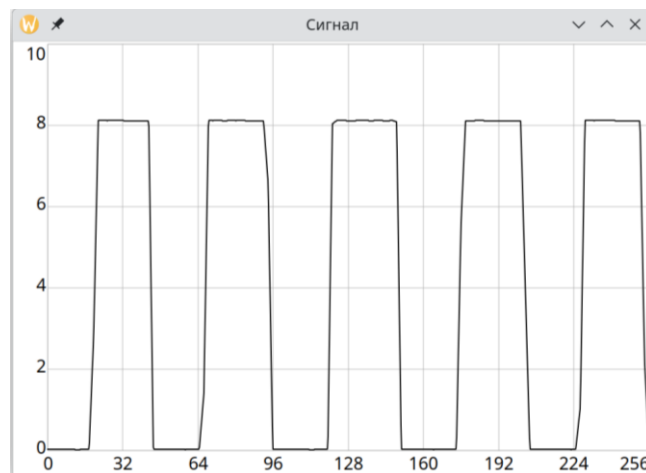


Рисунок 9 – Окно программы с графиком импульсных сигналов с зависимости напряжения от времени без фильтрации шумов при частоте вращения электродвигателя 1500 об/мин

На графике (рисунок 9) видно, что без фильтрации сигнала, снимаемого с энкодера без регулятора скорости с частотой вращения электродвигателя и ведущего вала редуктора 1500 об/мин, есть случайные импульсы, искажающие прямолинейность трапецеидальных сигналов. При этом видна значительно меньшая зашумленность сигнала по сравнению с результатами, полученными при пониженной частоте вращения электродвигателя до 100 об/мин (рисунок 2).

На рисунке 10 представлено окно программы с отфильтрованным сигналом, с его прямолинейной формой, после использования второго способа фильтрации. Исследования показали, что без использования преобразователя частоты, создающего зашумление сигнала, первый и третий способы фильтрации не требуются, так как сигнал с энкодера в данном случае практически идет без шума и поэтому для устранения небольших шумов достаточно использовать только второй способ их фильтрации.

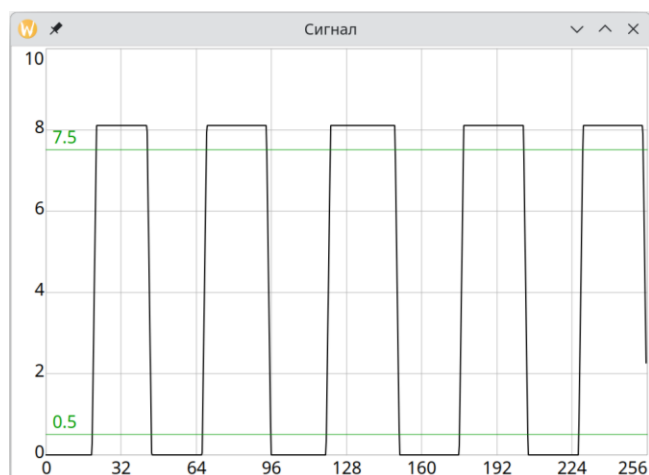


Рисунок 10 – Окно программы с графиком импульсных сигналов с зависимости напряжения от времени после второй фильтрации шумов при частоте вращения электродвигателя 1500 об/мин

На рисунке 11 показано окно разработанной программы с графиками кинематической погрешности и амплитудно-частотного спектра исследуемого планетарного редуктора с частотой вращения ведущего вала 1500 об/мин без использования регулятора скорости после применения второго способа фильтрации шумов.

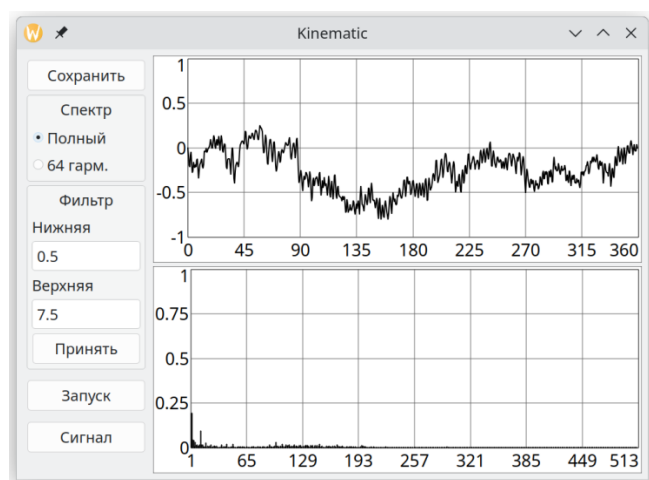


Рисунок 11 – Окно программы с графиком кинематической погрешности редуктора после второй фильтрации шумов при частоте вращения электродвигателя 1500 об/мин

Наибольшая кинематическая погрешность на графике (рисунок 11) составила 1,064 градуса и практически не учитывает влияние шумов. На графике, полученном с частотой вращения электродвигателя 1500 об/мин (рисунок 11), значения кинематической погрешности и местных кинематических погрешностей превышают значения, представленные на графике, полученном с частотой вращения электродвигателя 100 об/мин (рисунок 8), из-за увеличения частоты вращения валов редуктора.

Заключение

В результате исследований рассмотрены существующие средства испытаний и контроля редуцирующих механизмов. Описаны проблемы при разработке испытательных специализированных стендов и устройств, заключающиеся в зашумленности сигналов, поступающих с энкодеров, используемых в стендах для измерений и контроля кинематических параметров, представляющих показатели точности редукторов в сборе, с разной частотой вращения валов редуктора.

Разработаны и экспериментально апробированы способы устранения шумовых помех, идущих от преобразователя частоты. Эти способы заключаются в последовательной ступенчатой фильтрации сигнала от шума при измерениях с понижением преобразователем частоты скорости вращения электродвигателя испытательного стенда. Разработанные способы фильтрации сигнала на основе численных методов полностью устраняют шумовые помехи и позволяют рассчитать достоверные значения кинематических параметров редуцирующих механизмов на специализированных стендах. При этом разработанные программные способы фильтрации более эффективны и менее затратны, чем применяемые аппаратные средства многофункциональных стендов.

Проведенные исследования позволяют эффективно использовать разработанные способы фильтрации при контроле и испытаниях с разной частотой вращения валов после проектирования и изготовления любых типов редуцирующих механизмов для получения достоверных значений и высокоточных средств контроля.

Список цитированных источников

1. Jiangsu Lanmec Technology Co., Ltd. [сайт]. – URL: https://ru.made-in-china.com/co_lanlingjidian/company_info.html?pv_id=1itkva893aa&faw_id=1itkvabds458 (дата обращения: 13.06.2025).
2. Стенд для испытания редукторов и трансмиссий. – URL: <https://www.atestman.com/product/reducer-and-transmission-test-bench-13.html> (дата обращения: 13.06.2025).
3. Повышение точности механических передач на основе компьютерного моделирования и использования технологий искусственного интеллекта: монография / В. М. Пашкевич, М. Ф. Пашкевич, Д. А. Забелин, Ю. В. Козлов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2011. – 139 с.
4. Патент ВУ 4858, МПК G 01M 13/02. Стенд для контроля кинематической точности передач: № 19981066: заявлено 26.11.1998: опубл. 03.12.2002 / Пашкевич М. Ф., Герашенко В. В., Пашкевич В. М., Пашкевич А. М., Капитонов А. В.; заявитель Могилев. машин. ин-т. – 5 с.
5. Патент ВУ 4341, МПК G 01M 13/02. Устройство для контроля кинематической точности зубчатых передач: № 19980949: заявлено 21.10.1998: опубл. 30.03.2002 / Пашкевич М. Ф., Герашенко В. В., Пашкевич В. М., Пашкевич А. М., Капитонов А. В.; заявитель Могилев. гос. техн. ун-т. – 4 с.
6. Патент ВУ 24475, МПК G 01M 13/02 (2019.01). Устройство для определения значений кинематических погрешностей механической передачи: № 20220272: заявлено 31.10.2022: опубл. 20.12.2024 / Капитонов А. В., Пашкевич В. М., Капитонов О. А.; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – 5 с.
7. Патент ВУ 24474, МПК G 01M 13/02 (2019.01). Стенд для испытания механической передачи: № 20220271: заявлено 31.10.2022: опубл. 20.12.2024 / Капитонов А. В., Пашкевич В. М., Капитонов О. А.; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – 5 с.
8. Пашкевич, М. Ф. Стенды для испытания редукторов / М. Ф. Пашкевич, В. В. Герашенко. – Минск: БелНИИТИ, 1991. – 44 с.
9. Гутников, В. С. Фильтрация измерительных сигналов / В. С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 192 с.
10. Ивашко, А. В. Методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов: учеб. пособие / А. В. Ивашко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 233 с.
11. Капитонов, А. В. Кинематические и массогабаритные характеристики ресурсоэффективных механических передач. Компьютерное моделирование, экспериментальная оценка: монография / А. В. Капитонов, В. М. Пашкевич. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 248 с.

12. Методы экспериментальных исследований кинематической точности планетарных передач с промежуточными телами качения и контроля профиля беговых дорожек / А. В. Капитонов, С. Г. Черняков, К. В. Сасковец, А. И. Касьянов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2016. – № 2 (51). – С. 41–50. – DOI: 10.53078/20778481.
13. Капитонов, А. В. Методы оценки точности малогабаритных планетарных передач с промежуточными телами качения / А. В. Капитонов, В. М. Пашкевич // Актуальные вопросы машиноведения: сб. тр. / Объедин. ин-т машиностр. НАН Беларуси. – Минск, 2020. – Вып. 9. – С. 51–54.
14. Kapitonov, A. V. Optimization of geometrical parameters and estimation of kinematic accuracy of resource effective planetary transmission. / A. V. Kapitonov // Advances in Engineering Research. – 2018. – Vol. 158. – P. 165-168. – DOI: 10.2991/avent-18.2018.32.
15. Капитонов, А. В. Совершенствование стенда и методики для контроля кинематических и точностных параметров редуцирующих механизмов / А. В. Капитонов, В. М. Пашкевич, О. А. Капитонов // Актуальные вопросы машиноведения: сб. тр. / Объедин. ин-т машиностр. НАН Беларуси. – Минск, 2022. – Вып. 11. – С. 53–56.
16. Капитонов, А. В. Точность и контроль малогабаритных планетарных механизмов: монография / А. В. Капитонов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – 160 с.
17. Марков, А. Л. Измерение зубчатых колес (допуски, методы и средства контроля) / А. Л. Марков. – Л. : Машиностроение, 1977. – 280 с.
18. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учебное пособие / В. Е. Антонюк, В. Е. Старжинский, Е. В. Шалобаев [и др.]. – СПб. : ЦОП Профессия, 2007. – 832 с.
19. Капитонов, А. В. Исследование кинематической точности планетарных роликовых передач методами гармонического анализа и контроля в сборе / А. В. Капитонов, С. Г. Черняков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2011. – № 4 (33). – С. 40–50. – DOI: 10.53078/20778481.
20. Исследование кинематической погрешности планетарного эксцентрикового редуктора / А. В. Капитонов, Д. В. Непша, М. В. Гончаров [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2014. – № 3 (44). – С. 14–24. – DOI: 10.53078/20778481.
6. Patent BY 24475, MPK G 01M 13/02 (2019.01). Ustrojstvo dlya opredeleniya znachenij kinematicheskikh pogreshnostej mekhanicheskoy peredachi: № 20220272: заявлено 31.10.2022: opubl. 20.12.2024 / Kapitonov A. V., Pashkevich V. M., Kapitonov O. A.; заявитель' Belarus.-Ros. un-t. – 5 s.
7. Patent BY 24474, MPK G 01M 13/02 (2019.01). Stend dlya ispytaniya mekhanicheskoy peredachi: № 20220271: заявлено 31.10.2022: opubl. 20.12.2024 / Kapitonov A. V., Pashkevich V. M., Kapitonov O. A.; заявитель' Belarus.-Ros. un-t. – 5 s.
8. Pashkevich, M. F. Stendy dlya ispytaniya reduktorov / M. F. Pashkevich, V. V. Gerashchenko. – Minsk : BelNIINTI, 1991. – 44 s.
9. Gutnikov, V. S. Fil'traciya izmeritel'nyh signalov / V. S. Gutnikov. – L. : Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1990. – 192 s.
10. Ivashko, A. V. Metody i algoritmy cifrovoy obrabotki signalov: ucheb. posobie / A. V. Ivashko. – Har'kov : NTU «HPI», 2003. – 233 s.
11. Kapitonov, A. V. Kinematicheskie i massogabaritnye harakteristiki resursoeffektivnyh mekhanicheskikh peredach. Komp'yuternoe modelirovanie, eksperimental'naya ocenka: monografiya / A. V. Kapitonov, V. M. Pashkevich. – Mogilev : Belarus.-Ros. un-t, 2017. – 248 s.
12. Metody eksperimental'nyh issledovaniy kinematicheskoy tochnosti planetarnykh peredach s promezhutochnymi telami kacheniya i kontrolya profilya begovykh dorozhek / A. V. Kapitonov, S. G. Chemyakov, K. V. Saskovec, A. I. Kas'yanov // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2016. – № 2 (51). – С. 41–50. – DOI: 10.53078/20778481.
13. Kapitonov, A. V. Metody ocenki tochnosti malogabaritnykh planetarnykh peredach s promezhutochnymi telami kacheniya / A. V. Kapitonov, V. M. Pashkevich // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sb. tr. / Ob'edin. in-t mashinostr. NAN Belarusi. – Minsk, 2020. – Vyp. 9. – С. 51–54.
14. Kapitonov, A. V. Optimization of geometrical parameters and estimation of kinematic accuracy of resource effective planetary transmission. / A. V. Kapitonov // Advances in Engineering Research. – 2018. – Vol. 158. – P. 165-168. – DOI: 10.2991/avent-18.2018.32.
15. Kapitonov, A. V. Sovershenstvovanie stenda i metodiki dlya kontrolya kinematicheskikh i tochnostnykh parametrov reduciuyushchikh mekhanizmov / A. V. Kapitonov, V. M. Pashkevich, O. A. Kapitonov // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sb. tr. / Ob'edin. in-t mashinostr. NAN Belarusi. – Minsk, 2022. – Vyp. 11. – С. 53–56.
16. Kapitonov, A. V. Tochnost' i kontrol' malogabaritnykh planetarnykh mekhanizmov: monografiya / A. V. Kapitonov. – Mogilev : Belarus.-Ros. un-t, 2021. – 160 s.
17. Markov, A. L. Izmerenie zubchatykh koles (dopuski, metody i sredstva kontrolya) / A. L. Markov. – L. : Mashinostroenie, 1977. – 280 s.
18. Tekhnologiya proizvodstva i metody obespecheniya kachestva zubchatykh koles i peredach: uchebnoe posobie / V. E. Antonyuk, V. E. Starzhinskij, E. V. Shalobaev [i dr.]. – SPb. : COP Professiya, 2007. – 832 s.
19. Kapitonov, A. V. Issledovanie kinematicheskoy tochnosti planetarnykh rolkovykh peredach metodami garmonicheskogo analiza i kontrolya v sbore / A. V. Kapitonov, S. G. Chemyakov // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2011. – № 4 (33). – С. 40–50. – DOI: 10.53078/20778481.
20. Issledovanie kinematicheskoy pogreshnosti planetarnogo ekscentrikovogo reduktora / A. V. Kapitonov, D. V. Nepsha, M. V. Goncharov [i dr.] // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2014. – № 3 (44). – С. 14–24. – DOI: 10.53078/20778481.

References

1. Jiangsu Lanmec Technology Co., Ltd. [sait]. – URL: https://ru.made-in-china.com/co_lanlingjidian/company_info.html?pv_id=1itkva893aa&faw_id=1itkvabds458 (data obrashcheniya: 13.06.2025).
2. Stend dlya ispytaniya reduktorov i transmissij. – URL: <https://www.atestman.com/product/reducer-and-transmission-test-bench-13.html> (data obrashcheniya: 13.06.2025).
3. Povyshenie tochnosti mekhanicheskikh peredach na osnove komp'yuternogo modelirovaniya i ispol'zovaniya tekhnologii iskusstvennogo intellekta: monografiya / V. M. Pashkevich, M. F. Pashkevich, D. A. Zabelin, YU. V. Kozlov. – Mogilev : Belarus.-Ros. un-t, 2011. – 139 s.
4. Patent BY 4858, MPK G 01M 13/02. Stend dlya kontrolya kinematicheskoy tochnosti peredach: № 19981066: заявлено 26.11.1998: opubl. 03.12.2002 / Pashkevich M. F., Gerashchenko V. V., Pashkevich V. M., Pashkevich A. M., Kapitonov A. V.; заявитель' Mogilev. mashin. in-t. – 5 s.
5. Patent BY 4341, MPK G 01M 13/02. Ustrojstvo dlya kontrolya kinematicheskoy tochnosti zubchatykh peredach: № 19980949: заявлено 21.10.1998: opubl. 30.03.2002 / Pashkevich M. F., Gerashchenko V. V., Pashkevich V. M., Pashkevich A. M., Kapitonov A. V.; заявитель' Mogilev. gos. tekhn. un-t. – 4 s.

Материал поступил 17.06.2025, одобрен 27.06.2025, принят к публикации 28.06.2025

ЭЛЕКТРОИСКРОВЫЕ ФТОРСОДЕРЖАЩИЕ ПОКРЫТИЯ

**Е. В. Овчинников¹, А. Ч. Свистун², А. И. Веремейчик³, Н. В. Лебедев⁴,
В. М. Хвиевич⁵, В. Ю. Фалёса⁶, Е. И. Амирханов⁷, А. Е. Овчинников⁸**

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 К. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: svistun_ach@grsu.by

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 Д. х. н., главный научный сотрудник ФГУП «Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. Академика С. В. Лебедева», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: n.lebedev@fgupniisk.ru

⁵ К. т. н., доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vmhvisovich@bstu.by

⁶ Директор ООО «Центр диагностики, экспертизы и сертификации», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: efdec@yandex.ru

⁷ Заместитель директора ООО «Центр диагностики, экспертизы и сертификации», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: efdec@yandex.ru

⁸ Студент инженерного факультета, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: hugaralex@mail.ru

Реферат

В настоящее время для увеличения эксплуатационного ресурса машин и механизмов применяются различного типа покрытия. Представлено новое направление создания гибридных покрытий на основе сочетания процессов электроискрового легирования металлических поверхностей и последующей обработке в растворах поверхностно-активных фторсодержащих соединений. Целью исследований является изучение морфологии и физико-механических характеристик гибридных покрытий, формируемых путем совмещения процессов электроискрового формирования твердых покрытий и последующей обработке в растворе фторсодержащего поверхностного активного вещества. В качестве подложки для формирования покрытий использовали сталь Р6М5. Для формирования покрытий применяли электроды W, Т15К6. Для модифицирования электроискровых покрытий при модифицировании подложки использовали фолеокс Ф-5 структурной формулой $Rf-CONHR_2$. Исследования проводили с использованием современных методов: растровая электронная и оптическая микроскопия, микродюраметрический анализ, ИК-спектроскопия НПВО, профилометрия, методы коррозионных испытаний. Показано, что процесс формирования гибридных покрытий позволяет существенно увеличить физико-механические характеристики как исходных металлических субстратов, так и модифицируемых электроискровых покрытий. Данный эффект увеличения эксплуатационных характеристик выражается в возрастании значений микротвердости и коррозионной стойкости гибридных покрытий. Наблюдается возрастание значений микротвердости гибридных покрытий на 12–15 % по отношению к традиционным электроискровым покрытиям. Процесс возрастания значений микротвердости стальных субстратов и электроискровых покрытий при обработке фторсодержащими олигомерами обусловлен залечиванием микродефектов на поверхности исследуемых образцов и образованием прочного хемосорбционного соединения между подложкой (сталь, ЭИЛ-покрытия) и фторорганическими слоями. Формирование данных гибридных покрытий позволит существенно снизить коэффициент трения и интенсивность изнашивания разработанных гибридных покрытий.

Ключевые слова: гибридные покрытия, электроискровое легирование, морфология, фторсодержащие олигомеры, микротвердость, коррозионная стойкость.

ELECTROSPARK FLUORINE-CONTAINING COATINGS

**E. V. Ovchinnikov, A. Ch. Svistun, A. I. Verameichyk, N. V. Lebedev, V. M. Khvisevich,
V. Yu. Falyosa, E. I. Amirkhanov, A. E. Ovchinnikov**

Abstract

Currently, various types of coatings are used to increase the service life of machines and mechanisms. A new direction in the creation of hydride coatings is presented based on a combination of the processes of electrospark alloying of metal surfaces and subsequent treatment in solutions of surface-active fluorine-containing compounds. The aim of the research is to study the morphology and physical and mechanical characteristics of hybrid coatings formed by combining the processes of electrospark formation of hard coatings and subsequent treatment in a solution of a fluorine-containing surface-active substance. Steel P6M5 was used as a substrate for the formation of coatings. Electrodes W, T15K6 were used to form the coatings. Foleox F-5 with the structural formula $Rf-CONHR_2$ was used to modify electrospark coatings when modifying the substrate. The studies were carried out using modern methods: scanning electron and optical microscopy, microdurametric analysis, NTR IR spectroscopy, profilometry, corrosion testing methods. It is shown that the process of hybrid coating formation allows to significantly increase the physical and mechanical characteristics of both the original metal substrates and the modified electric spark coatings. This effect of increasing the performance characteristics is expressed in the increase in the microhardness and corrosion resistance of the hybrid coatings. An increase in the microhardness of hybrid coatings by 12–15 % is observed in relation to traditional electric spark coatings. The process of increasing the microhardness of steel substrates and electric spark coatings when treated with fluorine-containing oligomers is due to the healing of microdefects on the surface of the samples under study and the formation of a strong chemisorption compound between the substrate (steel, EIL coating) and the organofluorine layers. The formation of these hybrid coatings will significantly reduce the friction coefficient and wear rate of the developed hybrid coatings.

Keywords: hybrid coatings, electric spark alloying, morphology, fluorine-containing oligomers, microhardness, corrosion resistance.

Введение

Электроискровое легирование является одной из распространенных технологий повышения ресурса различных деталей.

Для повышения эксплуатационных свойств модифицируемых деталей более чем в 2 раза необходимо осуществлять выбор материала электрода, при котором обеспечивается создание в поверхностном

слое метастабильных структур, способных в зоне фрикционного контакта к многократным фазовым превращениям. Для поиска такого материала электрода разработан алгоритм, основанный на методе последовательного приближения [1]. Методом электроискрового легирования получены Ti-Ta покрытия толщиной 30,9–39,1 мкм [2]. Данное покрытие позволяет увеличить жаростойкость титанового сплава в 5,9 раз, микротвердость поверхности – от 4,72 до 4,91 ГПа [2]. Проведены исследования по изучению суммарного привеса катода и суммарной эрозии анода от времени нанесения покрытий методом электроискрового легирования (ЭИЛ) при различных режимах работы, а именно от частоты и продолжительности при использовании электродов на основе $\text{W}_4\text{C}+\text{Cu}$ в среде аргона [3]. Установлено, что при различных режимах ЭИЛ наблюдался устойчивый рост суммарного привеса катода за весь период легирования [3], а также улучшение физико-механических характеристик поверхностей. Поверхностный слой представляет собой композит из материала подложки и электрода. Привес на подложке увеличивается за счёт переноса массы электрода при повышении энергии разряда [4]. Высокое значение микротвёрдости полученного покрытия приводило к тому, что в процессе трения материал переносится на образец и возникает эффект взаимного влияния трущихся поверхностей [4]. Проведены исследования по изучению особенностей поведения как чистых металлов и сплавов (сталь, никель, титан), так и электроискровых покрытий из никеля и титана, сформированных на стали в кислых, нейтральных и щелочных средах [5]. Исследования показали, что при нанесении электроискровых покрытий режимы нанесения, материал электрода, материал подложки приводят к уменьшению скорости коррозии в 6,7 раза, в воде – до 210 раз, в 20 % растворе хлорида натрия – до 160 раз, а в 20 % растворе едкого натра – до 1,8 раза [5]. Создана механизированная установка для обработки цилиндрических ЭИЛ-покрытий. Результаты показали эффективность использования разработанного механизированного способа для формирования электроискровых покрытий, а также повышение эффективности нанесения ЭИЛ-покрытия при обдуве зоны легирования воздухом при давлении 1,5 МПа [6]. В результате исследований технологии электроискрового нанесения покрытий, легирования и упрочнений без использования защитного газа была подтверждена возможность выбора и регулировки параметров ЭИЛ-путем изменения силы тока, напряжения, емкости конденсаторной батареи [7].

Одним из перспективных направлений в создании электроискровых покрытий является использование наноразмерных частиц, вводимых в зону электроискрового легирования [8–10]. Данный подход позволяет существенно увеличить трибологические свойства пар трения субстрат с ЭИЛ-покрытием – металл, субстрат с ЭИЛ-покрытием – композит (керамика на основе кремния, титана и т. п.). Таким образом, применение электроискровых покрытий является эффективным способом повышения триботехнических, прочностных характеристик различного типа металлов, применяемых при изготовлении изделий и деталей различного типа техники, применяемой в машиностроении и строительстве. Однако при использовании данного метода возникает проблема, связанная с интенсивным износом контртела. Это явление обусловлено двумя причинами: высоким коэффициентом трения при контакте электроискровых покрытий, полученных на основе твердосплавных соединений с другими материалами; высокая твердость получаемых покрытий по сравнению с контактирующими изделиями, что обуславливает интенсивный износ контртела. Данные проблемы можно решить путем разделения контактирующих материалов «третьим телом», имеющим низкие значения сдвиговых напряжений в слоях материала. Обычно для применения в качестве «третьего тела» используют различные слоистые материалы (графит, малослойный графен и т. д.), полимерные материалы и жидкие смазки, модифицированные данными соединениями [8, 11]. Однако в качестве разделительного слоя можно применять фторсодержащие соединения, наносимые на поверхность ЭИЛ-покрытия или твердого субстрата из раствора. Такие разделительные слои обеспечивают снижение коэффициента трения для различного типа материалов и покрытий с существенным снижением значений интенсивности изнашивания [11–15].

Целью исследований является изучение морфологии и физико-механических характеристик гибридных покрытий, получаемых на основе электроискрового легирования сверхтвердыми материалами и созданием фторсодержащих слоев по растворной технологии на поверхности ЭИЛ-соединений.

Методика эксперимента

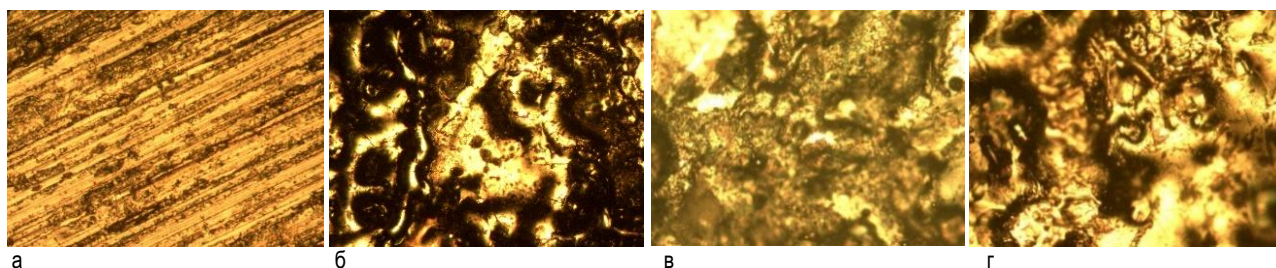
Композиционные электроискровые покрытия на базе нитридов, карбидов, силицидов титана и алюминия наносили методом электроискрового легирования на установке UR-121, позволяющей обеспечить качество нанесения покрытий на металлический субстрат. В качестве подложки для формирования покрытий использовали сталь Р6М5. Для формирования покрытий применяли электроды W, T15K6. Покрытия наносили на металл в состоянии поставки, которую шлифовали до 9–10 класса чистоты на оригинальной установке электроискрового легирования. Для определения оптимального режима, при котором максимальное количество порошка могло попасть в зону действия разряда, частота вибрации обрабатываемого электрода медленно варьировалась от 100 до 30 Гц. Процесс ЭИЛ проводили в диапазоне значений энергии разряда от 0,3 до 10,0 Дж. Изучались электроискровые покрытия, сформированные с применением только одного электрода, так и с применением двух электродов. В случае изучения многослойных покрытий первый слой формировали с применением вольфрамового катода, затем проводилось формирование покрытий с использованием катода T15K6. Формирование фторсодержащих покрытий осуществляли на металлических и керамических субстратах путем окунания их в 1–2 масс.% раствор фторсодержащего олигомера (ФСО) в хладоне-113. В данной работе при модифицировании подложки использовали фолеокс Ф-5 со структурной формулой R-CONHR_2 . Для изучения молекулярной и надмолекулярной структуры фторсодержащих электроискровых покрытий применяли ИК-спектроскопию НПВО (нарушенного полного внутреннего отражения). Исследования проводили на ИК Фурье-спектрометре Bruker Tensor 27. Анализ особенностей морфологии и структуры композиционных покрытий и их модификаций, подвергнутых различным видам обработки, осуществляли на универсальном металлографическом комплексе ЗАО «Спектроскопические системы». Для измерения микротвердости покрытий, сформированных на металлах, использовали микротвердомер HWMMT-X7. Принцип действия прибора основан на изменении линейной величины диагонали отпечатка, полученного от вдавливания алмазной пирамиды в исследуемый материал под определенной нагрузкой. Морфологию покрытий исследовали на растровом электронном микроскопе «MIRA3 TESCAN». Топографию защитных слоев определяли на профилометре «Surftec SJ-210». Коррозионные испытания проводили в камере солевого тумана согласно требованиям ГОСТ 9.311-87.

Результаты исследований

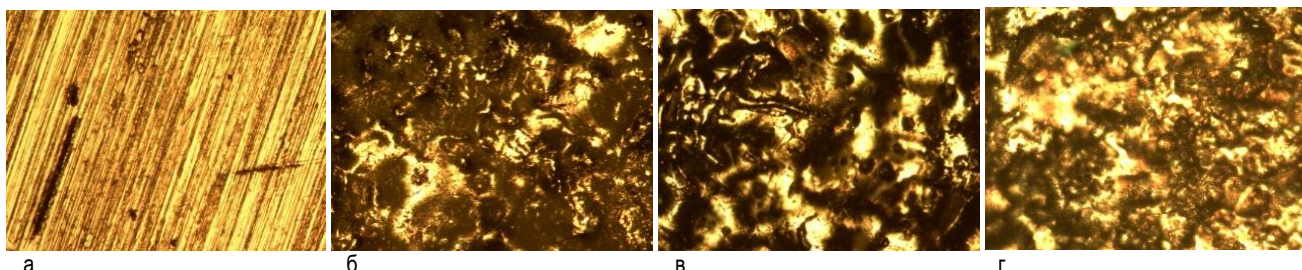
Проведен морфологический анализ покрытий, полученных методом электроискрового осаждения на стали Р6М5 с применением катодов W, T15K6, W+T15K6. Результаты исследований представлены на рисунке 1.

Согласно полученным данным, формирование электроискровых покрытий приводит к образованию развитого рельефа на подобие «шагреневой кожи». На поверхности покрытия виды сплеты-места контакта электрода с поверхностью. Данная морфологическая картина характерна и для композиционных покрытий, сочетающих слой из материала T15K6 и слой из материала W. На рисунке 2 приведены результаты морфологического анализа электроискровых покрытий, модифицированных фторсодержащими олигомерами.

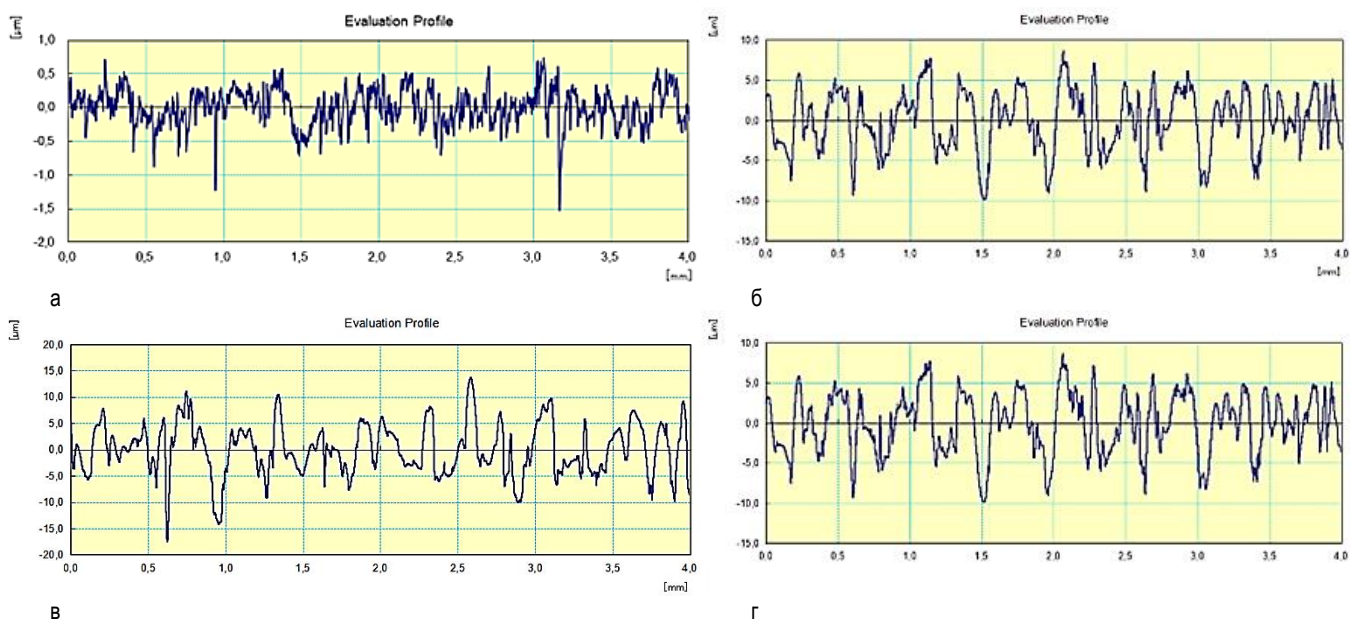
Однократная обработка металлического субстрата в 5 %-ном растворе фторсодержащего олигомера Ф-5 приводит к сглаживанию исходного рельефа исходной стали Р6М5, но для исследуемых электроискровых покрытий, сформированных на данном стальном субстрате, параметры шероховатости возрастают после обработки в растворе фторсодержащего олигомера. Данный результат подтверждают профилометрические исследования как исходных образцов, так и гибридных покрытий (рисунок 3).



а – исходная сталь Р6М5; б – W; в – Т15К6; г – W+Т15К6
Рисунок 1 – Морфология электрохромных покрытий, $\times 250$



а – исходная сталь Р6М5; б – исходная сталь Р6М5+покрытие ФСО Ф-5; в – Т15К6+покрытие ФСО Ф-5; г – Т15К6+W+покрытие ФСО Ф-5
Рисунок 2 – Морфология композиционных гибридных электрохромных покрытий, $\times 250$



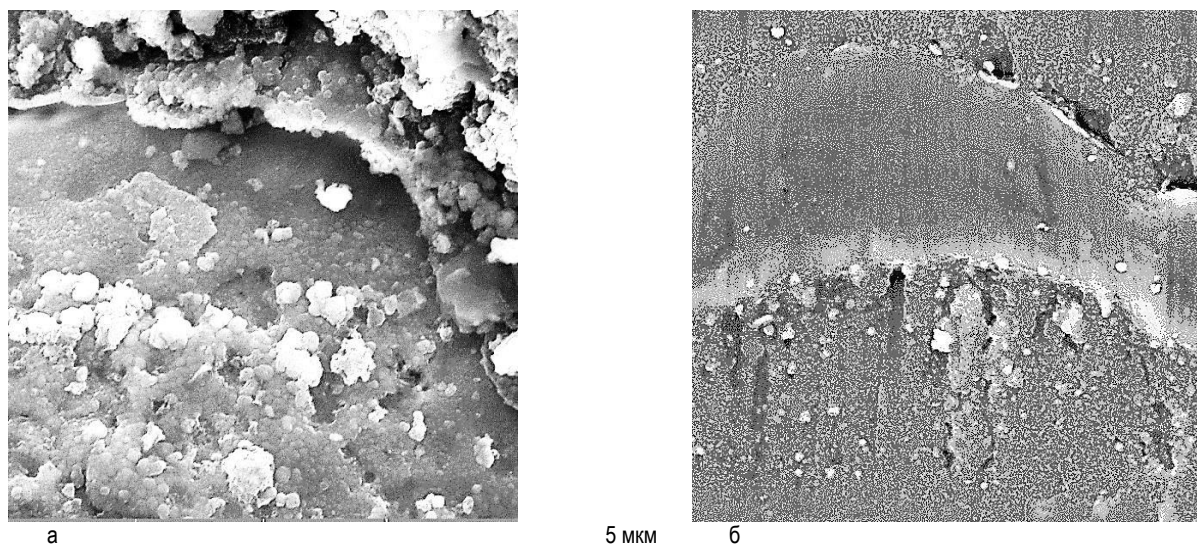
а – исходная сталь Р6М5+покрытие ФСО Ф-5, б – Т15К6+W; в – Т15К6+покрытие ФСО Ф-5; г – Т15К6+W+покрытие ФСО Ф-5
Рисунок 3 – Топография композиционных гибридных электрохромных покрытий

Фторорганическое покрытие полностью покрывает электрохромные слои, сформированные на быстрорежущей стали. Большая часть фторорганического материала расположена в различных углублениях и порах электрохромного покрытия. Данное распределение фторсодержащего олигомера на поверхности ЭИЛ-покрытий обеспечивает повышенную коррозионную стойкость. Формирование фторсодержащих соединений на поверхности электрохромных покрытий позволяет закрыть поверхностные дефекты в виде каверн, сплетов, продольных и поперечных трещин и т. п., что в конечном счете даст возможность существенно увеличить триботехнические характеристики данных гибридных покрытий в различных парах трения. Это обусловлено тем, что слои фторсодержащего олигомера имеют низкие сопротивления сдвигу, а также возможностью закрывать ювенильные поверхности сопрягаемых тел, возникающие при трении [11].

Исследования, проведенные методом растровой электронной

микроскопии, также подтверждают результаты исследований по изучению морфологии покрытий, полученных методом оптической микроскопии. Формирование электрохромных покрытий на металлическом субстрате приводит к образованию развитого рельефа с наличием в нем фаз, находящихся в нанометровом диапазоне. Последующее формирование покрытий из фторорганических соединений на модифицированных металлических субстратах приводит к сглаживанию развитой топографии покрытий по отношению к базовым электрохромным покрытиям (рисунок 4).

Формирование фторсодержащих олигомеров на поверхности металлов и керамических соединений приводит к протеканию хемосорбционного взаимодействия, о чем свидетельствует появление полос поглощения в спектре фторсодержащего олигомера в области 1640–1660 см^{-1} . Обработка Ф-5 поверхности электрохромных покрытий приводит к координации CONHR₂-групп по типу бидентантного лиганда.



а – покрытие Т15К6+W; б – покрытие Т15К6+W+Ф-5
Рисунок 4 – Морфология электроискровых покрытий, модифицированных фторсодержащим олигомером Ф-5

Создание многослойного композиционного покрытия, получаемого по гибридной технологии, заключающейся на первой стадии получения однослойного или многослойного электроискрового покрытия, а на второй стадии осаждение фторорганического соединения приводит к существенному повышению коррозионных свойств разработанных композиционных покрытий (таблица 1).

Таблица 1 – Коррозионная стойкость электроискровых покрытий, модифицированных фторсодержащими олигомерами

Исследуемые образцы	Вид коррозионных поражений	Оценочный бал
P6M5	Г	4
W	Б	6
T15K6	Б	7
T15K6+W	Б	8
P6M5+Ф-5	А	9
W+Ф-5	А	A10
T15K6+Ф-5		A10

Установленные структурные и морфологические изменения при формировании электроискровых покрытий приводят к возрастанию физико-механических свойств исследуемых композиционных покрытий. Так, композиционные покрытия на основе W и T15K6 обладают наиболее высокими значениями микротвердости по сравнению с другими типами электроискровых покрытий. Дополнительная обработка фторсодержащими олигомерами металлических и керамических соединений позволяет увеличить значения микротвердости исследуемых покрытий на 12–15 % (таблица 2).

Таблица 2 – Микротвердость электроискровых покрытий, модифицированных фторсодержащими олигомерами

Исследуемые образцы	Значения микротвердости (H _v), ГПа (m=50 гр)
P6M5	3,2
W	4,2
T15K6	16,8
T15K6+W	19,4
P6M5+Ф-5	4,1
W+Ф-5	5,6
T15K6+Ф-5	17,6
T15K6+W+Ф-5	20,8

Заключение

Установлено, что процесс формирования гибридных покрытий позволяет существенно увеличить физико-механические характеристики как исходных металлических субстратов, так и модифицируемых электроискровых покрытий. Данный эффект увеличения эксплуатационных характеристик выражается в возрастании значений микротвердости и коррозионной стойкости гибридных покрытий. Процесс возрастания значений микротвердости стальных субстратов и электроискровых покрытий при обработке фторсодержащими олигомерами обусловлен залечиванием микродефектов на поверхности исследуемых образцов и образованием прочного хемосорбционного соединения между подложкой (сталь, ЭИЛ-покрытия) и фторорганическим слоями. Формирование данных гибридных покрытий позволит существенно снизить коэффициент трения и интенсивность изнашивания разработанных гибридных покрытий.

Исследования выполнены при поддержке гранта ГС 01-25.

Список цитированных источников

1. Алгоритм выбора материала электрода при электроискровом легировании деталей / А. А. Богданов, В. В. Процев, С. Т. Пацера [и др.] // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожного університету : зб. наук. пр. – 2020. – Вип. 88, Т. 1. – С. 113–117.
2. Электроискровое осаждение Ti-Ta покрытий на титановый сплав Ti6Al4V: жаростойкость и трибологические свойства / А. А. Бурков, С. В. Николенко, В. О. Крутикова, Н. А. Шельменок // Физическая мезомеханика. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 159–168.
3. Гомжин, В. В. Электроискровое легирование стали 12X18H8T комбинированным электродом В₄C+CU / В. В. Гомжин, В. Л. Орлов, Ж. В. Еремеева // Современные материалы, техника и технологии. – 2023. – № 1 (46). – С. 23–27.
4. Физико-механические и трибологические свойства углеродсодержащих поверхностных нанокмпозитов, полученных электроискровым легированием / Д. М. Кройтору, С. А. Силкин, Н. Н. Казак [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2020. – № 56 (6). – С. 12–23.
5. Коваль, А. В. Исследование коррозионного поведения покрытий, полученных на стали при электроискровом легировании ручным вибратором повышенной частоты / А. В. Коваль // Электронная обработка материалов. – 2021. – № 27 (1). – С. 44–51.
6. Казанников, О. В. Исследование механизированного способа электро-искрового легирования / О. В. Казанников // Образование и право. – 2020. – № 10. – С. 225–232.

7. Глушко, С. П. Исследование технологии электроискрового нанесения покрытий, легирования и упрочнения / С. П. Глушко // *Advanced Engineering Research*. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 253–259.
8. Овчинников, Е. В. Электроискровые углеродные покрытия / Е. В. Овчинников, А. Т. Волочко, А. Е. Овчинников // *Актуальные проблемы прочности : материалы LXVIII Междунар. науч. конф., Витебск, 27–31 мая 2024 г. / под ред. В. В. Рубаника*. – Минск : «ИВЦ Минфина», 2024. – С. 379–381.
9. Антифрикционные электроискровые покрытия для зубчатых передач / Е. В. Овчинников, В. И. Лунь, А. Ч. Свистун [и др.] // *Горная механика и машиностроение*. – 2024. – № 4. – С. 92–99.
10. Synthesis of Multicomponent Coatings by Electrospark Alloying with Powder Materials / V. Mihailov, N. Kazak, S. Ivashcu [et al.] // *Coatings*. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 1–14.
11. 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.
12. Овчинников, Е. В. Наноструктурированные фторсодержащие покрытия / Е. В. Овчинников // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – № 2–3. – С. 60–67.
13. 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.
14. Структурно-морфологические особенности тонких пленок фторсодержащих соединений на металлических подложках / В. А. Струк [и др.] // *II Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии : матер. симп-ма, Иваново, 22–26 мая 1995 г. / ИГХТУ; редкол.: С. Я. Шнайдер [и др.] – Иваново, 1995. – С. 291.*
15. Struk, W. Besondeiheitender Struktur verschleißfester schichten fluorhaltiger oligomere an metallen und polymeren / W. Struk, E. Owtchinnikow, O. Choladilov // *Tribology – solving friction and wear problems: Proceedings of 10th International Colloquium, Esslingen, 09–10 jan. 1996 / Technische akademie Esslingen ; editor: W. J. Bartz. – Esslingen, 1996. – Vol. 3 – P. 1983–1988.*
5. Koval', A. V. Issledovanie korrozionnogo povedeniya pokrytij, poluchennyh na stali pri elektroiskrovom legirovanii ruchnym vibratorom povyshennoj chastoty / A. V. Koval' // *Elektronnaya obrabotka materialov*. – 2021. – № 27 (1). – С. 44–51.
6. Kazannikov, O. V. Issledovanie mekhanizirovannogo sposoba elektro-iskrovogo legirovaniya / O. V. Kazannikov // *Obrazovanie i pravo*. – 2020. – № 10. – С. 225–232.
7. Glushko, S. P. Issledovanie tekhnologii elektroiskrovogo naneseniya pokrytij, legirovaniya i uprochneniya / S. P. Glushko // *Advanced Engineering Research*. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 253–259.
8. Ovchinnikov, E. V. Elektroiskrovye uglerodnye pokrytiya / E. V. Ovchinnikov, A. T. Volochko, A. E. Ovchinnikov // *Aktual'nye problemy prochnosti : materialy LXVIII Mezhdunar. nauch. konf., Vitebsk, 27–31 maya 2024 g. / pod red. V. V. Rubanika*. – Minsk : «IVC Minfina», 2024. – С. 379–381.
9. Antifrikcionnye elektroiskrovye pokrytiya dlya zubchatyh peredach / E. V. Ovchinnikov, V. I. Lun', A. CH. Svistun [i dr.] // *Gornaya mekhanika i mashinostroenie*. – 2024. – № 4. – С. 92–99.
10. Synthesis of Multicomponent Coatings by Electrospark Alloying with Powder Materials / V. Mihailov, N. Kazak, S. Ivashcu [et al.] // *Coatings*. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 1–14.
11. Ovchinnikov, E. V. Tonkie plenki ftorsoderzhashchih oligomerov: osnovy sinteza, svoystva i primeneniye / E. V. Ovchinnikov, V. A. Struk, V. A. Gubanov. – Grodno : GGAU, 2007. – 326 s.
12. Ovchinnikov, E. V. Nanostrukturirovannye ftorsoderzhashchie pokrytiya / E. V. Ovchinnikov // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2013. – № 2–3. – С. 60–67.
13. Tribotekhnicheskie harakteristiki kompozicionnyh mnogoslojnyh pokrytij / E. V. Ovchinnikov, S. D. Leshchik, V. A. Struk [i dr.] // *Trenie i iznos*. – 2000. – Т. 21, № 2. – С. 147–155.
14. Strukturno-morfologicheskie osobennosti tonkih plenok ftorsoderzhashchih soedinenij na metallicheskih podlozhkah / V. A. Struk [i dr.] // *II Mezhdunarodnyj simpozium po teoreticheskoy i prikladnoj plazmohimii : mater. simp-ма, Ivanovo, 22–26 maya 1995 g. / IGHTU; redkol.: S. YA. SHnajder [i dr.] – Ivanovo, 1995. – С. 291.*
15. Struk, W. Besondeiheitender Struktur verschleißfester schichten fluorhaltiger oligomere an metallen und polymeren / W. Struk, E. Owtchinnikow, O. Choladilov // *Tribology – solving friction and wear problems: Proceedings of 10th International Colloquium, Esslingen, 09–10 jan. 1996 / Technische akademie Esslingen ; editor: W. J. Bartz. – Esslingen, 1996. – Vol. 3 – P. 1983–1988.*

References

1. Algoritm vybora materiala elektroda pri elektroiskrovom legirovanii detalej / A. A. Bogdanov, V. V. Prociy, S. T. Pacera [i dr.] // *Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhn'ogo universitetu : zb. nauk. pr.* – 2020. – Vip. 88, T. 1. – С. 113–117.
2. Elektroiskrovoe osazhdenie Ti-Ta pokrytij na titanovyj splav Ti6Al4V: zharostojkost' i tribologicheskie svoystva / A. A. Burkov, S. V. Nikolenko, V. O. Krutikova, N. A. SHe'l'menok // *Fizicheskaya mezomekhanika*. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 159–168.
3. Gomzhin, V. V. Elektroiskrovoe legirovanie stali 12H18N8T kombinirovannym elektrodom V4S+CU / V. V. Gomzhin, V. L. Orlov, ZH. V. Eremeeva // *Covremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. – 2023. – № 1 (46). – С. 23–27.
4. Fiziko-mekhanicheskie i tribologicheskie svoystva uglerodsoderzhashchih poverhnostnyh nanokompozitov, poluchennyh elektroiskrovym legirovaniem / D. M. Krojtoru, S. A. Silkin, N. N. Kazak [i dr.] // *Elektronnaya obrabotka materialov*. – 2020. – № 56 (6). – С. 12–23.

Материал поступил 11.07.2025, одобрен 22.07.2025, принят к публикации 22.07.2025

УДК 69.002.5

МЕТОДЫ АРМИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИХ ВОЗВЕДЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ 3D-ПРИНТЕРА

А. Н. Парфиевич¹, Н. Н. Черкасов²

¹ К. т. н., доцент, проректор по учебной работе, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: parfievichand@gmail.com

² Инженер-конструктор, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Солигорск, Беларусь; преподаватель кафедры технологии и оборудование разработки месторождений полезных ископаемых, филиал Белорусский национальный технический университет, Солигорск, Беларусь, e-mail: tcherkasow1996@gmail.com

Реферат

Технология 3D-печати строительными материалами, особенно бетоном, активно внедряется в строительство благодаря высокой скорости возведения, снижению трудозатрат и возможности реализации сложных архитектурных форм [5, 6]. Однако ключевой проблемой остаётся недостаточная прочность и долговечность печатных конструкций, вызванная их слоистой структурой и слабой устойчивостью к растягивающим и изгибающим нагрузкам [7, 8]. Армирование в этом контексте становится необходимым для повышения структурной надёжности.

В работе проведён анализ существующих методов армирования 3D-печатных конструкций: внутреннего (встраивание арматуры в тело бетона), внешнего (последующее нанесение армирующих элементов) и интегрированного (армирование в процессе печати). Особое внимание уделено инновационной технологии – использованию стержневого армировщика, интегрированного в 3D-принтер. Такое решение позволяет автоматически укладывать арматурные стержни непосредственно в свежешелый бетонный слой, обеспечивая их точное позиционирование и надёжное сцепление с материалом.

Преимущества данной технологии включают: повышение точности армирования, увеличение прочности конструкций, сокращение времени и трудозатрат, а также улучшение энергоэффективности процесса. Кроме того, перспективным направлением является применение композитной арматуры, обладающей высокой коррозионной стойкостью и малым весом, что расширяет возможности эксплуатации 3D-печатных зданий в агрессивных средах.

Внедрение интегрированных стержневых армировщиков способствует трансформации строительной отрасли, приближая её к полной цифровизации и массовому использованию аддитивных технологий. Это открывает путь к созданию более прочных, долговечных и экономически эффективных конструкций, ускоряя переход к инновационному строительству будущего.

Ключевые слова: 3D-печать бетона, армирование, внутреннее армирование, внешнее армирование, интегрированное армирование, стержневой армировщик, строительный 3D-принтер, автоматизация строительства.

METHODS OF REINFORCEMENT OF BUILDING STRUCTURES DURING THEIR CONSTRUCTION USING A 3D PRINTER

A. N. Parfievich, N. N. Cherkasov

Abstract

Concrete 3D printing technology is actively being introduced into construction due to its high construction speed, reduced labor costs, and the ability to create complex architectural forms [5, 6]. However, a key challenge remains the insufficient strength and durability of printed structures, caused by their layered structure and low resistance to tensile and bending loads [7, 8]. In this context, reinforcement becomes essential to enhance structural reliability.

This study presents an analysis of existing reinforcement methods for 3D-printed structures: internal (embedding reinforcement within the concrete matrix), external (applying reinforcing elements after printing), and integrated (reinforcement during the printing process). Special attention is given to an innovative technology – the use of a rod-feeding reinforcement unit integrated directly into the 3D printer. This solution enables automatic placement of reinforcing bars directly into the freshly deposited concrete layer, ensuring precise positioning and strong bond with the material.

The advantages of this technology include improved reinforcement accuracy, increased structural strength, reduced time and labor costs, and enhanced energy efficiency. Furthermore, the use of composite reinforcement materials is a promising direction, offering high corrosion resistance and low weight, thereby expanding the applicability of 3D-printed buildings in aggressive environments.

The integration of automated rod-reinforcement systems promotes the transformation of the construction industry, advancing full digitalization and widespread adoption of additive manufacturing. This paves the way for stronger, more durable, and economically efficient structures, accelerating the transition towards innovative construction of the future.

Keywords: concrete 3D printing, reinforcement, internal reinforcement, external reinforcement, integrated reinforcement, rod-reinforcement unit, construction 3D printer, construction automation.

Введение

Аддитивные технологии, в частности 3D-печать бетоном, представляют собой одно из наиболее перспективных направлений в современном строительстве. Их применение позволяет реализовывать сложные геометрические формы, сокращать сроки строительства и минимизировать отходы материалов [5, 6]. Однако, несмотря на очевидные преимущества, напечатанные конструкции характеризуются анизотропными механическими свойствами, вызванными слоистой структурой, что снижает их устойчивость к растяжению, изгибу и динамическим нагрузкам по сравнению с традиционным монолитным бетоном [7, 8].

Для повышения несущей способности и долговечности 3D-печатных конструкций необходимы эффективные методы армирова-

ния. Традиционные подходы, такие как установка арматурного каркаса, плохо совместимы с аддитивными процессами из-за ограниченной подвижности печатающей головки и необходимости непрерывности процесса [10, 11]. В связи с этим актуальными становятся разработка и внедрение инновационных решений, позволяющих интегрировать армирование непосредственно в процесс 3D-печати.

1 Методы армирования 3D-печатных строительных конструкций: сравнительный анализ и систематизация

Аддитивные технологии в строительстве, в особенности 3D-печать бетоном, демонстрируют значительный потенциал в контексте цифровизации отрасли. Однако их широкое внедрение сдерживается проблемой обеспечения достаточной прочности и долговеч-

ности напечатанных конструкций. Основная причина – анизотропная структура материала, формируемая послойным нанесением бетонной смеси, что приводит к ослабленным межслойным границам и пониженной устойчивости к растягивающим и изгибающим нагрузкам по сравнению с монолитным бетоном [7, 8].

В этих условиях армирование выступает не просто усилительным элементом, а структурно необходимым компонентом, определяющим пригодность 3D-печатных конструкций к эксплуатации в реальных условиях. В зависимости от технологической интеграции и временного контекста внедрения армирующих элементов, все существующие методы можно систематизировать на три группы: внутреннее, внешнее и интегрированное армирование. Каждый из них обладает своими преимуществами, ограничениями и сферами рационального применения.

1.1 Внутреннее армирование: потенциал и технологические барьеры

Внутреннее армирование предполагает размещение армирующих элементов в процессе печати, непосредственно между или внутри слоёв свежеуложенного бетона. Наиболее распространённые реализации включают:

- синхронизированную работу роботизированной руки и 3D-принтера для укладки арматуры в заданные позиции [10];
- подачу армирующих волокон или прутков через модифицированную печатающую головку [9].

Этот подход обеспечивает высокую степень интеграции арматуры в несущую структуру, что позволяет достичь значительного повышения прочности на изгиб и растяжение. Кроме того, он открывает возможности для создания оптимизированных, биомиметических конструкций с переменной жёсткостью, недоступных при традиционных методах [6, 11].

Однако анализ показывает, что внутреннее армирование сталкивается с рядом фундаментальных ограничений:

- технологическая несовместимость с высокоскоростной экструзией: роботизированная укладка арматуры требует остановки или замедления процесса печати, что снижает общую производительность;
- сложность синхронизации нескольких систем (принтер + армирующее устройство), что увеличивает риск ошибок и дефектов;
- ограниченная гибкость в выборе типов арматуры: большинство решений ориентированы на проволоку или волокна, а не на стержневую арматуру, обеспечивающую жёсткую пространственную связь.

Таким образом, несмотря на высокий потенциал, внутреннее армирование в его текущей форме не обеспечивает достаточной степени автоматизации и масштабируемости для массового строительства.

1.2 Внешнее армирование: надёжность за счёт компромисса

Внешнее армирование реализуется после завершения процесса печати и включает нанесение или крепление армирующих материалов на поверхность конструкции. К ним относятся:

- композитные оболочки (углеродное, стекловолокно) с полимерным связующим [13];
- установка стальных сеток или каркасов с последующим омоноличиванием [16].

Преимущества данного метода заключаются:

- в высокой адаптивности к различным условиям нагружения и климатическим воздействиям;
- возможности усиления уже построенных объектов;
- использовании проверенных и нормированных материалов.

Однако внешнее армирование имеет существенные недостатки:

- увеличение сроков строительства за счёт необходимости дополнительных технологических операций;
- зависимость от квалификации рабочих, что снижает воспроизводимость результатов;
- повышенные трудозатраты и стоимость по сравнению с интегрированными решениями.

Следовательно, внешнее армирование целесообразно применять в случаях, когда внутреннее армирование невозможно или недостаточно, но оно противоречит основной философии 3D-печати – минимизации ручного труда и ускорению строительства.

1.3 Интегрированное армирование: путь к цифровизации

Интегрированное армирование представляет собой наиболее перспективное направление, поскольку оно сочетает преимущества автоматизации, точности и структурной эффективности.

Ключевые подходы:

1. Фибробетон – использование бетонной смеси, модифицированной дисперсными волокнами (стальными, полимерными, углеродными) [9, 11]. Обеспечивает равномерное распределение армирования, но не решает проблему межслойной прочности и не формирует жёсткую пространственную сеть.

2. Автоматизированная укладка стержневой арматуры – внедрение прутков в свежий слой бетона с помощью специализированного устройства, интегрированного в 3D-принтер [10, 12].

Анализ показывает, что именно стержневое армирование является наиболее эффективным решением для обеспечения структурной целостности 3D-печатных конструкций. Оно позволяет:

- формировать жёсткую пространственную сеть, аналогичную традиционному арматурному каркасу;
- обеспечивать высокую межслойную связь за счёт механического анкерования;
- реализовывать переменную плотность армирования в зависимости от расчётных напряжений.

2 Автоматизированное стержневое армирование: анализ преимуществ и перспектив

Внедрение стержневого армировщика как неотъемлемого элемента строительного 3D-принтера знаменует переход от полуавтоматических решений к полностью цифровому и автоматизированному строительству. Рассмотрим его преимущества в сравнительном контексте.

2.1 Повышение структурной надёжности

Основная проблема 3D-печатных конструкций – слабые межслойные связи. Стержневое армирование решает эту задачу за счёт сквозного армирования, когда прутки проходят через несколько слоёв, обеспечивая механическое сцепление и предотвращая расслаивание. Это особенно важно для вертикальных конструкций, подверженных изгибающим моментам и сейсмическим нагрузкам [12].

2.2 Высокая степень автоматизации и воспроизводимость

В отличие от ручного или полуавтоматического армирования, стержневой армировщик:

- полностью исключает человеческий фактор;
- обеспечивает точность укладки $\pm 1\text{--}2$ мм, что критично для соблюдения проектных решений;
- позволяет интегрировать схемы армирования непосредственно в CAD/BIM-модель, обеспечивая сквозное цифровое сопровождение проекта [10].

2.3 Оптимизация расхода материалов и снижение массы конструкции

Одно из ключевых преимуществ – возможность адаптивного армирования. В зонах с высокими напряжениями (например, в углах, опорах, местах примыкания перекрытий) плотность армирования увеличивается, а в менее нагруженных участках – снижается. Это позволяет:

- сократить расход арматуры на 15–30 % по сравнению с равномерным армированием;
- уменьшить общий вес конструкции, что особенно важно при строительстве на слабых грунтах или в сейсмоопасных районах [14, 15].

2.4 Совместимость с композитными материалами

Современные стержневые армировщики способны работать с композитной арматурой на основе базальтового или углеродного волокна, которая обладает:

- высокой прочностью при растяжении;
- коррозионной стойкостью;
- низкой теплопроводностью (исключает образование «мостиков холода») [4].

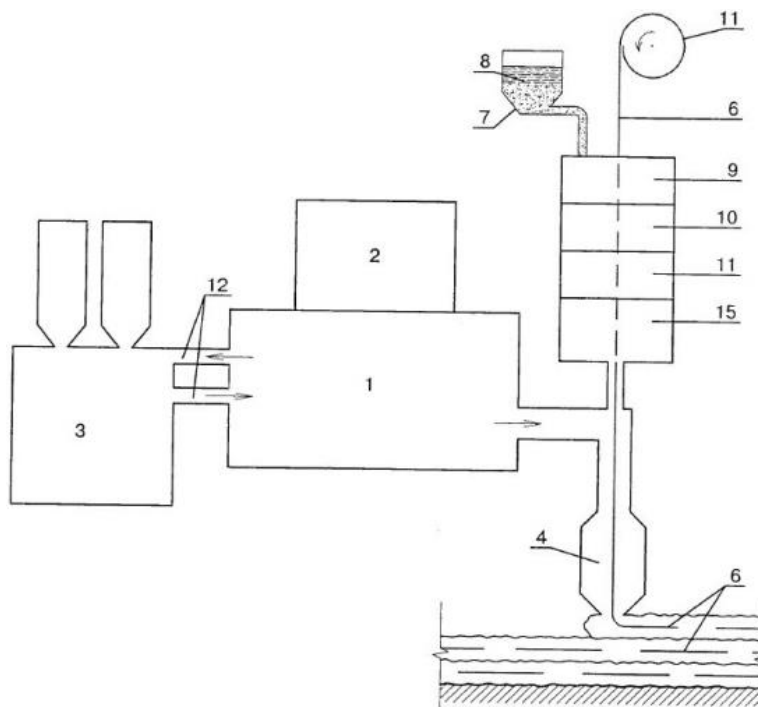
Это открывает путь к созданию долговечных, энергоэффективных и устойчивых к агрессивным средам конструкций, что особенно актуально для промышленного и инфраструктурного строительства [17–20].

3 Перспективы и вызовы внедрения

На современном этапе разработаны различные технические решения, направленные на интеграцию армирования в процесс 3D-печати.

3.1 Устройство с канатной арматурой [2]

Устройство включает узел подачи волоконных канатов, интегрированный в раздаточную головку принтера (рисунок 1).



1 – управляющая система; 2 – бетоносмесительный узел; 3 – бетононасосный узел; 4 – раздаточная головка; 5 – картридж; 6 – волоконные канаты; 7 – емкость; 8 – связующее; 9 – смесительная ванна; 10 – термофилье; 11 – подающее устройство; 12 – трубопровод; 13 – бетонная смесь; 15 – ножницы

Рисунок 1 – Схема устройства для возведения монолитного здания [2]

Недостатки:

- высокая стоимость и ограниченная доступность канатов;
- отсутствие жёсткой связи между параллельными стенками;
- риск самопроизвольного вытекания смеси из-за отсутствия запорного клапана.

3.2 Экструдер с подмешивающим устройством [3]

Экструдер оснащён дозатором, подмешивающей рамкой и возможностью подачи пластификаторов (рисунок 2).

Недостаток: отсутствие межслойной жёсткой связи, что снижает прочность конструкции.

3.3 Прутковый армировщик с независимыми бункерами [4] (рисунок 3)

Разработанное устройство включает четыре независимых бункера с механизмами подачи композитных прутков, укладываемых между слоями под углом друг к другу.

Преимущества:

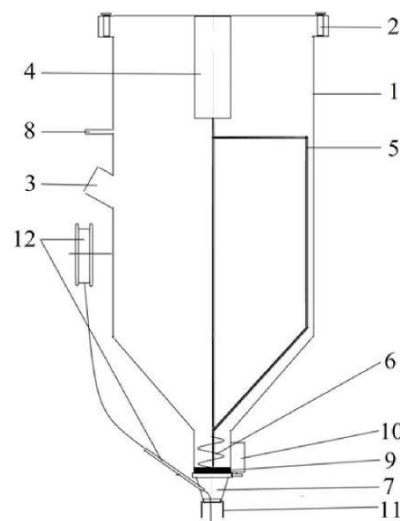
- автоматизация процесса армирования;
- обеспечение жёсткой связи между стенками;
- гибкость в выборе угла и плотности укладки арматуры.

Такое решение демонстрирует высокий уровень автоматизации и потенциал для применения в промышленном строительстве [4].

Несмотря на очевидные преимущества, широкое внедрение автоматизированного стержневого армирования сдерживается:

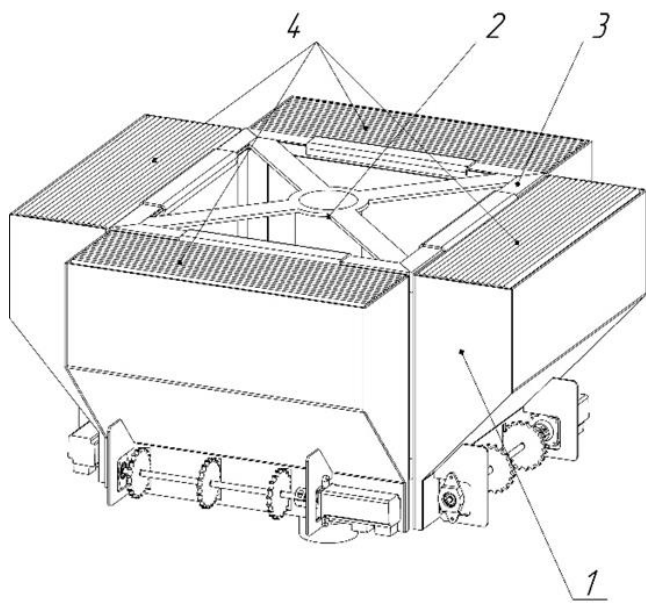
- отсутствием нормативной базы для расчёта и контроля 3D-печатных армированных конструкций;
- недостаточной изученностью долговечности композитной арматуры в бетонной среде;
- высокой стоимостью первоначальной интеграции оборудования.

Однако эти вызовы являются временными. С развитием технологий машинного обучения и цифровых двойников появляется возможность оптимизации процессов армирования и прогнозирования поведения конструкций на всех этапах жизненного цикла [1].



1 – ёмкость (корпус) экструдера; 2 – устройство крепления; 3 – отверстие для загрузки (подачи) в экструдер строительного материала (строительной смеси); 4 – привод дозатора и подмешивающей рамки; 5 – подмешивающая рамка; 6 – дозатор (шнек или героторная пара); 7 – сопло; 8 – штуцер (коммуникации) для подачи пластифицирующих и иных добавок к строительной смеси; 9 – запорный клапан; 10 – привод поворотной оси для поворота сопла и устройства формирования поверхности в виде заглаживающих либо фактурных лопаток по направлению движения печатающей головки; 11 – устройство формирования поверхности в виде заглаживающих либо фактурных лопаток; 12 – устройство для укладки арматуры, представляющее из себя привод

Рисунок 2 – Экструдера строительных смесей для 3D-принтера [3]



1 – прутковый армировщик; 2 – экструдер; 3 – несущая рама; 4 – механизм подачи прутьев

Рисунок 3 – Прутковый армировщик для строительного 3D-принтера [4]

Заключение

Проведённый анализ показал, что армирование является ключевым фактором, определяющим прочность и долговечность 3D-печатных строительных конструкций. Среди существующих методов – внутреннее, внешнее и интегрированное армирование – особое внимание следует уделить технологиям, обеспечивающим высокую степень автоматизации и точность.

Стержневой армировщик строительного 3D-принтера представляет собой перспективное инженерное решение, позволяющее интегрировать армирование в аддитивный процесс, минимизируя ручной труд и повышая надёжность конструкций. Его внедрение способствует не только улучшению технико-экономических показателей строительства, но и трансформации отрасли в сторону цифровых технологий.

Дальнейшее развитие данной технологии требует:

- разработки новых нормативных стандартов для 3D-печатных армированных конструкций;
- исследования долговечности композитной арматуры в бетонной среде;
- подготовки квалифицированных специалистов и интеграции AI-алгоритмов в проектирование.

Таким образом, стержневое армирование является важным шагом на пути к устойчивому, эффективному и инновационному строительству будущего.

Список цитированных источников

1. State of the Art Review of Reinforcement Strategies and Technologies for 3D Printing of Concrete // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 1. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/1/360>.
2. Патент РФ № 2683447. Способ возведения монолитного здания, сооружения методом 3d-печати и устройство для его осуществления, Е 04 С 5/07. Заявл. 05.12.2017, опубл. 28.03.2017.
3. Патент РФ № 2724163. Экструдер строительных смесей для 3D-принтера, В 29 С 64/209. Заявл. 28.08.2019, опубл. 22.06.2020.
4. Пат. 13479 U Респ. Беларусь : МПК (2017.01) В 29С 64/209 / Черкасов Н. Н., Нерода М. В.; дата публ.: 2024.05.20.
5. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing / F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, T. Salet // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2016. – Vol. 11, Iss. 3. – P. 209–225. – DOI: 10.1080/17452759.2016.1209867.
6. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete / T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim [et al.] // *Materials and Structures*. – 2012. – Vol. 45, Iss. 8. – P. 1221–1232. – DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z.

7. Perrot, A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques / A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre // *Materials and Structures*. – 2016. – Vol. 49, Iss. 4. – P. 1213–1220. – DOI: 10.1617/s11527-015-0571-0.
8. Ma, G. State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material – An emerging technique for construction / G. Ma, L. Wang, Y. Ju // *Science China Technological Sciences*. – 2018. – Vol. 61, Iss. 4. – P. 475–495. – DOI: 10.1007/s11431-016-9077-7.
9. Panda, B. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction / B. Panda, J. H. Lim, M. J. Tan // *Composites Part B: Engineering*. – 2019. – Vol. 165. – P. 563–571. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.02.040.
10. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research / R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, J. Dirrenberger // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 112. – P. 37–49. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
11. Wolfs, R. J. M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing / R. J. M. Wolfs, F. P. Bos, T. A. M. Salet // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 106. – P. 03–116. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.001.
12. Hambach, M. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste / M. Hambach, D. Volkmer // *Cement and Concrete Composites*. – 2017. – Vol. 79. – P. 62–70. – DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001.
13. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture / A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran, B. Khoshnevis // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 145. – P. 639–647. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015.
14. Developments in construction-scale additive manufacturing processes / S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le [et al.] // *Automation in Construction*. – 2012. – Vol. 21, Iss. 1. – P. 262–268. – DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010.
15. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry / Peng Wu, Jun Wang, Xiangyu Wang // *Automation in Construction*. – 2016. – Vol. 68. – P. 21–31. – DOI: 10.1016/j.autcon.2016.04.005.
16. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities / Nathalie Labonnote, Anders Rønquist, Bendik Manum, Petra Rührer // *Automation in Construction*. – 2016. – Vol. 72. – P. 347–366. – DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.026.
17. Developments in construction-scale additive manufacturing processes / S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le [et al.] // *Automation in Construction*. – 2012. – Vol. 21. – P. 262–268. – DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010.
18. Fiber reinforcement during 3D printing / S. Christ, M. Schnabel, E. Vorndran [et al.] // *Materials Letters*. – 2015. – Vol. 139. – P. 165–168. – DOI: 10.1016/j.matlet.2014.10.065.
19. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges / Tuan D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
20. Khoshnevis, B. Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies / B. Khoshnevis // *Automation in Construction*. – 2004. – Vol. 13, Iss. 1 – P. 5–19. – DOI: 10.1016/j.autcon.2003.08.012.

References

1. State of the Art Review of Reinforcement Strategies and Technologies for 3D Printing of Concrete // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 1. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/1/360>.
2. Patent RF № 2683447. Sposob vozvedeniya monolitnogo zdaniya, sooruzheniya metodom 3d-pechati i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya, E 04 S 5/07. Zayavl. 05.12.2017, opubl. 28.03.2017.
3. Patent RF № 2724163. Ekstruder stroitel'nyh smesey dlya 3D-принтера, В 29 С 64/209. Заявл. 28.08.2019, опубл. 22.06.2020.
4. Пат. 13479 U Респ. Беларусь : МПК (2017.01) В 29С 64/209 / Черкасов Н. Н., Нерода М. В.; дата публ.: 2024.05.20.
5. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing / F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, T. Salet // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2016. – Vol. 11, Iss. 3. – P. 209–225. – DOI: 10.1080/17452759.2016.1209867.

6. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete / T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim [et al.] // *Materials and Structures*. – 2012. – Vol. 45, Iss. 8. – P. 1221–1232. – DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z.
7. Perrot, A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques / A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre // *Materials and Structures*. – 2016. – Vol. 49, Iss. 4. – P. 1213–1220. – DOI: 10.1617/s11527-015-0571-0.
8. Ma, G. State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material – An emerging technique for construction / G. Ma, L. Wang, Y. Ju // *Science China Technological Sciences*. – 2018. – Vol. 61, Iss. 4. – P. 475–495. – DOI: 10.1007/s11431-016-9077-7.
9. Panda, B. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction / B. Panda, J. H. Lim, M. J. Tan // *Composites Part B: Engineering*. – 2019. – Vol. 165. – P. 563–571. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.02.040.
10. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research / R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, J. Dirrenberger // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 112. – P. 37–49. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
11. Wolfs, R. J. M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing / R. J. M. Wolfs, F. P. Bos, T. A. M. Salet // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 106. – P. 103–116. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.001.
12. Hambach, M. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste / M. Hambach, D. Volkmer // *Cement and Concrete Composites*. – 2017. – Vol. 79. – P. 62–70. – DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001.
13. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture / A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran, B. Khoshnevis // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 145. – P. 639–647. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015.
14. Developments in construction-scale additive manufacturing processes / S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le [et al.] // *Automation in Construction*. – 2012. – Vol. 21, Iss. 1. – P. 262–268. – DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010.
15. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry / Peng Wu, Jun Wang, Xiangyu Wang // *Automation in Construction*. – 2016. – Vol. 68. – P. 21–31. – DOI: 10.1016/j.autcon.2016.04.005.
16. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities / Nathalie Labonnote, Anders Rønnquist, Bendik Manum, Petra Rüther // *Automation in Construction*. – 2016. – Vol. 72. – P. 347–366. – DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.026.
17. Developments in construction-scale additive manufacturing processes / S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le [et al.] // *Automation in Construction*. – 2012. – Vol. 21. – P. 262–268. – DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010.
18. Fiber reinforcement during 3D printing / S. Christ, M. Schnabel, E. Vorndran [et al.] // *Materials Letters*. – 2015. – Vol. 139. – P. 165–168. – DOI: 10.1016/j.matlet.2014.10.065.
19. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges / Tuan D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
20. Khoshnevis, B. Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies / B. Khoshnevis // *Automation in Construction*. – 2004. – Vol. 13, Iss. 1 – P. 5–19. – DOI: 10.1016/j.autcon.2003.08.012.

Материал поступил 21.05.2025, одобрен 14.07.2025, принят к публикации 25.07.2025

ПРИМЕНИМОСТЬ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

О. Н. Прокопеня¹, А. В. Францевич², И. В. Угляница³

¹ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: olegprokopenya@mail.ru

² Магистр, аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и производств УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: alex.favg@gmail.com

³ Ассистент кафедры автоматизации технологических процессов и производств УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: Uglyanitsa.ira@mail.ru

Реферат

В настоящее время регулируемые приводы на основе трехфазных асинхронных электродвигателей широко применяются в различных отраслях. Предпринимаются попытки их использования в составе мехатронных модулей. В этом случае является актуальной проблема оптимизации параметров с целью обеспечения минимальных потерь энергии при заданных динамических характеристиках. Данная задача чаще всего решается на основе линейных моделей объектов. При определенных условиях привод на основе трехфазного асинхронного электродвигателя может описываться линейными уравнениями. При этом возникает необходимость оценки допустимости линеаризации математической модели и выявления условий, при которых это допустимо. Кроме того, необходимо оценить последствия невыполнения данных условий при работе привода, спроектированного с использованием линейной модели.

В данной статье представлена исходная математическая модель привода, полученная на основе реальной (нелинейной) механической характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя, а также модель, построенная на основе линеаризованной механической характеристики. Модели реализованы в приложении Simulink среды программирования MATLAB и позволяют выполнять анализ динамики привода с вычислением потерь энергии. Объединенная математическая модель позволяет строить в одном окне осциллографы характеристики, получаемые с помощью двух моделей, что удобно для их сравнения.

В результате анализа работы привода с помощью исходной и линейной моделей установлено, что обе модели дают одинаковый результат, когда скорость изменения задающего сигнала на входе не превышает определенной величины. В противном случае имеет место расхождение как в переходных характеристиках, так и в результатах вычисления потерь энергии. В частности, при ступенчатой подаче сигнала линейная модель занижает величину потерь в 1,5 раза и увеличивает скорость нарастания выходной переменной, делая переходной процесс более коротким. Указанные результаты имеют место как в приводе с регулируемой скоростью, так и в приводе с регулируемым углом поворота. Для конкретного привода количественные показатели могут быть определены с помощью предложенной модели. С помощью исходной модели подтверждена возможность возникновения автоколебаний в позиционном приводе при действии нагрузки, что не выявляет линейная модель.

Ключевые слова: регулируемый привод, трехфазный асинхронный электродвигатель, линейная математическая модель.

APPLICABILITY OF THREE-PHASE INDUCTION MOTOR LINEAR MODEL FOR MECHATRONIC MODULE DESIGN

O. N. Prokopenya, A. V. Francevich, I. V. Uhlianitsa

Abstract

Currently, adjustable drives based on three-phase asynchronous motors are widely used in various industries. Attempts are being made to use them as part of mechatronic modules. In this case, the problem of optimizing parameters in order to ensure minimum energy losses at given dynamic characteristics is urgent. This problem is most often solved on the basis of linear object models. Under certain conditions, a three-phase induction motor drive may be described by linear equations. In this case, it becomes necessary to assess the admissibility of linearization of the mathematical model and identify the conditions under which this is permissible. In addition, it is necessary to assess the consequences of not fulfilling these conditions when operating a drive designed using a linear model.

This article presents the initial mathematical model of the drive, obtained on the basis of the real (non-linear) mechanical characteristic of a three-phase asynchronous electric motor, as well as a model built on the basis of a linearized mechanical characteristic. The models are implemented in the Simulink application of the MATLAB programming environment and allow you to analyze the dynamics of the drive with the calculation of energy losses. The combined mathematical model allows you to build characteristics obtained using two models in one oscilloscope window, which is convenient for their comparison.

As a result of the analysis of the drive operation using the initial and linear models, it was found that both models give the same result when the speed of change of the driving signal at the input does not exceed a certain value. Otherwise, there is a discrepancy, both in the transient characteristics and in the results of calculating the energy loss. In particular, with a stepped signal, the linear model underestimates the loss by 1.5 times and increases the rate of increase of the output variable, making the transient shorter. These results occur in both the variable speed drive and the variable angle drive. For a specific drive, quantitative indicators can be determined using the proposed model. The initial model confirmed the possibility of self-oscillations in the position drive under load, which does not reveal the linear model.

Keywords: adjustable drive, three-phase induction motor, linear mathematical model.

Введение

В настоящее время асинхронные электродвигатели весьма широко применяются в регулируемых электроприводах с частотным регулированием скорости [1], и существуют предпосылки для их использования в составе мехатронных модулей. Последние фактически являются регулируемыми приводами, к которым предъявляются весьма высокие требования по качеству регулирования, динамическим характеристикам и энергоэффективности [2–12].

Ранее авторами была решена задача оптимизации привода постоянного тока [13–15], а также управляющей части мехатронного модуля на основе трехфазного асинхронного электродвигателя [16]. Во всех случаях оптимизация осуществлялась с использованием линейной модели объекта и квадратичного критерия, известная как задача аналитического конструирования регулятора [17]. Линейная модель привода на основе трехфазного асинхронного электродвигателя получена, исходя из предположения, что работа двигателя

осуществляется на рабочем участке механической характеристики (скольжение не превышает критического), который близок к линейному. Это допустимо, если в процессе работы момент двигателя не превышает примерно двух номинальных значений (для большинства двигателей) и рабочая точка не выходит за пределы указанного участка. Данное условие может быть выполнено, если сигнал, задающий частоту вращения, изменяется с ограниченной скоростью, так что по мере перемещения линейного участка механической характеристики из нижнего положения в верхнее двигатель успевает разогнаться и скольжение не превышает критического. Выполнение данного условия обязательно должно контролироваться при моделировании работы привода.

Пуск двигателя под нагрузкой требует повышенного момента, что увеличивает вероятность невыполнения указанного условия. Очевидно, что повышение момента потребует снижения скорости изменения задающего сигнала. Указанные особенности работы привода требуют дополнительного исследования с помощью моделирования. В целом погрешность от линеаризации модели также требует оценки и анализа зависимости от различных факторов.

Отдельными авторами освещалась проблема физической реализуемости моделей приводов на основе трехфазных асинхронных электродвигателей [18], но в целом проблема остается нерешенной.

Постановка задачи

Математическая модель привода, основанная на линеаризованной механической характеристике трехфазного асинхронного электродвигателя, приведена в [16]. Для оценки влияния линеаризации на точность модели необходимо построить аналогичную модель, основанную на реальной (нелинейной) механической характеристике двигателя. Дополнительно при разработке модели следует учесть такие факторы, как возможность определения потерь энергии, изменения момента и скорости в процессе разгона. Сравнение результатов работы двух моделей позволит определить условия, при которых линейная модель обеспечивает приемлемую точность и может использоваться при проектировании приводов.

Построение уточненной математической модели

Исходные уравнения, описывающие динамику привода, такие же, как и для линейной модели

$$\ddot{\alpha} = k_p \omega; \quad (1)$$

$$J_{\text{пр}} \cdot \dot{\omega} = M - M_c, \quad (2)$$

где α – угол поворота выходного звена;

ω – угловая скорость ротора двигателя;

k_p – коэффициент передачи редуктора;

$J_{\text{пр}}$ – приведенный к валу двигателя момент инерции привода;

M – момент, развиваемый двигателем;

M_c – момент сопротивления (нагрузки), приведенный к валу двигателя.

Предполагается, что инвертор, управляющий двигателем, не обладает инерционностью, т. е. является пропорциональным звеном.

Момент асинхронного электродвигателя [19–20]

$$M = \frac{m_1 U_1^2 R_2'}{s \omega_1 [(R + c' R_2' / s)^2 + (X + c'' R_2' / s)^2]}, \quad (3)$$

где m_1 – число фаз обмотки статора;

U_1 – напряжение на обмотке статора;

R_2' – приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора;

Скольжение ротора

$$s = (\omega_1 - \omega) / \omega_1, \quad (4)$$

где ω_1 – синхронная скорость вращения (скорость вращения магнитного поля).

Значения входящих в (3) сопротивлений

$$R = R_1 - c'' X_2'; \quad X = X_1 + c' X_2',$$

где R_1 и X_1 – активное и индуктивное сопротивления обмотки статора;

X_2' – приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление обмотки ротора;

c' и c'' – постоянные коэффициенты, зависящие от сопротивления обмотки статора.

Для практических расчетов с достаточной точностью можно принимать $c' = 1$ и $c'' = 0$ [19].

Тогда (3) приводится к виду

$$M = \frac{m_1 R_2' (I_2')^2}{s \omega_1}, \quad (5)$$

$$(I_2')^2 = \frac{U_1^2}{(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2}. \quad (6)$$

Такая форма представления момента удобна для построения модели в приложении Simulink, поскольку квадрат тока ротора используется для вычисления потерь. Зависимость момента от скольжения, построенная по (5), (6), хорошо известна как механическая характеристика асинхронного электродвигателя [19, 20]. Она является существенно нелинейной. Часть характеристики, соответствующая $s \ll 1$, близка к линейной. Принимая $s = 0$ в (5), (6) получаем

$$M = \frac{m_1 U_1^2 s}{\omega_1 R_2'}. \quad (7)$$

В линейной модели [16] момент двигателя вычисляется по (4), (7). Внося изменения в данную модель так, чтобы вычисление момента двигателя вычислялось по (4), (5), (6), получаем уточненную модель привода, учитывающую нелинейность механической характеристики.

Результаты моделирования и их обсуждение

Сначала рассмотрим привод на основе трехфазного асинхронного электродвигателя с угловой скоростью вала двигателя в качестве выходной переменной. В этом случае работа привода описывается уравнениями (2), (5), (6). Математическая модель такого привода, реализованная в приложении Simulink среды программирования MATLAB, приведена на рисунке 1.

Она объединена с линейной моделью (в нижней части рисунка). Угловая скорость, вычисляемая с помощью двух моделей, выводится на осциллограф Scope8. Это дает возможность сравнивать получаемые характеристики.

Кроме того, для обеих моделей предусмотрено отображение момента двигателя, тока обмотки ротора и потерь энергии в процессе пуска.

Расчет выполнялся для двигателя 4A71A2Y3, паспортные данные и параметры схемы замещения для которого указаны в [21].

На рисунке 2 показана реакция привода на линейно возрастающий входной сигнал, при этом время нарастания сигнала до максимального значения составляет 0,01 с. Следует отметить, что при ступенчатой подаче сигнала характеристики практически такие же.

Из рисунка 2 следует, что при столь высокой скорости изменения задающего сигнала результаты по двум моделям существенно отличаются (левая кривая соответствует линейной модели). Линейная модель обеспечивает более быстрый рост выходной переменной, что требует момента, большего чем максимальный момент данного двигателя, т. е. рабочая точка по линейной характеристике выходит за пределы участка, совпадающего с реальной характеристикой. Искусственно уменьшаются значения таких показателей качества, как время нарастания и время регулирования. Следовательно, использование линейной модели в данном случае недопустимо, поскольку она дает неверный результат (допущение, принятое при ее разработке не выполняется).

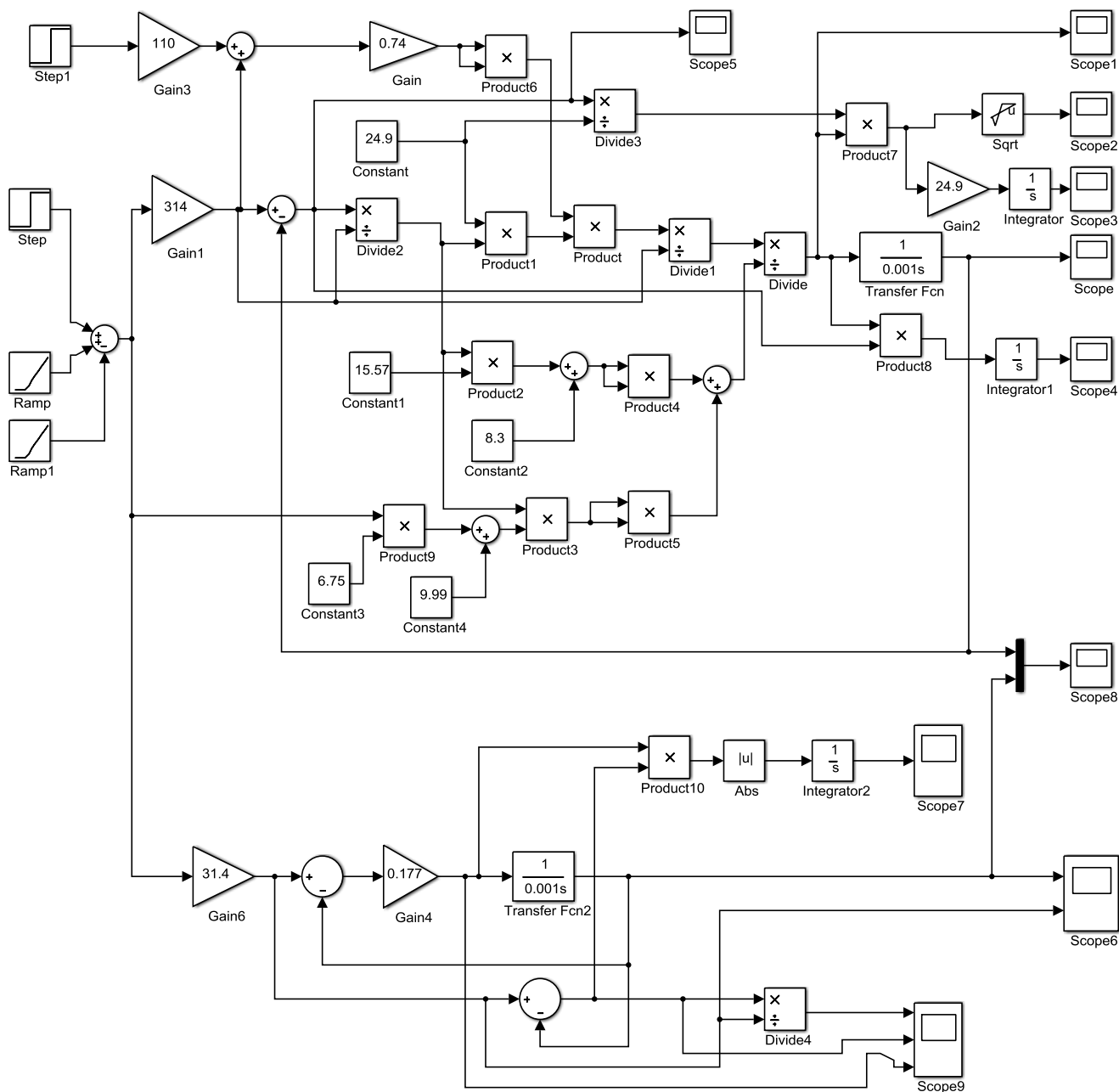


Рисунок 1 – Модель привода с регулируемой скоростью в приложении Simulink

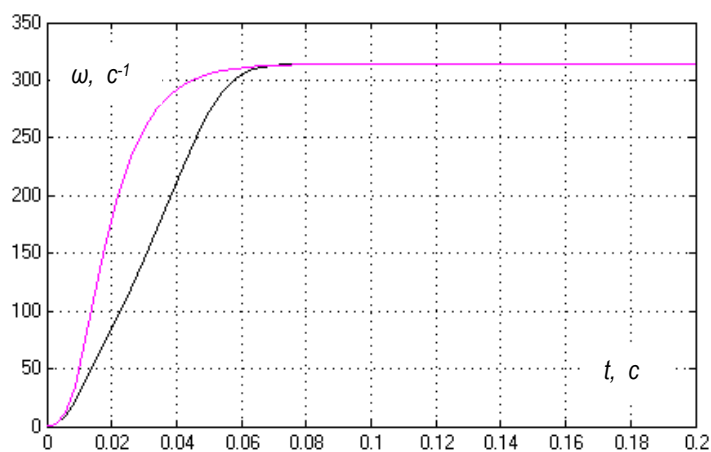


Рисунок 2 – Осциллограммы изменения угловой скорости при времени нарастания задающего сигнала 0,01 с

На рисунке 3 приведены аналогичные кривые для случая, когда время нарастания задающего сигнала увеличено до 0,1 с. В этом случае значительное расхождение между кривыми имеет место только на начальном и конечном участках изменения скорости. Это обусловлено соответствующим изменением соотношения моментов, вычисляемых по двум моделям, в процессе разгона (сначала линейная модель момент завышает, затем занижает). При этом время регулирования линейной моделью завышается на 20 %.

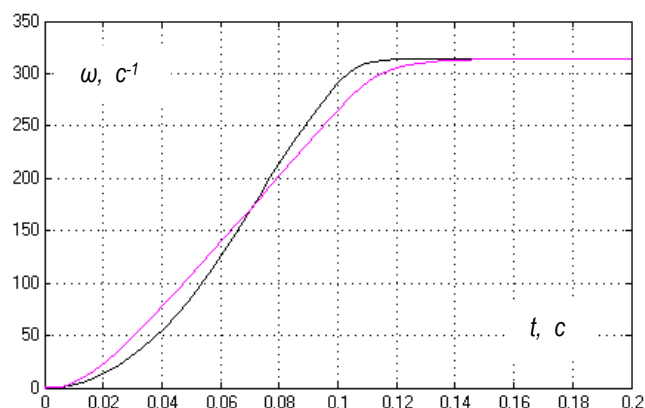


Рисунок 3 – Осциллограммы изменения угловой скорости при времени нарастания задающего сигнала 0,1 с

При увеличении времени нарастания задающего сигнала до 0,2 с расхождение между кривыми становится незначительным, как следует из рисунка 4. В этом случае выходная переменная практически достигает заданного значения за указанное время, т. е. фактически она повторяет задающий сигнал. При дальнейшем увеличении времени нарастания задающего сигнала кривые сливаются, т. е. модели дают одинаковый результат.

Если говорить о величине потерь в двигателе в процессе пуска, то в этом случае обе модели также дают практически одинаковый результат. В то же время при прямом пуске двигателя (ступенчатом приложении задающего сигнала) линейная модель занижает величину потерь примерно на 60 %. Таким образом, погрешность линейной модели возрастает по мере уменьшения времени нарастания задающего сигнала, а при ступенчатом приложении сигнала она максимальна.

Следовательно, при времени нарастания задающего сигнала 0,2 с и более, для данного двигателя возможно использование линейной модели.

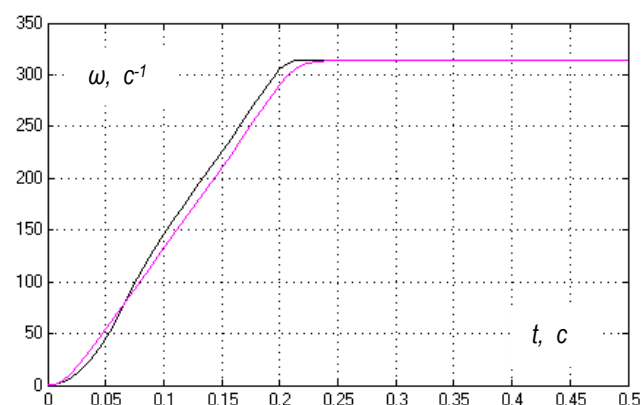


Рисунок 4 – Осциллограммы изменения угловой скорости при времени нарастания задающего сигнала 0,2 с

Отдельного исследования требует анализ применимости линейной модели позиционного привода на основе трехфазного асинхронного электродвигателя с обратными связями по всем

переменным состояния [16], в котором выходной переменной является угловое перемещение выходного вала. В нашем случае обратная связь осуществляется по скорости двигателя и углу поворота выходного вала. В таком приводе сигнал задания скорости двигателя формируется системой управления с учетом сигналов обратной связи, поэтому оценить его величину и скорость изменения заранее проблематично.

Для решения данной задачи описанные ранее изменения были внесены в линейную математическую модель, разработанную при построении мехатронного модуля с оптимальными параметрами [16]. В уточненной модели вычисление момента осуществляется по (4), (5), (6). Полученная при этом математическая модель реализована в приложении Simulink, как показано на рисунке 6. Она также объединена с соответствующей линейной моделью для возможности сравнения результатов.

На рисунке 5 приведены кривые изменения угла поворота выходного вала, получаемые с помощью двух моделей (левая кривая соответствует линейной модели), когда задающий сигнал на угол поворота 3,14 рад линейно возрастает за 0,01 с (близок к ступенчатому). Расхождение между кривыми весьма существенно. Очевидно, что линейная модель вычисляет момент двигателя с завышением, чем обусловлен более интенсивный рост угла поворота, особенно на начальном этапе. При этом занижено время нарастания и время регулирования. Следует отметить, что вычисление потерь в двигателе линейной моделью при этом занижено в 1,5 раза.

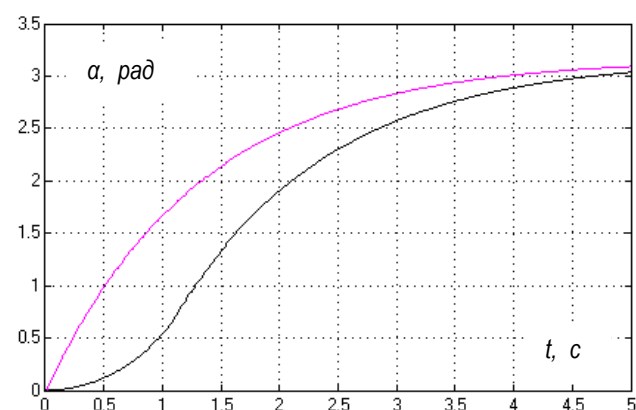


Рисунок 5 – Осциллограммы изменения угла поворота выходного вала при нарастании задающего сигнала за 0,01 с

При увеличении времени нарастания задающего сигнала расхождение между кривыми уменьшается и при значении 0,4 с кривые практически совпадают, как показано на рисунке 7. При этом вычисленные значения потерь по двум моделям также практически одинаковы.

Таким образом, использовать линейную модель можно только в случае, если линейное нарастание задающего сигнала осуществляется не менее чем за 0,4 с для рассматриваемого двигателя.

Очевидно, что на полученные результаты могут оказывать влияние такие факторы, как изменение параметров двигателя, передаточное отношение редуктора. Поэтому работу конкретного привода следует тщательно исследовать с помощью предложенных математических моделей, основанных на реальной механической характеристике используемого двигателя.

Логично предположить, что пуск двигателя под нагрузкой потребует от двигателя большего момента. Реально момент двигателя будет изменяться в соответствии с механической характеристикой, которая ограничивает его значение величиной максимального (критического) момента. В линейной модели такого ограничения нет, поэтому возрастает вероятность завышения момента, что ведет к погрешности в работе модели. Для исследования влияния нагрузки модель позиционного привода дополнена, как показано на рисунке 8.

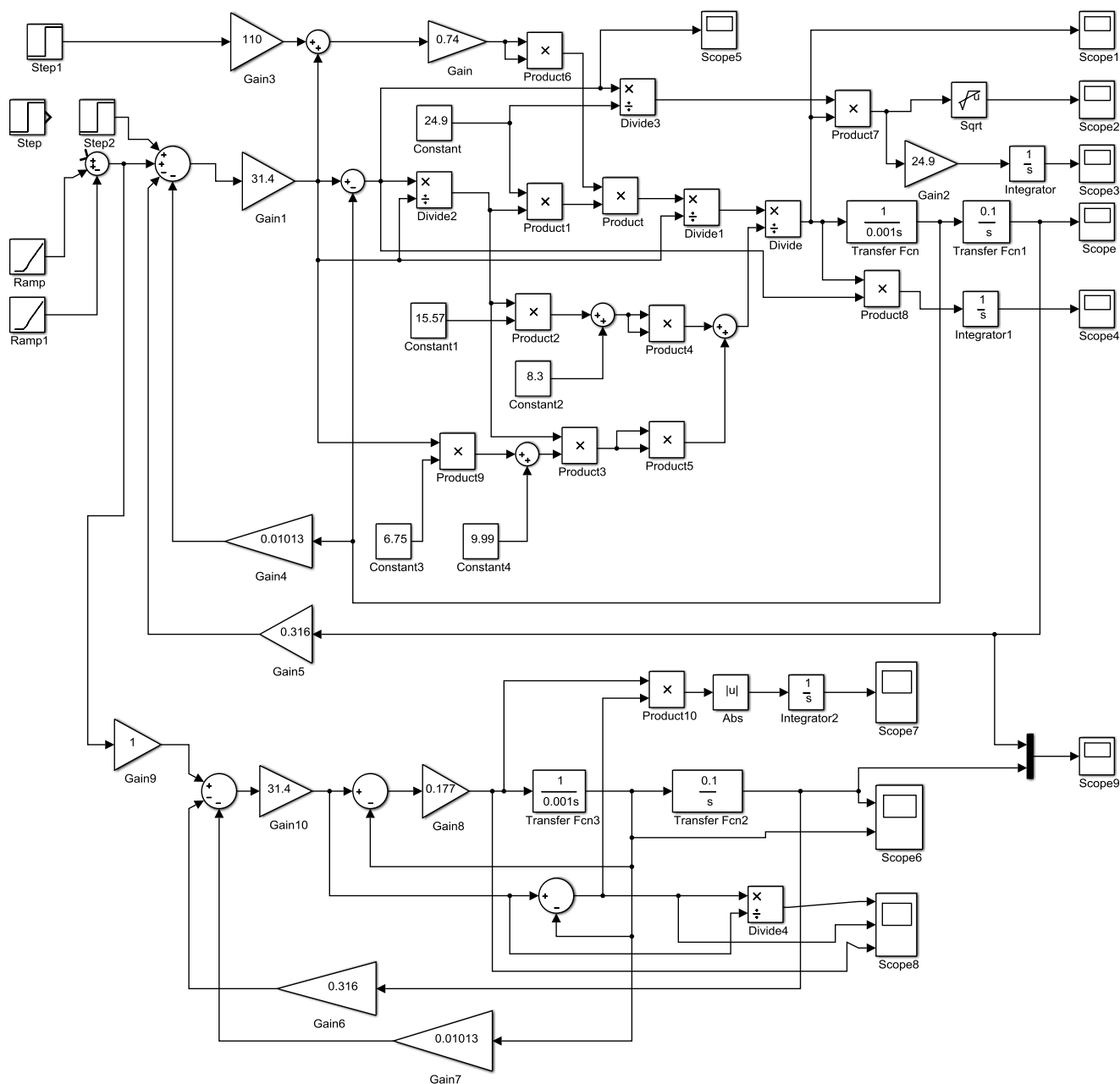


Рисунок 6 – Модель позиционного привода в приложении Simulink

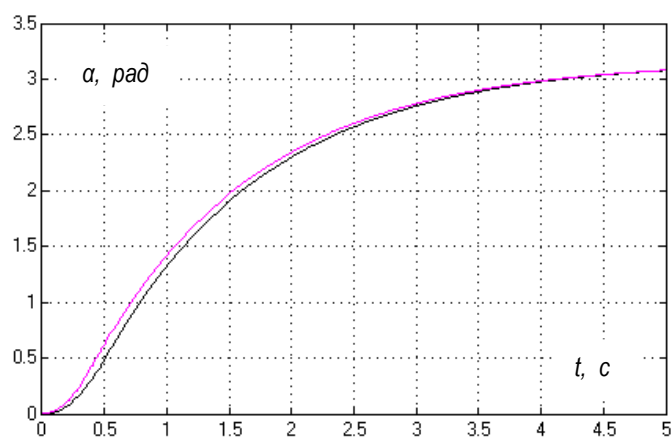


Рисунок 7 – Осциллограммы изменения угла поворота выходного вала при нарастании задающего сигнала за 0,4 с

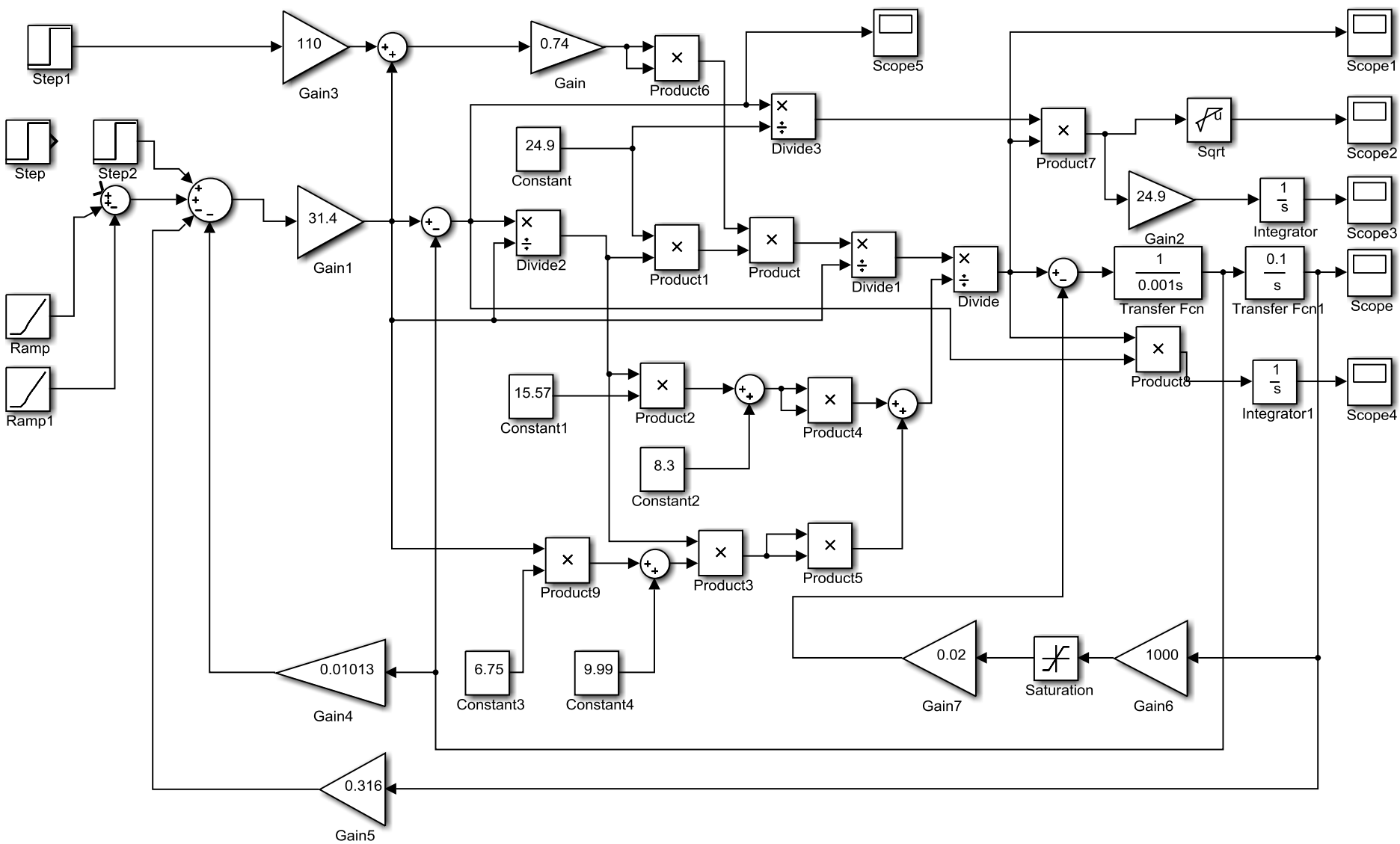


Рисунок 8 – Модель позиционного привода в приложении Simulink, учитывающая действие момента нагрузки

На рисунке 9 приведена переходная характеристика привода, полученная при действии минимального момента сопротивления (0,01 от номинального). Как следует из приведенного рисунка, даже наличие столь небольшого момента сопротивления существенно повлияло на вид переходного процесса. Кроме того, установлено, что дальнейшее увеличение момента сопротивления приводит к появлению автоколебаний (предельных циклов). Для нелинейной системы это является вполне ожидаемым. Это фактически делает невозможным использование привода.

В то же время линейная модель демонстрирует вполне приемлемую переходную характеристику при изменении момента сопротивления в достаточно широком диапазоне. Следовательно, она некорректно описывает поведение системы при действии нагрузки.

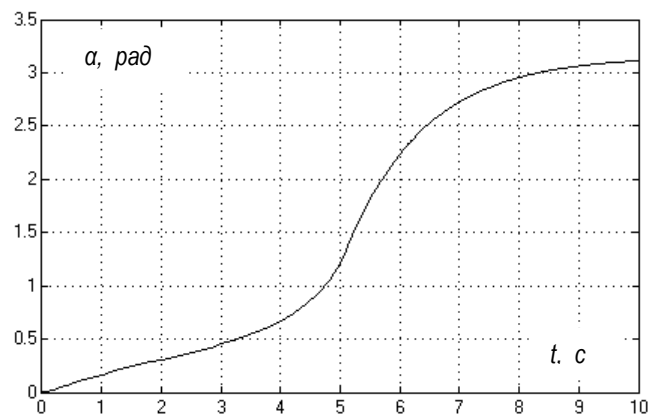


Рисунок 9 – Переходная характеристика привода при действии момента нагрузки (0,01 от номинального).

Таким образом, предложенную линейную модель нельзя использовать для анализа позиционного привода с трехфазным асинхронным электродвигателем при действии нагрузки. В целом данный вопрос требует дополнительного исследования с помощью уточненной модели с учетом не только величины, но и характера приложения нагрузки, а также других факторов.

Заключение

В результате сравнения результатов, получаемых с помощью линейной и уточненной (нелинейной) моделей привода с трехфазным асинхронным электродвигателем, установлено, что линейная модель дает достоверный результат, если скорость изменения задающего сигнала не превышает некоторого значения. Так, для исследованных приводов с двигателем 4A71A2Y3 время линейного нарастания задающего сигнала должно быть не менее 0,2 с для привода с регулируемой скоростью и не менее 0,4 с для позиционного привода с обратными связями по скорости и углу поворота. В противном случае линейная модель дает погрешность, которая возрастает по мере уменьшения времени нарастания задающего сигнала. При ступенчатой подаче сигнала на вход погрешность максимальна. Вычисление потерь энергии линейной моделью при этом осуществляется с занижением на 50–60 %. Значительно завышается скорость изменения выходной переменной и как следствие занижается длительность переходного процесса. Таким образом, использование линейной модели при проектировании приводов, например для решения задачи оптимизации, требует последующего анализа работы привода с помощью уточненной нелинейной модели.

Установлено также, что линейная модель не позволяет выявить возможность возникновения автоколебаний в приводе, в то время как уточненная модель демонстрирует их возникновение при работе привода под нагрузкой. Это также говорит о необходимости проверки результатов, получаемых с помощью линейной модели.

Список цитированных источников

1. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2006. – 363 с.
2. Жавнер, В. Л. Мехатронные системы: учеб. пособие / В. Л. Жавнер, А. Б. Смирнов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 131 с.
3. Подураев, Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов / Ю. В. Подураев. – 2-е изд., стер. – М. : Машиностроение, 2007. – 256 с.
4. Егоров, О. Д. Конструирование мехатронных модулей: учебник / О. Д. Егоров, Ю. В. Подураев. – М. : МГТУ «СТАНКИН», 2004. – 360 с.
5. Проектирование мехатронного модуля с использованием асинхронного двигателя и шарико-винтовой передачи // Научные Статьи.Ру. – URL: <https://nauchniestati.ru> (дата обращения: 24.02.2024).
6. Герман-Галкин, С. Г. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech / С. Г. Герман-Галкин, Б. А. Карташов, С. Н. Литвинов. – М. : ДМК Пресс, 2021. – 494 с.
7. Поляков, А. Н. Проектирование мехатронных модулей станков с ЧПУ : учебное пособие / А. Н. Поляков. – Оренбург : ОГУ, 2019. – 128 с.
8. Родичев, А. Ю. Проектирование мехатронных и робототехнических систем : учебное пособие / А. Ю. Родичев, Р. Н. Поляков, А. В. Горин. – Орел : ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023. – 271 с.
9. Волкова, М. А. Приводы мехатронных и робототехнических систем : методические рекомендации / М. А. Волкова. – М. : РТУ МИРЭА, 2024. – 19 с.
10. Романов, А. М. Программное обеспечение мехатронных и робототехнических систем : учебно-методическое пособие / А. М. Романов, М. А. Волкова. – М. : РТУ МИРЭА, 2019. – 68 с.
11. Волков, А. Н. Выбор энергосберегающих законов движения мехатронных приводов технологических машин / А. Н. Волков, О. Н. Мацко, А. В. Мосалова // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – № 4. – С. 141–149.
12. Синтез оптимальных по критерию энергосбережения алгоритмов работы приводов роботов и технологических машин: учеб. пособие / А. Н. Волков, А. А. Корнилова, О. Н. Мацко, А. В. Козлов. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 80 с.
13. Оптимизация привода постоянного тока с регулируемой скоростью / О. Н. Прокопеня, Л. И. Вабищевич, А. В. Францевич [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 2. – С. 93–96.
14. Супрунчук, П. Д. Оптимальный электропривод постоянного тока / П. Д. Супрунчук, О. Н. Прокопеня, О. Г. Прожижко // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сборник статей / Брестский государственный технический университет. – Брест : Издательство БрГТУ, 2021. – С. 20–25.
15. Оптимизация позиционного привода постоянного тока / О. Н. Прокопеня, Л. И. Вабищевич, О. Г. Прожижко, А. С. Лапука // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 2. – С. 79–83.
16. Оптимизация управляющей подсистемы мехатронного модуля на основе трехфазного асинхронного электродвигателя / О. Н. Прокопеня, А. В. Францевич, Л. И. Вабищевич, А. И. Пикула // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2025. – № 1. – С. 103–109.
17. Солодовников, В. В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В. В. Солодовников, В. Н. Плотников, А. В. Яковлев. – М. : Машиностроение, 1985. – 536 с.
18. Условие физической реализуемости математических моделей асинхронных двигателей / Ю. З. Ковалев, А. Ю. Ковалев, А. С. Солодянкин, Е. Ю. Ряхина // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2009. – № 4. – С. 10–18.

19. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины: учебник для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 928 с.
 20. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 350 с.
 21. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.
- References**
1. Firago, B. I. Reguliruyemye elektroprivody peremennogo toka / B. I. Firago, L. B. Pavlyachik. – Minsk : Tekhnoperspektiva, 2006. – 363 s.
 2. ZHavner, V. L. Mekhatronnye sistemy: ucheb. posobie / V. L. ZHavner, A. B. Smirnov. – SPb. : Izd-vo Politekh. un-ta, 2011. – 131 s.
 3. Poduraev, YU. V. Mekhatronika: osnovy, metody, primeneniye: ucheb. posobie dlya studentov vuzov / YU. V. Poduraev. – 2-e izd., ster. – M. : Mashinostroenie, 2007. – 256 s.
 4. Egorov, O. D. Konstruirovaniye mekhatronnykh modulej: uchebnyy / O. D. Egorov, YU. V. Poduraev. – M. : MG TU «STANKIN», 2004. – 360 s.
 5. Proektirovaniye mekhatronnogo modulya s ispol'zovaniyem asinhronnogo dvigatelya i shariko-vintovoy peredachi // Nauchnye Stat'i.Ru. – URL: <https://nauchniestati.ru> (data obrashcheniya: 24.02.2024).
 6. German-Galkin, S. G. Model'noye proektirovaniye elektromekhanicheskikh mekhatronnykh modulej dvizheniya v srede SimInTech / S. G. German-Galkin, B. A. Kartashov, S. N. Litvinov. – M. : DMK Press, 2021. – 494 s.
 7. Polyakov, A. N. Proektirovaniye mekhatronnykh modulej stankov s CHPU : uchebnoye posobie / A. N. Polyakov. – Orenburg : OGU, 2019. – 128 s.
 8. Rodichev, A. YU. Proektirovaniye mekhatronnykh i robototekhnicheskikh sistem : uchebnoye posobie / A. YU. Rodichev, R. N. Polyakov, A. V. Gorin. – Orel : OGU imeni I.S. Turgeneva, 2023. – 271 s.
 9. Volkova, M. A. Privody mekhatronnykh i robototekhnicheskikh sistem : metodicheskie rekomendatsii / M. A. Volkova. – M. : RTU MIREA, 2024. – 19 s.
 10. Romanov, A. M. Programmnoye obespecheniye mekhatronnykh i robototekhnicheskikh sistem : uchebno-metodicheskoye posobie / A. M. Romanov, M. A. Volkova. – M. : RTU MIREA, 2019. – 68 s.
 11. Volkov, A. N. Vybor energosberegayushchikh zakonov dvizheniya mekhatronnykh privodov tekhnologicheskikh mashin / A. N. Volkov, O. N. Macko, A. V. Mosalova // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki. – 2018. – № 4. – S. 141–149.
 12. Sintez optimal'nykh po kriteriyu energosberezheniya algoritmov raboty privodov robotov i tekhnologicheskikh mashin: ucheb. posobie / A. N. Volkov, A. A. Kornilova, O. N. Macko, A. V. Kozlovich. – SPb. : POLITEKH-PRESS, 2023. – 80 s.
 13. Optimizatsiya privoda postoyannogo toka s reguliruemoy skorost'yu / O. N. Prokopenya, L. I. Vabishchevich, A. V. Francevich [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2023. – № 2. – S. 93–96.
 14. Suprunchuk, P. D. Optimal'nyy elektroprivod postoyannogo toka / P. D. Suprunchuk, O. N. Prokopenya, O. G. Prozhizhko // Novye tekhnologii i materialy, avtomatizatsiya proizvodstva : sbornik statej / Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. – Brest : Izdatel'stvo BrGTU, 2021. – S. 20–25.
 15. Optimizatsiya pozitsionnogo privoda postoyannogo toka / O. N. Prokopenya, L. I. Vabishchevich, O. G. Prozhizhko, A. S. Lapuka // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 2. – S. 79–83.
 16. Optimizatsiya upravlyayushchej podsystemy mekhatronnogo modulya na osnove trekhfaznogo asinhronnogo elektrodvigatelya / O. N. Prokopenya, A. V. Francevich, L. I. Vabishchevich, A. I. Pikula // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2025. – № 1. – S. 103–109.
 17. Solodovnikov, V. V. Osnovy teorii i elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / V. V. Solodovnikov, V. N. Plotnikov, A. V. YAKovlev. – M. : Mashinostroenie, 1985. – 536 s.
 18. Usloviye fizicheskoy realizuemosti matematicheskikh modelej asinhronnykh dvigatelej / YU. Z. Kovalev, A. YU. Kovalev, A. S. Solodovnikov, E. YU. Ryahina // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. – 2009. – № 4. – S. 10–18.
 19. Ivanov-Smolenskij, A. V. Elektricheskie mashiny: uchebnyy dlya vuzov / A. V. Ivanov-Smolenskij. – M. : Energiya, 1980. – 928 s.
 20. Vol'dek, A. I. Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka: uchebnyy dlya vuzov / A. I. Vol'dek, V. V. Popov. – SPb. : Piter, 2008. – 350 s.
 21. Asinhronnye dvigateli serii 4A: spravochnik / A. E. Kravchik, M. M. SHlaf, V. I. Afonin, E. A. Sobolenskaya. – M. : Energoizdat, 1982. – 504 s.

Материал поступил 01.09.2025, одобрен 05.09.2025, принят к публикации 05.09.2025

ФОРМИРОВАНИЕ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ НА СООТВЕТСТВИЕ ИХ НАИЛУЧШИМ ДОСТУПНЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ МЕТОДАМ

Ю. И. Ахмадиева¹, С. А. Дубенок²

¹ Заведующий сектором государственного водного кадастра, РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», Минск, Беларусь, e-mail: 7069760@gmail.com

² К. т. н., доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: dubenok@bntu.by

Реферат

Очистные сооружения сточных вод населенных пунктов Республики Беларусь представлены большим разнообразием конструктивных особенностей, технических характеристик и применяемых технологических решений. Учитывая экологическую значимость таких объектов и современные требования национального законодательства, эксплуатирующие их организации вынуждены обеспечивать непрерывное повышение эффективности их работы, в том числе путем их реконструкции и модернизации [1].

Кроме того, широкое распространение в республике получили очистные сооружения сточных вод населенных пунктов биологической очистки в естественных условиях, подавляющее большинство которых представлено полями фильтрации. При этом национальное законодательство, в том числе положения Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года, а также Стратегии в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2035 года, содержит требования по переходу на современные методы очистки сточных вод с сокращением используемых площадей и выводом из эксплуатации полей фильтрации. На практике это означает ликвидацию полей фильтрации и других очистных сооружений сточных вод биологической очистки в естественных условиях и строительство взамен их очистных сооружений сточных вод населенных пунктов биологической очистки в искусственных условиях со сбросом очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты. В этой связи далее по тексту статьи под очистными сооружениями сточных вод населенных пунктов подразумеваются очистные сооружения сточных вод биологической очистки в искусственных условиях со сбросом сточных вод в поверхностные водные объекты.

В статье проведен анализ сложившихся в республике подходов к проектированию объектов строительства, реконструкции очистных сооружений сточных вод населенных пунктов. Проанализированы причины и рассмотрены возможные последствия принятия некорректных технологических решений. Показано, что наибольшая вероятность совершения ошибок характерна для начальных этапов проектирования на стадиях формирования технического задания и разработки предпроектной (предынвестиционной) документации.

Предложено решение обозначенных проблемных вопросов, основанное на научно обоснованных подходах, учитывающих характерные особенности эксплуатации очистных сооружений сточных вод населенных пунктов республики с учетом международного опыта.

Ключевые слова: очистные сооружения сточных вод населенных пунктов, наилучшие доступные технические методы, технологии очистки сточных вод, сточные воды, критерии оценки.

FORMATION OF NATIONAL APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGIES IN SETTLEMENTS FOR THEIR CONFORMITY WITH THE BEST AVAILABLE TECHNICAL METHODS

Y. I. Akhmadziyeva, S. A. Dubianok

Abstract

Wastewater treatment facilities in populated areas of the Republic of Belarus are represented by a wide variety of design features, technical characteristics and applied technological solutions. Considering the environmental significance of such facilities and the current requirements of national legislation, the organizations operating them are forced to ensure continuous improvement of their operational efficiency, including through their reconstruction and modernization [1].

In addition, wastewater treatment facilities for residential areas using biological treatment in natural conditions have become widespread in the republic, the vast majority of which are represented by filtration fields. At the same time, national legislation, including the provisions of the National Strategy for Water Resources Management in the Context of Climate Change for the Period up to 2030, as well as the Strategy for Environmental Protection of the Republic of Belarus for the period up to 2035, contains requirements for the transition to modern methods of wastewater treatment with a reduction in the areas used and the decommissioning of filtration fields. In practice, this means the elimination of filtration fields and other wastewater treatment facilities for biological treatment in natural conditions and the construction of wastewater treatment facilities for settlements for biological treatment in artificial conditions with the discharge of treated wastewater into surface water bodies. In this regard, further in the text of the article, wastewater treatment facilities for populated areas are understood to mean wastewater treatment facilities for biological treatment under artificial conditions with discharge of wastewater into surface water bodies.

The article analyzes the approaches to designing construction projects and reconstructing wastewater treatment facilities in populated areas that have developed in the republic. The reasons for making incorrect technological decisions are analyzed and the possible consequences are considered. It is shown that the highest probability of making errors is typical for the initial stages of design at the stages of forming the technical specifications and developing pre-project (pre-investment) documentation.

A solution to the identified problematic issues is proposed, based on scientifically based approaches that take into account the characteristic features of the operation of wastewater treatment facilities in populated areas of the republic, taking into account international experience.

Keywords: sewage treatment plants for populated areas, best available techniques, wastewater treatment technologies, waste water, evaluation criteria.

Введение

В настоящее время во всех областях республики и в г. Минске проводятся масштабные работы по реконструкции, строительству очистных

сооружений сточных вод населенных пунктов (далее – ОССВНП). Общее число объектов ОССВНП, строительство и реконструкция которых выполняется в рамках Государственной программы «Комфортное жилье

и благоприятная среда» на 2021–2025 гг. [2] (далее – госпрограмма), составляет 70 единиц. Реализация данных объектов строительства или реконструкции ОССВНП осуществляется с участием финансирования республиканских и местных бюджетов, кредитных ресурсов ОАО «Банк развития Республики Беларусь», а также с привлечением средств внешних государственных займов [2].

Помимо ОССВНП, реализуемых в рамках госпрограммы, аналогичные работы проводятся также и на других ОССВНП в основном за счет собственных средств эксплуатирующих их организаций.

Вне зависимости от мощности проектируемых объектов, их территориального расположения и источников финансирования, основной целью реализации проектов строительства, реконструкции ОССВНП является повышение степени очистки сточных вод.

Анализ реализованных на территории Республики Беларусь и Российской Федерации проектов строительства, реконструкции ОССВНП показывает, что на аналогичных по производительности (производительной мощности) объектах может быть реализован широкий спектр технологических решений по очистке сточных вод.

В свою очередь выбор технологии напрямую зависит от требуемых нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод в поверхностные водные объекты, причем достижения одних и тех же требований можно добиться с применением различных технологий и оборудования.

В этой связи выбор оптимального технологического решения целесообразно проводить путем сравнения возможных вариантов технологий с учетом технико-экономических показателей реализации проекта на стадии разработки предпроектной (предынвестиционной) документации, а наиболее эффективным инструментом, позволяющим определить все возможные варианты технологий с учетом их экологической эффективности и экономической целесообразности является концепция наилучших доступных технологий (далее – НДТ).

Анализ существующего положения и постановка проблемных вопросов

Проектирование объектов строительства, реконструкции ОССВНП, в соответствии с действующим законодательством, осуществляется в две стадии:

- предынвестиционная, результатом которой является разработка предпроектной (предынвестиционной) документации;
- инвестиционная, результатом которой является разработка проектной документации в одну или две стадии. При одностадийной разработке проектной документации разрабатывается строительный проект, при двухстадийной – архитектурный и строительный проекты.

На предынвестиционной стадии, в соответствии с Кодексом Республики Беларусь об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности, определяется следующее: необходимость, техническая возможность, экономическая целесообразность осуществления инвестиций в строительство, реконструкцию объектов ОССВНП; требования к земельному участку; варианты объемно-планировочных и технологических решений; сведения об инженерных нагрузках; источники и объемы финансирования; проводится оценка воздействия на окружающую среду и расчеты по определению эффективности осуществления инвестиций, социальных, экологических и других последствий возведения, реконструкции, реставрации, эксплуатации объекта.

Именно на стадии разработки предпроектной (предынвестиционной) документации в составе раздела обоснования инвестиций осуществляется выбор основного технологического оборудования, то есть формируется аппаратное оформление технологической линии, которое, в свою очередь, не гарантирует выбор оптимальной технологии очистки сточных вод для данных ОССВНП.

Технология в широком понимании представляет собой совокупность применяемых технологических процессов, методов, систем очистки сточных вод, включая состав и режимы работы основного технологического оборудования, выраженную в форме текстовых пояснительных записок, моделей, чертежей, проектов, инструкций, программных продуктов.

Таким образом определить корректность подбора того или иного технологического оборудования невозможно без комплексной оценки технологии в целом с учетом технической, экологической и экономической эффективности ее применения на данных ОССВНП.

При этом, в соответствии со сложившейся многолетней практикой, классический подход к выбору основного технологического оборудования осуществляется проектировщиком на основании объектов-аналогов исходя из собственного опыта проектирования, причем в предпроектной (предынвестиционной) документации, как правило, не указывается по каким именно критериям выполнен подбор объекта-аналога, взятого за основу текущего проектного решения. Таким образом, на практике обоснование выбора основного технологического оборудования на основе сравнения возможных вариантов технологий, в том числе с учетом технико-экономических показателей эксплуатации объектов-аналогов, как правило, отсутствует.

Также необходимо отметить, что разработка предпроектной (предынвестиционной) документации осуществляется проектировщиком на основании задания на разработку такой документации, составленного заказчиком, а в случае разработки проектов реконструкции, строительства ОССВНП, заказчиком, как правило, выступает организация водопроводно-канализационного или жилищно-коммунального хозяйства, в эксплуатационном ведении которой находятся (будут находиться) очистные сооружения.

Проектная документация, в свою очередь, разрабатывается проектировщиком на основании решений, принятых на предынвестиционной стадии, утверждается в порядке, установленном Советом Министров Республики Беларусь, проходит госстройэкспертизу (при необходимости) и является основанием для финансирования строительства.

Проблематика традиционно сложившихся в республике подходов к выбору основных технологических решений при разработке проектов реконструкции, строительства ОССВНП представлена в таблице 1.

Анализ таблицы 1 показывает, что проблематика существующих подходов к выбору основных технологических решений при разработке проектов реконструкции, строительства ОССВНП представляет собой совокупность проблемных вопросов, возникающих на начальных этапах проектирования, решение которых напрямую зависит от уровня компетенции специалистов организаций водопроводно-канализационного (жилищно-коммунального) хозяйства и специалистов проектных организаций.

Основной проблемой в сложившейся ситуации является недостаток информации об опыте применения тех или иных технологий очистки сточных вод в условиях эксплуатации тех или иных ОССВНП. Иными словами, отсутствие единой системы оценки, сбора, накопления и распространения информации о наилучших доступных технических методах (далее – НДТМ) очистки сточных вод на ОССВНП.

При этом отсутствие достаточного опыта и знаний о современных технологиях и оборудовании, применяемых для очистки сточных вод на каждом из этапов проектирования, перечисленных в таблице 1, могут привести к реализации неэффективных технологических решений и существенным финансовым затратам на их реализацию и дальнейшее устранение.

При подготовке технического задания на разработку предпроектной (предынвестиционной) документации специалисты организаций водопроводно-канализационного (жилищно-коммунального) хозяйства, формирующие требования к технологической части проекта, как правило, инженеры-технологи ОССВНП, в первую очередь руководствуются положениями Водного кодекса Республики Беларусь, Закона Республики Беларусь «Об охране окружающей среды», правилами пользования централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации) в населенных пунктах [4], правилами технической эксплуатации систем питьевого водоснабжения и водоотведения (канализации) населенных пунктов [5], ЭкоНП 17.01.06-001-2017 Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности [6].

Степень очистки сточных вод, сбрасываемых в окружающую среду, принимают в соответствии с постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 26 мая 2017 г. № 16 «О некоторых вопросах нормирования сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод» [7], ЭкоНП 17.06.02-002-2021 Экологические нормы и правила Республики Беларусь «Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Правила расчета нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод» [8] с учетом ЭкоНП 17.06.01-006-2023 «Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Нормативы качества воды поверхностных водных объектов» [9].

Таблица 1 – Проблематика существующих подходов к выбору основных технологических решений при разработке проектов реконструкции, строительства ОССВНП

Этап проектирования	Исполнитель	Проблемный вопрос	Примечания
1	2	3	4
Формирования технического задания на разработку проектной (предпроектной (предынвестиционной)) документации	Заказчик – организация водопроводно-канализационного или жилищно-коммунального хозяйства	Недостаточная компетентность либо отсутствие квалифицированного персонала, владеющего современными технологиями очистки сточных вод, их технико-экономическими характеристиками	Инженеры-технологи ОССВНП республики, как правило, имеют опыт работы только на одних ОС-СВНП, не имеют опыта участия в проектировании/сопровождении проектов реконструкции, строительства ОССВНП. Не имеют возможность получить информацию об успешном опыте внедрения современных технологий и оборудования на объектах-аналогах ОССВНП. Более того, на многих ОС-СВНП республики и вовсе отсутствуют инженеры-технологи ОССВНП. Техническое задание составляют специалисты отдела строительства с акцентом на объемно-планировочные и иные решения без должной проработки технологической части
		Субъективное представление специалиста, формирующего техническое задание, о проектируемых технологиях и оборудовании	Нередко в проект технического задания закладываются требования по применению технологий и оборудования, успешно применяемых на других объектах, в том числе в Российской Федерации, но не сопоставимых с проектируемыми ОССВНП по условиям эксплуатации, качественным и количественным характеристикам сточных вод, поступающих на очистку, и требованиям к степени очистки сточных вод
Разработка проектной (предпроектной (предынвестиционной)) документации	Подрядчик – проектная организация	Разработка проектной (предпроектной (предынвестиционной)) документации в строгом соответствии с техническим заданием и представленными исходными данными, без проведения дополнительных проектно-исследовательских работ	Некорректные / неверные исходные данные, а также требования к объекту проектирования, ошибочно сформированные на стадии разработки технического задания, могут лечь в основу проектной (предпроектной (предынвестиционной)) документации, быть реализованы и выявиться в ходе пуско-наладочных работ либо в процессе эксплуатации ОССВНП
		Недостаточная проработка и обоснование выбранной технологии	В соответствии с СП 1.02.01-2023 Строительные правила Республики Беларусь. Состав и порядок разработки предпроектной (предынвестиционной) документации [3], в составе раздела «Основные технологические решения» предпроектной (предынвестиционной) документации приводят обоснование выбранной технологии основного и вспомогательного производств на основе сравнения возможных вариантов технологических процессов (схем) в части их экономической эффективности, технической безопасности, потребления ресурсов на единицу продукции, а также степени риска и вероятности возникновения аварийных ситуаций с учетом их локализации, безопасного хранения, обезвреживания и захоронения отходов производства и др.
		Принятие технологических решений на основании объектов-аналогов без должной проработки и анализа сопоставимости проектируемого объекта и объекта-аналога по всем значимым критериям	

Основными техническими нормативными правовыми актами, применяемыми при формировании требований к технической части проекта, являются:

– СН 4.01.02-2019 «Канализация. Наружные сети и сооружения» – строительные нормы обязательные к применению, которые устанавливают требования к проектированию наружных сетей и сооружений канализации [10];

– СТБ 17.06.02-03-2015 «Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Классификация очистных сооружений сточных вод» – государственный стандарт Республики Беларусь, который устанавливает классификацию очистных сооружений сточных вод по группам, подгруппам и видам, отражающим назначение, биологические, химические и физические процессы, используемые при очистке сточных вод и признаки конструктивного исполнения [11];

– СП 4.01.10-2025 «Очистные сооружения сточных вод» – строительные правила, которые носят рекомендательный характер исполнения и распространяются на очистные сооружения сточных вод систем канализации и предназначены для применения при раз-

работке проектной документации на очистные сооружения при их возведении и реконструкции [12].

Названные технические нормативные правовые акты содержат порядок проектирования (расчета) сооружений и оборудования, применяемого для очистки сточных вод, в том числе на ОССВНП, в соответствии с действующей в республике классификацией [11]. При этом вопрос выбора наиболее эффективных технических и технологических решений для достижения требуемой степени очистки сточных вод на уровне существующей нормативной правовой базы остается открытым.

Вместе с тем необходимо отметить наличие в Республике Беларусь действующей законодательной базы для разработки, внедрения и распространения НДТМ. Термин «наилучшие доступные технические методы» закреплен в Законе «Об охране окружающей среды» (далее – Закон). В соответствии с Законом НДТМ необходимо внедрять как при осуществлении хозяйственной и иной деятельности, оказывающей комплексное воздействие на окружающую среду, так и при разработке проектной и (или) иной документации по объектам хозяйственной и иной деятельности.

Учитывая наличие в Республике Беларусь действующей законодательной базы для разработки, внедрения и распространения НДТМ, необходимо разработать национальные подходы к оценке существующих технологий очистки сточных ОССВНП на соответствие их НДТМ.

Разработка критериев и методов оценки технологий ОССВНП на соответствие их НДТМ

Разработка критериев НДТМ применительно к ОССВНП базируется на основных технических и технологических характеристиках ОССВНП и характерных для Республики Беларусь особенностях их эксплуатации, требованиях национального законодательства в области очистки сточных вод, международном опыте внедрения и применения НДТ по очистке сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения (канализации).

Анализ характерных особенностей эксплуатации ОССВНП в условиях республики представлен в [13]. Результаты изучения и анализа международного опыта внедрения и применения НДТ в области очистки сточных вод изложены в [14–16]. Результаты оценки применимости зарубежного опыта внедрения НДТ в области очистки сточных вод на ОССВНП в условиях Республики Беларусь представлены в [17–18].

Исходя из определения, НДТМ должны обеспечивать уменьшение и (или) предотвращение поступления загрязняющих веществ в окружающую среду, образования отходов производства по сравнению с применяемыми и являющиеся наиболее эффективными для обеспечения нормативов качества окружающей среды, нормативов допустимого воздействия на окружающую среду при условии экономической целесообразности и технической возможности их применения.

На основе проведенного анализа международного опыта внедрения и применения НДТ, с учетом характерных особенностей эксплуатации ОССВНП в условиях Беларуси, авторами разработана система критериев и методов оценки технологий ОССВНП на соответствие их НДТМ. Предлагаемые критерии оценки объединены в три группы:

– технологические и технические критерии – позволяют оценить технологии на соответствие их современным достижениям науки и техники, а также оценить эффективность технологии очистки сточных вод с точки зрения ее прямого назначения – снижения содержания загрязняющих веществ в сточных водах в процессе их очистки;

– экологические критерии – позволяют оценить эффективность технологий с точки зрения обеспечения нормативов допустимого воздействия на окружающую среду, уменьшения и (или) предотвращения поступления загрязняющих веществ в окружающую среду, а также образования отходов производства;

– экономические критерии – позволяют оценить экономические аспекты применения технологии (затраты на ее реализацию и последующую эксплуатацию).

Перечень критериев оценки технологий ОССВНП на соответствие их НДТМ в разрезе групп представлен в таблице 2.

Методика оценки по некоторым из представленных в таблице 2 критериев, таких как эффективность удаления загрязняющих веществ в процессе очистки сточных вод, уровень использования производственной мощности, затраты на очистку 1 м³ сточных вод, степень износа очистных сооружений, требует проведения предварительных расчетов. Методика оценки по критерию соответствия качества очищенных сточных вод нормативам допустимых сбросов предполагает проведение сравнительного анализа. По другим представленным критериям: применение глубокого удаления азота и фосфора, соблюдение требований природоохранного законодательства по сбросу сточных вод в поверхностные водные объекты, применение автоматизированных систем управления технологическим процессом очистки сточных вод, обработка и использование осадков сточных вод – оценивается наличие или отсутствие требуемых условий или параметров (оборудования).

Независимо от методов проведения оценки разработанные критерии являются универсальными, то есть применимыми ко всем ОССВНП вне зависимости от качественных и количественных характеристик сточных вод, поступающих на ОССВНП, территориального расположения и эквивалента населения ОССВНП.

Таблица 2 – Критерии оценки технологий ОССВНП на соответствие их НДТМ

Технологические и технические	Экологические	Экономические
эффективность удаления загрязняющих веществ в процессе очистки сточных вод	соответствие качества очищенных сточных вод нормативам допустимых сбросов	затраты на очистку 1 м ³ сточных вод
применение глубокого удаления азота и фосфора	соблюдение требований природоохранного законодательства по сбросу сточных вод в поверхностные водные объекты	
применение автоматизированных систем управления технологическим процессом очистки сточных вод	обработка осадков сточных вод	степень износа очистных сооружений
уровень использования производственной мощности	использование осадков сточных вод	

Рассмотрим подробнее каждый из представленных в таблице 2 критериев и методы их оценки.

Эффективность удаления загрязняющих веществ в процессе очистки сточных вод является одним из важнейших параметров работы ОССВНП. Данный критерий позволяет оценить снижение содержания загрязняющих веществ в составе сточных вод в процессе их очистки.

Оценка эффективности удаления загрязняющих веществ в процессе очистки сточных вод проводится по каждому из загрязняющих веществ и показателей, для которых, в соответствии с [7], доводятся прямые нормы допустимых сбросов химических и иных веществ в составе таких вод в зависимости от эквивалента населения (далее – ЭН) (массы органических веществ в составе сточных вод, поступающих на очистные сооружения):

– для ОССВНП с ЭН до 2000 человек (массой органических веществ в составе сточных вод, поступающих на очистные сооружения до 120 кг/сут) оценка эффективности удаления загрязняющих веществ проводится по следующему перечню показателей: биохимическое потребление кислорода (БПК₅), химическое потребление кислорода (ХПК_{Cr}), взвешенные вещества, аммоний-ион;

– для ОССВНП с ЭН более 2001 человек (массой органических веществ в составе сточных вод, поступающих на очистные сооружения более 120 кг/сут), помимо вышеуказанного перечня загрязняющих веществ и показателей (БПК₅, ХПК_{Cr}, взвешенные вещества, аммоний-ион) проводится оценка эффективности удаления азота общего и фосфора общего.

Эффективность удаления загрязняющих веществ в процессе очистки сточных вод ($\mathcal{E}_i$, %) определяется по формуле

$$\mathcal{E}_i = \frac{(C_{i(\text{вх.})} - C_{i(\text{вых.})})}{C_{i(\text{вх.})}} \cdot 100 \%,$$

где $C_{i(\text{вх.})}$ – концентрация i -го загрязняющего вещества в составе сточных вод, поступающих на ОССВНП, мг/дм³;

$C_{i(\text{вых.})}$ – концентрация i -го загрязняющего вещества в составе очищенных сточных вод, сбрасываемых в поверхностный водный объект, мг/дм³.

Применение глубокого удаления азота и фосфора в современных условиях является одним из важнейших требований, предъявляемых к эксплуатации ОССВНП. Большинство действующих ОССВНП

построены в соответствие со строительными нормами и правилами, введенными в действие несколько десятилетий назад, когда при проектировании учитывались только два показателя: биохимическое потребление кислорода (БПК₅) и взвешенные вещества. При этом не предусматривалась очистка от биогенных элементов.

Согласно современным требованиям [7] к ОССВНП с ЭН более 2001 человек (массой органических веществ в составе сточных вод, поступающих на очистные сооружения более 120 кг/сут) предъявляются требования по достижению прямых нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе таких вод в значениях, которые с учетом эквивалента населения (массы органических веществ в составе сточных вод, поступающих на очистные сооружения) практически невозможно достичь без внедрения технологических решений по глубокому удалению азота и фосфора.

Таким образом, большинство реализуемых в настоящее время проектов реконструкции, строительства ОССВНП направлены на интенсификацию стадии биологической очистки сточных вод с глубоким удалением азота и фосфора, а технологии, заложенные в основу таких проектов, в соответствии с международной практикой, являются НДТ.

Применение автоматизированных систем управления технологическим процессом очистки сточных вод в современных условиях является ключевым аспектом повышения эффективности очистки сточных вод [19–23]. Применение автоматизированных систем обеспечивает достоверный контроль и надёжное автоматическое управление технологическим оборудованием.

Повышение эффективности очистки сточных, в свою очередь, достигается за счет повышения оперативности реагирования на изменение основных параметров технологических процессов. Так, например, одним из основных технологических параметров обеспечения эффективной работы аэротенков является поддержание оптимального кислородного режима, который обеспечивается за счет подачи и распределения воздуха.

Регулирование подачи воздуха в ручном режиме потребует участия нескольких структурных подразделений и принятия комплексных мер, таких как отбор проб и выполнение испытаний в лабораторных условиях (лаборатория), анализ результатов лабораторных испытаний и расчет необходимой интенсивности аэрации (инженер-технолог), корректировка технологических режимов работы оборудования (оператор), повторный отбор проб и выполнение испытаний в лабораторных условиях (лаборатория), повторный анализ результатов лабораторных испытаний и принятие решения о необходимости дальнейшего изменения параметров аэрации (инженер-технолог). Таким образом, выход на заданные параметры и достижение оптимальных режимов работы технологического оборудования займет по меньшей мере несколько дней. В то же время применение автоматизированных систем управления позволяет:

- определять основные параметры технологического процесса в автоматическом режиме (за счет применения датчиков, анализаторов);
- отражать изменение основных параметров в режиме онлайн;
- анализировать и рассчитывать оптимальные параметры;
- регулировать режимы работы технологического оборудования с целью достижения оптимальных параметров.

В современных условиях все перечисленные выше действия могут выполняться автоматизированной системой управления, тем самым уменьшая долю ручного труда либо полностью исключая человеческий фактор, повышая оперативность реагирования на изменение технологических параметров и эффективность очистки сточных вод. Кроме того, оперативное изменение технологических параметров (в данном случае изменение режимов подачи воздуха) обеспечит рациональное использование ресурсов (воздуха) и электроэнергии, и, как следствие, экономическую эффективность.

Таким образом, при оценке критерия учитывается наличие одной или нескольких видов автоматизированных систем управления технологическим процессом очистки сточных вод, отличающихся между собой различным уровнем автоматизации:

- наличие шкафов управления и сигнализации без возможности регулирования параметров технологического процесса (только контроль параметров);
- наличие дистанционного управления технологическим процессом с места оператора (диспетчера);

– автоматическое регулирование параметров технологического процесса (без участия оператора).

Уровень использования производственной мощности (Y , %) рассчитывается как отношение фактического расхода сточных вод к проектной мощности очистных сооружений:

$$Y = \frac{Q_{\text{факт.}}}{Q_{\text{проект.}}} \cdot 100 \%,$$

где $Q_{\text{факт.}}$ – фактический расход сточных вод ОССВНП, м³/сут;

$Q_{\text{проект.}}$ – проектная мощность ОССВНП, м³/сут.

Результаты анализа уровня использования производственной мощности ОССВНП Беларуси представлен ранее [24]. Установлено, что полученные значения уровня использования производственной мощности изменяются от минимального значения 0,5 % до максимального 163,9 %. Фактический расход сточных вод подавляющего большинства ОССВНП значительно отличается от проектного, что ставит под угрозу достижение предусмотренной проектом эффективности очистки сточных вод и достижения установленных нормативов качества очищенных сточных вод [13].

Учитывая сложившуюся ситуацию, а также безусловную необходимость работы ОССВНП в рамках проектных параметров для достижения нужной эффективности очистки сточных вод, уровень использования производственной мощности в комплексе с другими критериями является одним из ключевых для принятия решения о необходимости реконструкции существующих ОССВНП.

Оценка соответствия качества очищенных сточных вод нормативам допустимых сбросов является одним из основных критериев оценки экологической эффективности работы ОССВНП. В общепринятом представлении методика оценки основана на прямом сопоставлении фактических значений концентраций загрязняющих веществ (значений показателей) в составе очищенных сточных вод на выходе из ОССВНП (далее – $C_{\text{факт.}}$) с проектными значениями. При этом ОССВНП считаются эффективно функционирующими, если по всем нормируемым загрязняющим веществам (показателям) $C_{\text{факт.}} \leq C_{\text{пр.}}$

В системе комплексной оценки технологий ОССВНП на их соответствие НДТМ оценка соответствия качества очищенных сточных вод нормативам допустимых сбросов проводится по каждому из загрязняющих веществ и показателей, для которых, в соответствии с [7], доводятся прямые нормы допустимых сбросов химических и иных веществ в составе таких вод в зависимости от ЭН (массы органических веществ в составе сточных вод, поступающих на очистные сооружения) и основана на сопоставлении фактических значений концентраций загрязняющих веществ (значений показателей) в составе очищенных сточных вод на выходе из ОССВНП ($C_{\text{факт.}}$) с значениями нормативов допустимых сбросов ($C_{\text{норм.}}$) в соответствии с [7]. Такой подход позволяет систематизировать ОССВНП на группы в зависимости от ЭН, провести оценку и сопоставительный анализ экологической эффективности работы ОССВНП внутри каждой из групп, выявить в рамках группы технологии, соответствующие НДТМ.

Оценка соблюдения требований природоохранного законодательства по сбросу сточных вод в поверхностные водные объекты заключается в установлении наличия фактов превышения допустимых концентраций загрязняющих веществ в составе сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водные объекты, установленных в разрешении на специальное водопользование или комплексном природоохранном разрешении.

Наличие таких фактов и установление их систематического характера (два и более установленных фактов за предыдущий год либо по одному факту за два предыдущих года) может являться одним из факторов, указывающих на неэффективную работу ОССВНП и требующих дальнейшего изучения.

Причинами несоблюдения требований природоохранного законодательства по сбросу сточных вод с ОССВНП в поверхностные водные объекты могут быть как применение неэффективных устаревших технологий очистки сточных вод, так и несоблюдение условий приема сточных вод в централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов, приводящее к формированию качественного и количественного состава сточных вод на входе в ОССВНП в значениях, превышающих проектные. Иными словами, ОССВНП не рассчитаны на прием сточных вод с таким качественным и количественным составом.

В данном случае, даже при достижении проектного уровня эффективности снижения загрязняющих веществ в составе сточных вод в процессе их очистки, их качество может не соответствовать требованиям, предъявляемым к сбросу сточных вод в поверхностные водные объекты.

Обработка и использование осадков сточных вод на ОССВНП позволяет уменьшить количество отходов, что, исходя из терминологии, закрепленной в национальном законодательстве, является признаком НДТМ. При этом для целей разработки НДТМ наличие решений по обработке и использованию осадков сточных вод целесообразно разделить на два критерия в зависимости от конечной цели их применения. Так, под обработкой осадков сточных вод в широком смысле понимаются технологические решения, применяемые с целью уменьшения их количества, обезвреживания, стабилизации или подготовки к их дальнейшему использованию. Следует отметить, что такой подход не решает проблему накопления осадков на объектах хранения ввиду отсутствия обоснованных вариантов их дальнейшего использования. Под использованием осадков сточных вод для целей разработки НДТМ понимаются технологические решения, применяемые с целью вовлечения осадков сточных вод в хозяйственный оборот.

Среди известных направлений использования осадков сточных вод можно выделить три основных:

- использование на земле (рекультивация нарушенных земель, внесение в качестве органико-минерального удобрения и почвоулучшающей добавки под сельскохозяйственные культуры, лесное хозяйство и т. п.);
- использование в производственных процессах (в качестве выгорающей добавки в производстве строительной керамики, в составе материалов при производстве дорожно-строительных работ и др.);
- энергетическое использование (биогазовые технологии, мониторинг и сжигание в смеси с другими отходами [24]).

В соответствии с [10], при производительности очистных сооружений до 25 000 м³/сут для обработки осадков сточных вод допускается применять иловые площадки. При большей производительности для снижения его объема следует предусматривать сооружения по механическому обезвоживанию осадка.

Следует также отметить, что в настоящее время возможности размещения осадков сточных вод на объектах хранения республики практически исчерпаны. Таким образом, при проведении оценки технологии ОССВНП на соответствие НДТМ, приоритетными направлениями обращения с осадками сточных вод являются: механическое обезвоживание осадка, анаэробное сбраживание, компостирование, сушка, сжигание, а также все возможные виды использования осадков и вовлечения их в хозяйственный оборот (при условии соблюдения требований природоохранного законодательства).

Затраты на очистку 1 м³ сточных вод (УЗ, руб.) для проектируемых ОССВНП выражаются в удельных капитальных затратах, для действующих – в удельных эксплуатационных затратах на очистку 1 м³ сточных вод и рассчитываются по формуле

$$УЗ = \frac{З_{ЭЭ} + З_{М} + З_{ТО}}{Q},$$

где $З_{ЭЭ}$ – затраты на электрическую энергию, используемую для технологических целей (для проектируемых ОССВНП учитываются капитальные затраты, для действующих – фактические эксплуатационные годовые затраты), руб.;

$З_{М}$ – затраты на материалы, используемые для технологических целей (для проектируемых ОССВНП учитываются капитальные затраты, для действующих – фактические эксплуатационные годовые затраты), руб.;

$З_{ТО}$ – затраты на ремонт и техническое обслуживание основных средств, непосредственно используемых в производственном процессе (для проектируемых ОССВНП учитываются капитальные затраты, для действующих – фактические эксплуатационные годовые затраты), руб.;

Q – производительность ОССВНП (для проектируемых ОССВНП в расчете применяется проектная производительность, для действующих – фактическая годовая производительность), м³/год.

Расчет и сопоставительный анализ удельных затрат на очистку 1 м³ сточных вод позволит определить диапазон приемлемых значений,

в рамках которых применение тех или иных технологий очистки сточных вод в условиях Беларуси является экономически целесообразным.

Высокая **степень износа очистных сооружений** является одной из наиболее распространенных причин недостаточной эффективности очистки сточных вод и, как следствие, осуществления сброса сточных вод в поверхностные водные объекты с превышением нормативов допустимых сбросов.

Степень износа основных производственных фондов является экономическим показателем, отражающим состояние и степень обесценения актива за период его эксплуатации, и в общепринятом понимании рассчитывается как отношение разницы между полной учетной и остаточной балансовой стоимостью основных фондов к полной учетной стоимости этих основных фондов.

В соответствии с действующим законодательством эксплуатирующие организации самостоятельно выбирают способ начисления амортизации (линейный, нелинейный либо производственный), что непосредственно влияет на величину остаточной балансовой стоимости основных фондов, а соответственно, и на величину степени износа.

Методика оценки степени износа очистных сооружений для целей разработки НДТМ должна обеспечить возможность получения данных об износе, сопоставимых с реальным физическим (техническим) состоянием сооружений. Кроме того, данный критерий является одним из ключевых в случае необходимости принятия решения о первоочередной реконструкции тех или иных ОССВНП путем сравнения их степени износа. В иных случаях в комплексе с другими критериями является одним из решающих для определения необходимости реконструкции действующих ОССВНП.

Таким образом, расчет степени износа очистных сооружений (И, %) для целей разработки НДТМ производится по формуле

$$И = \frac{TГ - ГР(В)}{Н} \cdot 100 \%,$$

где ТГ – текущий год;

ГР(В) – год ввода сооружений очистки сточных вод после последней реконструкции либо, если реконструкция не осуществлялась, год ввода сооружений в эксплуатацию;

Н – нормативный срок службы, лет [25].

Заключение

Разработанная система критериев и методов оценки технологий ОССВНП на соответствие их НДТМ является универсальной (применимой ко всем объектам ОССВНП республики) и учитывает все основные аспекты концепции НДТМ: техническая возможность реализации, экологическая эффективность и экономическая целесообразность технологических решений.

Предложенная система критериев и методов их оценки может выступать методологической основой для формирования национальных подходов к оценке технологий очистки сточных вод населенных пунктов на соответствие их НДТМ.

Дальнейшее развитие национальной концепции НДТМ в области очистки сточных вод населенных пунктов возможно путем решения следующих взаимосвязанных задач:

- разработка методики комплексной (интегральной) оценки технологий ОССВНП на соответствие их НДТМ;
- оценка применяемых в республике технологий и технологических решений очистки сточных вод на ОССВНП на соответствие их НДТМ с помощью разработанной методики;
- определение наиболее эффективных технологий и технологических решений по очистке сточных вод на ОССВНП и их систематизация;
- формирование национальных НДТМ по очистке сточных вод на ОССВНП.

Список цитированных источников

1. 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 : сборник материалов Международной научно-практической конференции, приуроченной ко Всемирному дню водных ресурсов, Минск, 22–24 марта 2023 г. / Национальная библиотека Беларуси. – Минск, 2023. – С. 127.

2. О Государственной программе «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2021–2025 годы: 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: 12.05.2025).
3. Состав и порядок разработки предпроектной (предынвестиционной) документации. Строительные правила Республики Беларусь : СП 1.02.01-2023. – Введ. 23.05.23 (с отменой ТКП 45-1.02-298-2014 (02250)). – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – 75 с.
4. Об утверждении Правил пользования централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации) в населенных пунктах : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 30.09.2016 № 788 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600788> (дата обращения: 12.05.2025).
5. Об утверждении Правил технической эксплуатации систем питьевого водоснабжения и водоотведения (канализации) населенных пунктов : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 04.09.2019 № 594 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21900594> (дата обращения: 12.05.2025).
6. Об утверждении экологических норм и правил: постановление М-ва природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 18 июля 2017 г. № 5-Т // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21732307p> (дата обращения: 12.05.2025).
7. О некоторых вопросах нормирования сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод : постановление М-ва природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 26.05.2025 № 16 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21732141> (дата обращения: 12.05.2025).
8. Об утверждении экологических норм и правил : постановление М-ва природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 21 сентября 2021 г. № 8-Т // ЭТАПОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2025.
9. Об утверждении экологических норм и правил: постановление М-ва природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 15 декабря 2023 г. № 15-Т // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22441063p> (дата обращения: 12.05.2025).
10. Канализация. Наружные сети и сооружения вод. Строительные нормы Республики Беларусь : СН 4.01.02-2019. – Введ. 31.10.19 (с отменой ТКП 45-4.01-321-2018 (33020)). – Минск : Минстройархитектуры, 2024. – 86 с.
11. Классификация очистных сооружений сточных вод. Стандарт Госстандарта : СТБ 17.06.02-03-2015. – Введ. 01.12.15. – Минск : Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2015. – 32 с.
12. Очистные сооружения сточных вод. Строительные правила Республики Беларусь : СП 4.01.10-2025. – Введ. 10.02.25 (с отменой П1-2019 к ТКП 45-4.01-321-2018). – Минск : Минстройархитектуры, 2025. – 129 с.
13. 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.
14. Ахмадиева, Ю. И. Анализ подходов к внедрению наилучших доступных технологий по очистке сточных вод в Республике Беларусь и зарубежных странах / Ю. И. Ахмадиева, С. А. Дубенок // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Гомель, 2–3 июня 2022 г. / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол. : А. П. Гусев [и др.]. – Гомель, 2022. – С. 113–117.
15. Ахмадиева, Ю. И. Состояние и перспективы развития наилучших доступных технических методов в области очистки сточных вод населенных пунктов Республики Беларусь / Ю. И. Ахмадиева, С. А. Дубенок // Импортзамещение, научно-техническая и экономическая безопасность : сборник материалов V Международной научно-технической конференции «Минские научные чтения–2022», Минск, 7–9 декабря 2022 г. : в 3 т. – Минск : БГТУ, 2022. – Т. 3. – С. 28.
16. 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. / Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. О. Китикова. – Минск : БГТУ, 2024. – 300 с.
17. 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 Международной научно-технической конференции, Минск, 17–18 октября 2024 г. / БНТУ ; редкол. : С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2024. – С. 139–146.
18. 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.
19. Автоматизация технологических процессов очистки сточных вод на примере Минской очистной станции УП «Минскводоканал» / В. В. Иванович, А. Г. Гуранчик, О. С. Дубовик, В. Н. Ануфриев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2024. – № 2. – С. 12.
20. Реконструкция воздушной станции на очистных сооружениях г. Читы / А. Н. Ядрищенский, Н. Н. Филиппова, К. А. Булыгин [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2019. – № 10. – С. 50.
21. Шекета, А. Н. Комплексная система оптимизации технологических процессов аэробной биологической очистки сточных вод : дис. ... канд. техн. наук : 03.00.23 / А. Н. Шекета. – Щелково, 2008. – 208 л.
22. Устюжанин, А. В. Разработка энергосберегающей технологии управляемой подачи воздуха для систем аэрации биологических очистных сооружений : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / А. В. Устюжанин. – М., 2021. – 218 л.
23. Фоменкова, А. А. Модельно-алгоритмическое обеспечение мониторинга состояния систем анаэробной биологической очистки сточных вод : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / А. А. Фоменкова. – Санкт-Петербург, 2022. – 227 л.
24. Конон, О. А. Основные направления решения проблемы безопасной подготовки к использованию осадков очистных сооружений канализации / О. А. Конон, В. Н. Марцуп, Ю. И. Ахмадиева // Новые методы и технологии обращения с отходами. Органическая часть коммунальных отходов : сборник трудов / Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси. – Минск : БГТУ, 2021. – С. 77.
25. Об установлении нормативных сроков службы основных средств и признании утратившими силу некоторых постановлений Министерства экономики Республики Беларусь : постановление Министерства экономики Респ. Беларусь от 30.09.2011 № 161 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W21124359> (дата обращения: 12.05.2025).

References

1. Ahmadiyeva, YU. I. Reestr kommunal'nyh ochistnyh sooruzhenij stochnyh vod kak osnova dlya formirovaniya nailuchshih dostupnyh tekhnicheskikh metodov ochistki stochnyh vod naselennykh punktov / YU. I. Ahmadiyeva, S. A. Dubenok // Aktual'nye voprosy effektivnogo i kompleksnogo ispol'zovaniya vodnykh resursov : sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, priurochennoj ko Vsemirnomu dnyu vodnykh resursov, Minsk, 22–24 marta 2023 g. / Nacional'naya biblioteka Belarusi. – Minsk, 2023. – С. 127.

2. O Gosudarstvennoj programme «Komfortnoe zhil'e i blagopriyatnaya sreda» na 2021–2025 gody: 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: 12.05.2025).
3. Sostav i poryadok razrabotki predproektnoj (predynvesticionnoj) dokumentacii. Stroitel'nye pravila Respubliki Belarus' : SP 1.02.01-2023. – Vved. 23.05.23 (s otnemoj TKP 45-1.02-298-2014 (02250)). – Minsk : Minstrojarkhitektury, 2023. – 75 s.
4. Ob utverzhdenii Pravil pol'zovaniya centralizovannymi sistemami vodosnabzheniya, vodootvedeniya (kanalizacii) v naselennykh punktakh : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus' ot 30.09.2016 № 788 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600788> (data obrashcheniya: 12.05.2025).
5. Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoy ekspluatatsii sistem pit'evogo vodosnabzheniya i vodootvedeniya (kanalizacii) naselennykh punktov : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus' ot 04.09.2019 № 594 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21900594> (data obrashcheniya: 12.05.2025).
6. Ob utverzhdenii ekologicheskikh norm i pravil: postanovlenie M-va prirod. resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus' ot 18 iyulya 2017 g. № 5-T // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21732307p> (data obrashcheniya: 12.05.2025).
7. O nekotorykh voprosakh normirovaniya sbrosov himicheskikh i inyh veshchestv v sostave stochnykh vod : postanovlenie M-va prirod. resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus' ot 26.05.2025 № 16 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21732141> (data obrashcheniya: 12.05.2025).
8. Ob utverzhdenii ekologicheskikh norm i pravil : postanovlenie M-va prirod. resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus' ot 21 sentyabrya 2021 g. № 8-T // ETALON. Zakonodatel'stvo Respubliki Belarus' / Nac. centr pravovoj inform. Resp. Belarus'. – Minsk, 2025.
9. Ob utverzhdenii ekologicheskikh norm i pravil: postanovlenie M-va prirod. resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus' ot 15 dekabrya 2023 g. № 15-T // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22441063p> (data obrashcheniya: 12.05.2025).
10. Kanalizatsiya. Naruzhnye seti i sooruzheniya vod. Stroitel'nye normy Respubliki Belarus' : SN 4.01.02-2019. – Vved. 31.10.19 (s otnemoj TKP 45-4.01-321-2018 (33020)). – Minsk : Minstrojarkhitektury, 2024. – 86 s.
11. Klassifikatsiya ochistnykh sooruzhenij stochnykh vod. Standart Gosstandarta : STB 17.06.02-03-2015. – Vved. 01.12.15. – Minsk : Gosudarstvennyj komitet po standartizatsii Respubliki Belarus', 2015. – 32 s.
12. Ochistnye sooruzheniya stochnykh vod. Stroitel'nye pravila Respubliki Belarus' : SP 4.01.10-2025. – Vved. 10.02.25 (s otnemoj P1-2019 k TKP 45-4.01-321-2018). – Minsk : Minstrojarkhitektury, 2025. – 129 s.
13. Ahmadiyeva, YU. I. Vybory tekhnologicheskikh reshenij pri stroitel'stve i rekonstrukcii ochistnykh sooruzhenij stochnykh vod naselennykh punktov / YU. I. Ahmadiyeva, S. A. Dubenok // Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya. – 2022. – № 4. – S. 97–107.
14. Ahmadiyeva, YU. I. Analiz podhodov k vnedreniyu nailuchshih dostupnykh tekhnologij po ochistke stochnykh vod v Respublike Belarus' i zarubezhnykh stranah / YU. I. Ahmadiyeva, S. A. Dubenok // Transgranichnoe sotrudnichestvo v oblasti ekologicheskoy bezopasnosti i ohrany okruzhayushchej sredy: sbornik materialov VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Gomel', 2–3 iyunya 2022 g. / Gomel'skij gos. un-t im. F. Skoriny ; redkol. : A. P. Gusev [i dr.]. – Gomel', 2022. – S. 113–117.
15. Ahmadiyeva, YU. I. Sostoyanie i perspektivy razvitiya nailuchshih dostupnykh tekhnicheskikh metodov v oblasti ochistki stochnykh vod naselennykh punktov Respubliki Belarus' / YU. I. Ahmadiyeva, S. A. Dubenok // Importozameshchenie, nauchno-tekhnicheskaya i ekonomicheskaya bezopasnost' : sbornik materialov V Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Minskie nauchnye chteniya–2022», Minsk, 7–9 dekabrya 2022 g. : v 3 t. – Minsk : BGTU, 2022. – T. 3. – S. 28.
16. Ahmadiyeva, YU. I. Konceptsiya nailuchshih dostupnykh tekhnologij i tekhnologicheskoe normirovanie sbrosov stochnykh vod na primere Rossijskoj Federacii / YU. I. Ahmadiyeva, S. A. Dubenok // Nauchno-tekhnicheskij progress v zhilishchno-kommunal'nom hozyajstve: sb. tr. / Institut zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva NAN Belarusi; pod obshch. red. d-ra tekhn. nauk, prof. V. O. Kitikova. – Minsk : BGTU, 2024. – 300 s.
17. Ahmadiyeva, YU. I. Sravnitel'nyj analiz podhodov k klassifikacii ochistnykh sooruzhenij stochnykh vod naselennykh punktov v Respublike Belarus' i Rossijskoj Federacii / YU. I. Ahmadiyeva, S. A. Dubenok // Innovacionnye tekhnologii v vodnom, kommunal'nom hozyajstve i vodnom transporte: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Minsk, 17–18 oktyabrya 2024 g. / BNTU ; redkol. : S. V. Haritonchik [i dr.]. – Minsk, 2024. – S. 139–146.
18. Ahmadiyeva, YU. I. Ocenka primenimosti tekhnologicheskikh pokazatelej nailuchshih dostupnykh tekhnologij na ochistnykh sooruzheniyah smeshannykh (gorodskih) stochnykh vod v usloviyah Belarusi / YU. I. Ahmadiyeva, S. A. Dubenok // Prirodnye resursy. – 2025. – № 1. – S. 69–78.
19. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh processov ochistki stochnykh vod na primere Minskoj ochistnoy stancii UP «Minskvodokanal» / V. V. Ivanovich, A. G. Guranchik, O. S. Dubovik, V. N. Anufriev // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – 2024. – № 2. – S. 12.
20. Rekonstruktsiya vozdukhoduvnoj stancii na ochistnykh sooruzheniyah g. Chity / A. N. Yadrishchenskij, N. N. Filippova, K. A. Bulygin [i dr.] // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – 2019. – № 10. – S. 50.
21. Sheketa, A. N. Kompleksnaya sistema optimizatsii tekhnologicheskikh processov aerobnoj biologicheskoy ochistki stochnykh vod : dis. ... kand. tekhn. nauk : 03.00.23 / A. N. Sheketa. – SHCHelkovo, 2008. – 208 l.
22. Ustyuzhanin, A. V. Razrabotka energosberegayushchej tekhnologii upravlyayemoj podachi vozduha dlya sistem aeratsii biologicheskikh ochistnykh sooruzhenij : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.04 / A. V. Ustyuzhanin. – M., 2021. – 218 l.
23. Fomenkova, A. A. Model'no-algoritmicheskoe obespechenie monitoringa sostoyaniya sistem anaerobnoj biologicheskoy ochistki stochnykh vod : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.04 / A. A. Fomenkova. – Sankt-Peterburg, 2022. – 227 l.
24. Konon, O. A. Osnovnye napravleniya resheniya problemy bezopasnoj podgotovki k ispol'zovaniyu osadkov ochistnykh sooruzhenij kanalizacii / O. A. Konon, V. N. Marcul', YU. I. Ahmadiyeva // Novye metody i tekhnologii obrashcheniya s othodami. Organicheskaya chast' kommunal'nykh othodov : sbornik trudov / Institut zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva NAN Belarusi. – Minsk : BGTU, 2021. – S. 77.
25. Ob ustanovlenii normativnykh srokov sluzhby osnovnykh sredstv i priznanii utrativshimi silu nekotorykh postanovlenij Ministerstva ekonomiki Respubliki Belarus' : postanovlenie Ministerstva ekonomiki Resp. Belarus' ot 30.09.2011 № 161 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W21124359> (data obrashcheniya: 12.05.2025).

Материал поступил 21.05.2025, одобрен 25.05.2025, принят к публикации 25.05.2025

ПРЕИМУЩЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРА И ДИСПЕРСНОСТИ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ВОДЕ

А. А. Волчек¹, Г. О. Наумчик², В. С. Белов³

¹ Д. г. н. РФ и РБ, профессор, профессор кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

² К. т. н., доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gonaumchik@bstu.by

³ Аспирант, УО «Брестский государственный технический университет», инженер-проектировщик, ЧУП «Сифания-экотехника», Брест, Беларусь, e-mail: belovadim@mail.ru

Реферат

В статье показана актуальность изучения характеристик газовых пузырьков, образующихся при аэрации, озонировании или других способах подачи газа в жидкость, и рассмотрены существующие оптические и физико-технические методы измерения размеров газовых пузырьков в воде и анализа их дисперсности. Приведены достоинства и недостатки каждого метода.

Акцентировано внимание на двух методиках анализа фотографий для определения дисперсности пузырьков газа. Одна методика позволяет осуществлять полуавтоматический анализ фотографий, т. е. обработка фотографий делается вручную, а компьютерная программа производит математическую обработку полученных результатов. Другая методика выполняет полностью автоматизированную обработку фотографий при помощи искусственного интеллекта и математический анализ полученных результатов.

Подробно описан алгоритм полуавтоматического определения дисперсности сфотографированных пузырьков газа, образующихся в баке с прозрачной стенкой, заполненном водой, при помощи компьютерной программы Revit. Описаны преимущества данной компьютерной программы в сравнении с другими программами.

Показана возможность использования более продвинутых алгоритмов автоматического распознавания контура пузырьков на снимке при помощи искусственного интеллекта и автоматический подсчет их количества, величины и диаметра. Приведена схема, на которой показана конструкция специального приспособления, позволяющего реализовать автоматическое распознавание и анализ дисперсности пузырьков газа. Показаны достоинства и недостатки полностью автоматизированной методики обработки фотографий.

Обоснован выбор оптического метода фотоанализа с использованием полуавтоматического определения дисперсности пузырьков газа с целью оценки эффективности работы диспергатора. Разработана конструкция экспериментальной установки для анализа дисперсности газовых пузырьков, образующихся при помощи различных видов диспергаторов. Приведена схема экспериментальной установки.

Ключевые слова: дисперсность газовых пузырьков, диспергатор, пузырьки, газо-жидкостная дисперсия.

ADVANTAGES OF OPTICAL METHODS OF MEASURING THE SIZE AND DISPERSION OF GAS BUBBLES IN WATER

A. A. Volchak, G. O. Naumchik, V. S. Belov

Abstract

The article shows the relevance of studying the characteristics of gas bubbles formed during aeration, ozonation or other methods of feeding gas into a liquid and considers existing optical and physical-technical methods for measuring the size of gas bubbles in water and analyzing their dispersion. The advantages and disadvantages of each method are given. Attention is focused on two methods of analyzing photographs to determine the dispersion of gas bubbles. One method allows for semi-automatic analysis of photographs, i. e., photo processing is done manually, and a computer program performs mathematical processing of the results obtained. The other method performs fully automated processing of photographs using artificial intelligence and mathematical analysis of the results obtained. An algorithm for semi-automatic determination of the dispersion of photographed gas bubbles formed in a tank with a transparent wall filled with water, using the Revit computer program, is described in detail. The advantages of this computer program in comparison with other programs are described. The possibility of using more advanced algorithms for automatic recognition of bubble contours in a photograph using artificial intelligence and automatic counting of their number, size and diameter is shown. A diagram is given showing the design of a special device that allows for automatic recognition and analysis of gas bubble dispersion. The advantages and disadvantages of a fully automated photo processing technique are shown. The choice of an optical photoanalysis method using semi-automatic determination of gas bubble dispersion is substantiated in order to assess the efficiency of the disperser. An experimental setup has been developed to analyze the dispersion of gas bubbles formed using various types of dispersers. A diagram of the experimental setup is given.

Keywords: dispersion of gas bubbles, dispersant, bubbles, gas-liquid dispersion.

Введение

Изучение характеристик газовых пузырьков, образующихся при аэрации, озонировании или других способах подачи газа в жидкость, является востребованной задачей при определении эффективности работы таких устройств, как аэраторы, барботеры, эжекторы и диспергаторы [1–5]. Размер пузырьков и их дисперсность (распределение по размерам) существенно влияют на эффективность фазового взаимодействия, т. е. эффективность растворения газа в жидкости. Чем мельче размер пузырьков, тем больше их суммарная площадь поверхности соприкосновения с водной фазой, а следовательно, выше эффективность растворения газа. Это особенно важно при введении такого дорогостоящего газа, как озон [1, 2, 6].

Газожидкостные системы активно используются в различных отраслях промышленности и экологии: в системах биологической очистки сточных вод, при озонировании питьевой воды, во флотаторных установках, а также в химических и фармацевтических реакторах [3–9]. Основным показателем эффективности таких систем является коэффициент массопереноса, который напрямую зависит от площади межфазной поверхности – величины, обратно пропорциональной размеру пузырьков [9–12]. Чем меньше диаметр пузырьков, тем больше суммарная площадь контакта и, следовательно, тем эффективнее процесс [13, 14].

Измерение характеристик пузырьков, таких как размер, форма, скорость всплытия, объемное распределение и устойчивость, требует применения специализированных методов.

Методы измерения можно классифицировать следующим образом:

- **оптические методы:** включают фото и видеосъёмку (фотоанализ), лазерную дифракцию, голографическую визуализацию;
- **физико-технические методы:** ультразвуковой метод, методы на основе электропроводности, измерение диэлектрической проницаемости.

Метод лазерной дифракции заключается в следующем: луч лазера проходит через поток пузырьков и на экране или датчиках регистрируется дифракционная картина. Распределение интенсивности света интерпретируется как распределение размеров пузырьков. Данный метод имеет высокую точность с возможностью определения диаметров пузырьков до 10 мкм и высокую скорость обработки данных, однако оборудование, используемое в данном методе, имеет очень высокую стоимость и целесообразно к применению в только в крупных промышленных технологических процессах [15].

Метод ультразвукового зондирования основан на отражении ультразвуковой волны от поверхности пузырьков. По изменению характеристик сигнала (амплитуда, фаза, рассеяние) можно оценить размеры и концентрацию пузырьков. К преимуществам данного метода можно отнести то, что он применим для исследований в мутной воде, однако из-за сложности интерпретации данных точность данного метода невысока [16].

Определение размера пузырьков по изменению проводимости основан на изменении электрической проводимости воды при прохождении через нее газовых пузырьков. Измеряя флуктуации сопротивления, можно оценить частоту и размер пузырьков. Как и в случае с ультразвуковым методом, точность данного типа измерений низкая [17].

В оптическом методе пузырьки фиксируются на фото или видео через прозрачную стенку резервуара. Полученные изображения обрабатываются программным обеспечением для расчёта геометрических параметров пузырьков.

Таким образом, для лабораторных исследований наиболее предпочтительным является оптический метод фотоанализа, поскольку относительно прост в аппаратном исполнении, обладает высокой точностью, имеет возможность объективного контроля из-

мерений и относительно легко поддается автоматизации. В представленной статье акцент будет сделан на данном методе.

Оптический метод фотоанализа при исследовании размера и дисперсности газовых пузырьков в воде проводится путем съёмки газожидкостного факела через прозрачную стенку сосуда или камеры. Съёмка ведется в течение определённого времени при стабильном режиме подачи газа. Камера фиксирует изображения пузырьков в проходящем или отражённом свете [17]. Важно обеспечить строго перпендикулярное расположение объектива относительно наблюдаемой плоскости для снижения искажений. На передней прозрачной стенке, а также на задней стенке сосуда нанесена калибровочная линейка для возможности масштабирования изображения.

Съёмка производится на высокоскоростную видеокамеру с частотой кадров не менее 120 fps, в разрешении 1280x800, с объективом с макрофокусировкой (50–100 мм) либо на фотоаппарат с разрешением не менее 40 Мп. После получения серии кадров следует этап их обработки и извлечения информации при помощи современного программного обеспечения. Данный процесс может быть организован двумя различными методами, которые можно назвать как метод № 1 «полуавтоматический» и метод № 2 «полностью автоматизированный». У обоих способов есть как свои достоинства, так и недостатки.

Метод № 1 основан на получении фотоснимком при помощи фотоаппарата с высоким разрешением. Большое разрешение фотоснимков позволяет с приемлемым качеством произвести цифровое увеличение изображения и произвести непосредственный подсчет элементов размерами до 0,1 мм. Алгоритм определения следующий: на прозрачной стенке бака располагается маркер (калибровочная линейка) известных размеров, далее включается оборудование для подачи воздуха, в баке образуется газо-жидкостная дисперсия, которая фотографируется. Полученные изображения загружаются в программный комплекс САПР типа AutoCAD, Revit и т. д., в котором есть функции параметризации элементов и автоматического подсчета количества элементов по определённым параметрам (рисунок 1). В описываемом ниже примере было использовано программное обеспечение Revit [18].

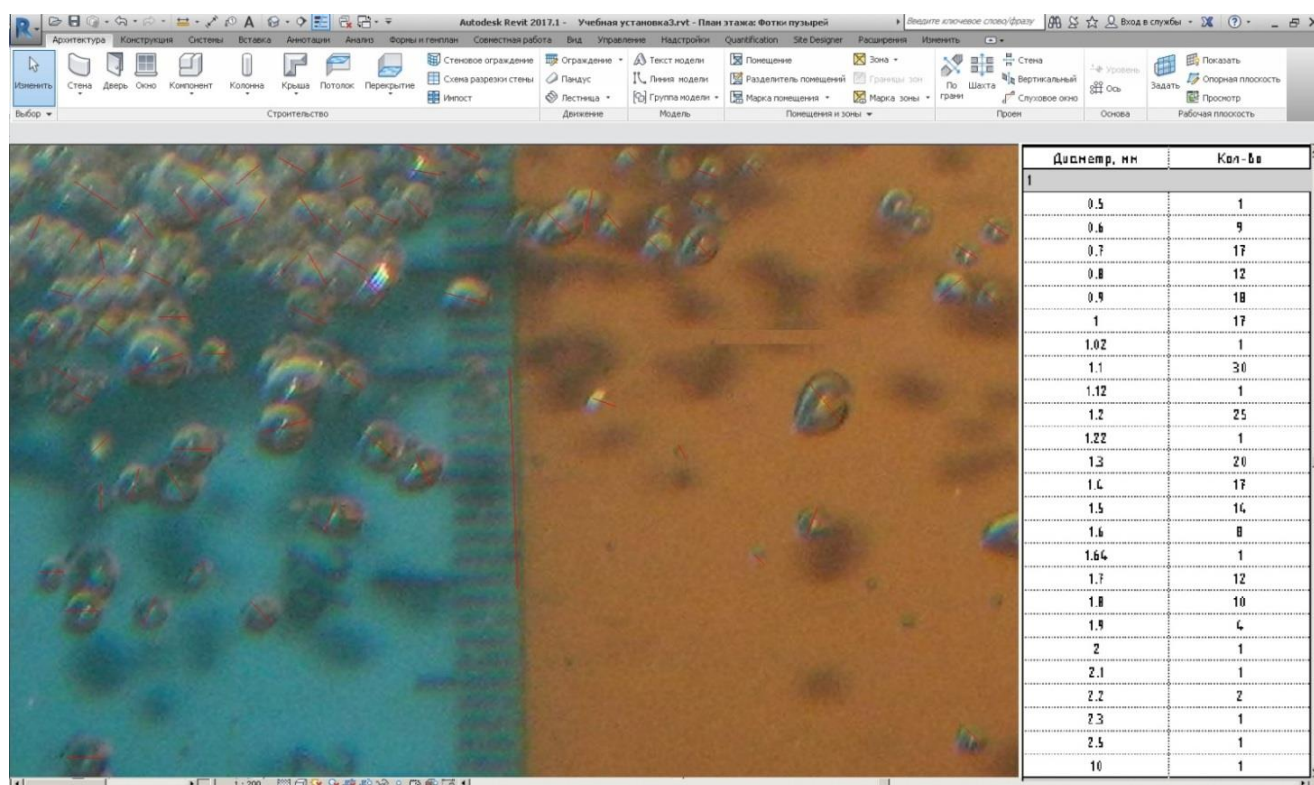


Рисунок 1 – Фрагмент фотоснимка, использованного для определения среднего диаметра пузыря с помощью программного комплекса Revit

После загрузки полученных фотоснимков в программу Revit изображения масштабируются в соответствии с известными размерами маркера. Таким образом, мы получаем изображения в масштабе 1:1, которые затем увеличиваются в тысячу раз. Далее в программном комплексе Revit создается параметрический элемент, представляющий из себя линию или окружность, отстраиваемую пользователем по двум произвольным точкам. Параметризация данного элемента заключается в том, что фактическая длина или диаметр построенной линии автоматически рассчитывается и фиксируется в «ячейке памяти» программы. После этого необходимо отметить достаточное количество видимых пузырей данными линиями [18]. Тут следует сказать, что у этого метода есть неоспоримое преимущество, заключающееся в том, что анализ фотографии проводится человеком, который в отличие от машинного зрения намного лучше может распознать пузыри при их перекрытии друг другом. Даже при большом увеличении фотографии остается возможность определить несколько пузырей перекрывающих друг друга и отметить их как отдельные элементы, а не как один общий элемент с большим диаметром [18].

Программа Revit обладает возможностью автоматического подсчета количества элементов, расположенных в проекте, а так-

же их сортировки по различным параметрам. В данном случае этим параметром является «длина линии». Следующий шаг – это настройка режима автоматического подсчета элементов линий, которые можно назвать «эквивалентами диаметра», размещенных на каждом отмеченном пузыре, сортировка их по длине, а также автоматический пересчет длин с учетом масштабирования изображения в тысячу раз. В итоге становится доступна информация обо всех диаметрах отмеченных пузырей, что дает возможность рассчитать средний диаметр пузыря, выдаваемый барботером или диспергатором. Количество отмечаемых пузырей на каждом изображении зависит от усердия исследователя, но очевидно должно составлять не менее нескольких сотен для получения более точного среднего значения.

Метод № 2 основан на использовании более продвинутых алгоритмов автоматического распознавания контура пузырьков на снимке и автоматический подсчет их количества и величины диаметра. Для реализации данного метода требуется создание специального приспособления, в состав которого входит трубка-пробоотборник, экран с подсветкой и камера для съемки в высоком разрешении. Конструкция данного приспособления приведена на рисунке 2.

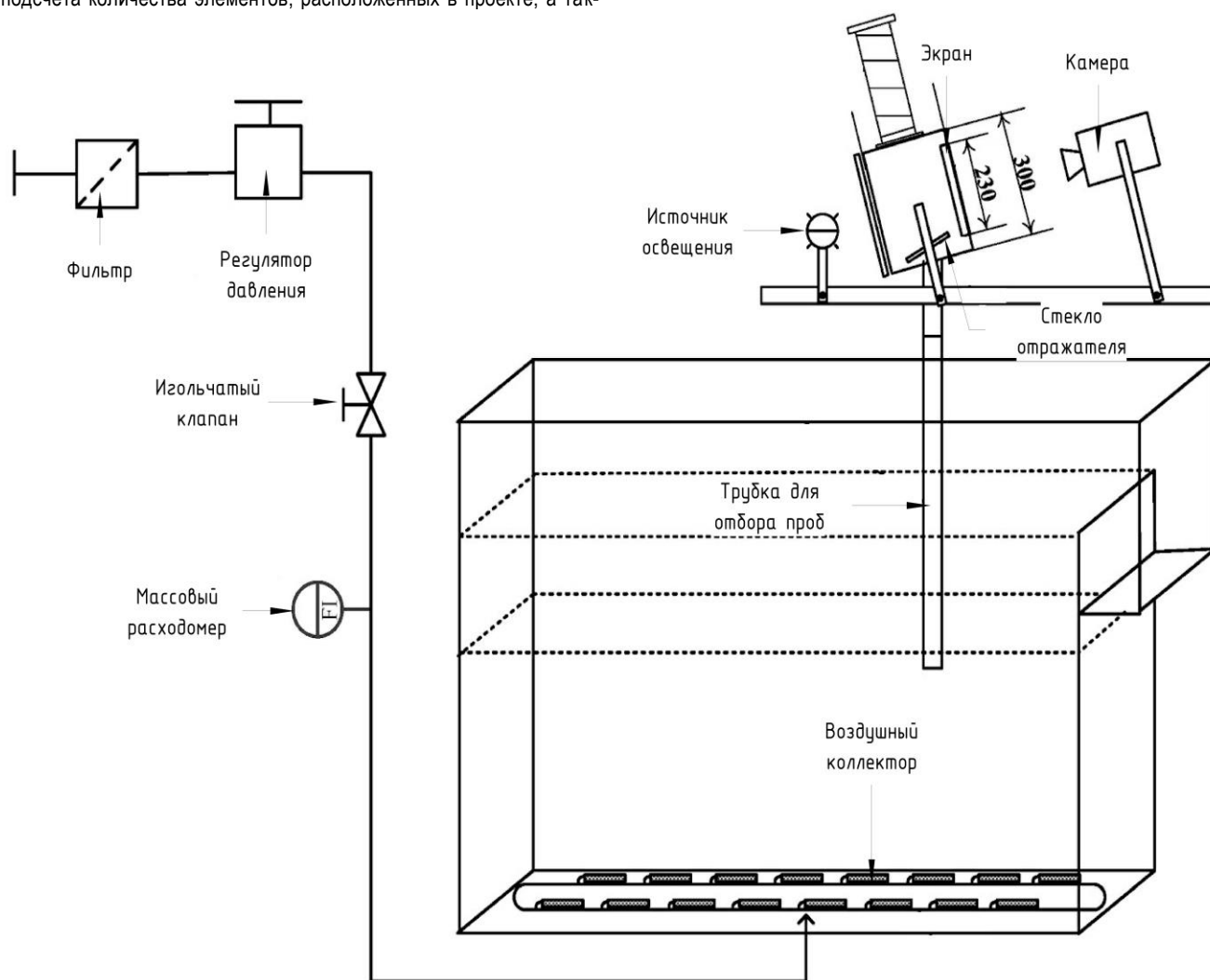


Рисунок 2 – Установка анализатора размера пузырьков Макгилла

Измерение размера пузырьков основано на принципах McGillBubbleSizer [19], который состоит из пробоотборной трубки, прикрепленной к наклонной смотровой камере. Трубка-пробоотборник погружается во флотационную камеру на определенный уровень для захвата отдельных пузырьков. Пузырьки поднимаются из флотационной камеры в трубку и в смотровую камеру, где

они распространяются по наклонной смотровой панели с подсветкой в один слой. Здесь они фотографируются с помощью цифровой видеокамеры.

В качестве подсветки рекомендуется использовать LED-экран с рассеивателем. Равномерная подсветка нужна для освещения пузырьков в жидкости с целью создания высококонтрастного изоб-

ражения. Условия освещения подбираются таким образом, чтобы обеспечить минимальное искажение формы пузырька, хорошую фокусировку и минимальное влияние отражений [19].

Следующим этапом является машинный анализ изображения на предмет геометрических характеристик пузырьков. Для этого используется специализированное программное обеспечение, например, ImageJ, MATLAB или Python с библиотеками OpenC. Полученные изображения подвергаются следующим процессам программной обработки:

- Предобработка изображений – включает коррекцию яркости, контрастности, шумоподавление и приведение изображения к серому уровню. Цель – выделить пузырьки на фоне, повысив качество последующего бинарного разделения.

- Бинаризация – преобразование изображения в чёрно-белое по порогу яркости, с целью выделения пузырьков в виде объектов (контуров) на однородном фоне. Используются методы глобального или адаптивного порогового преобразования, такие, как метод Канни или Sobel.

- Фильтрация объектов – на этом этапе отбрасываются шумовые объекты и артефакты, не соответствующие критериям формы и размера. Например, можно исключить объекты с площадью менее заданного значения или с аномальными значениями отношения периметра к площади (характерные для несферических образований).

- Измерение параметров пузырьков – рассчитываются следующие характеристики: эквивалентный диаметр (по площади), круглотность, площадь, периметр, координаты центра масс и др. Для каждого кадра формируется массив данных, содержащий информацию по всем обнаруженным пузырькам.

- Анализ дисперсности – полученные значения диаметра пузырьков агрегируются по частоте и представляются в виде гистограммы распределения. На основе гистограммы определяются основные статистические показатели: средний диаметр, медиана, мода, стандартное отклонение и коэффициент вариации. Возможно также представление результатов в виде функции плотности распределения или кумулятивной кривой.

Заключение

Безусловно можно сказать, что исследования, проводимые по методу № 2, являются более современными в части автоматизации обработки изображений. При этом следует отметить, что процесс машинной обработки изображений непрерывно совершенствуется. Одним из путей улучшения является использование методов обработки данных с использованием нейронных сетей [20]. Применение нейронных сетей позволяет получить более точные результаты вычислений за меньший промежуток времени, с использованием стандартных компьютерных мощностей. Однако использование этого метода требует создания более сложной конструкции испытательного стенда, а также наличия квалифицированных разработчиков и пользователей профильного программного обеспечения для компьютерной обработки фотоснимков, что в свою очередь является серьезным сдерживающим фактором для лабораторий, располагающих ограниченным финансированием. При этом наиболее важным фактором является то, что исследование размера пузырьков в данном методе является не во всем объеме газожидкостного факела, а только на небольшой выборке пузырей, которые попадают в трубку пробоотборник. Также одним из существенных минусов этого метода является то, что алгоритмы могут относительно точно подсчитывать средний диаметр пузыря при его форме, стремящейся к правильному шару или с небольшой эллиптичностью, однако при произвольной форме пузыря величина погрешности в расчетах резко увеличивается [20].

Работы по преодолению этого препятствия ведутся различными группами исследователей в Российской Федерации и за рубежом. Для точного распознавания пузырей произвольной формы нейронная сеть должна пройти обучение на тысячах или десятках тысяч исходных фотографий, точные данные по которым есть в распоряжении отладчиков нейронной сети. Это нужно для того, чтобы, сопоставляя заранее известные точные данные с данными, предоставленными нейронной сетью, иметь возможность указать ей на ее ошибки и вывести программный алгоритм на такой уровень, при котором она перестанет совершать эти ошибки. Как правило, специ-

алисты такого класса, которые обладают необходимыми компетенциями по программированию нейронных сетей и их обучению на столь высоком уровне, сосредоточены в крупных научных центрах или больших корпорациях, занимающихся разработкой передового программного обеспечения. Одним словом, это направление в изучении характеристик динамических газожидкостных систем является весьма перспективным, но требует наличия узкоспециализированных специалистов в области программирования нейронных сетей.

Таким образом, авторы статьи считают, что методика № 1 также является весьма актуальным способом изучения гидродинамических характеристик оборудования для получения газожидкостных систем. Неоспоримым преимуществом указанного метода является то, что получение данных о размере пузырьков производится без использования сложного и дорогостоящего программного обеспечения и основано на программном обеспечении, имеющемся в широком доступе. Также данный метод позволяет производить исследование газожидкостного факела по всему его объему, в том числе и в точке выхода пузырьков из азратора.

К минусам данного метода можно отнести то, что при съемке газожидкостного факела в объеме неизбежно будет возникать оптическое искажение пузырей, находящихся дальше от плоскости съемки. Данную погрешность в представленном методе удается частично компенсировать масштабированием изображения по двум калибровочным линейкам, которые находятся на внешней и внутренней стенке резервуара. Также следует отметить, что в этом методе имеется потенциальный изъян в виде небрежной работы исследователя при расстановке маркеров, при помощи которых ведется вычисление диаметра пузыря.

Исходя из всего вышесказанного, считаем, что применение метода № 1 при изучении размера пузырьков в турбулентных газожидкостных системах, при наличии ограниченного бюджета на создание испытательного стенда и разработку специализированного программного обеспечения, вполне оправдано.

Список цитированных источников

1. Перепелкин, К. Е. Газовые эмульсии / К. Е. Перепелкин, В. С. Матвеев. – Л.: Химия, 1979. – 164 с.
2. Золотов, А. В. Способы получения газовой дисперсии в объеме жидкости / А. В. Золотов, И. С. Багреева // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2017. – № 1. – С. 18–22.
3. Ксенофонтов, Б. С. Использование процессов струйной азрации в процессах флотационной очистки сточных вод / Б. С. Ксенофонтов // Сантехника. – 2022. – № 6. – С. 32–37.
4. Анопольский, В. Н. Применение напорной флотации в технологии очистки природных и сточных вод / В. Н. Анопольский, Г. Н. Фелдштейн, Е. Г. Фельдштейн // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2008. – № 8 (8). – С. 38–44.
5. Жерноклев, А. К. Аэрация и озонирование в процессах очистки воды / А. К. Жерноклев, Л. П. Пилиневич, В. В. Савич. – Минск: Тонпик, 2002. – 129 с.
6. Пенная сепарация и колонная флотация / Ю. Б. Рубинштейн, В. И. Мелик-Гайказян, Н. В. Матвеев, С. Б. Леонов. – М.: Недра, 1989. – 304 с.
7. Ксенофонтов, Б. С. Повышение эффективности струйной азрации в процессах флотационной очистки сточных вод / Б. С. Ксенофонтов // Сантехника. – 2020. – № 4. – С. 36–39.
8. Ксенофонтов, Б. С. Интенсификация флотационной очистки сточных вод с использованием струйных азраторов и эжекторов / Б. С. Ксенофонтов, Е. С. Стельмах // Водоочистка. – 2018. – № 6. – С. 25–35.
9. Мещеряков, Н. Ф. Флотационные машины и аппараты / Н. Ф. Мещеряков. – М.: Недра, 1982. – 200 с.
10. Белов, С. Г. Пневмогидравлический диспергатор газа «Торнадо» / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик, Е. И. Дмухайло // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: материалы IV Междуна. науч.-практ. конф., Брест, 25–27 сент. 2013 г. / Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: А. А. Волчек [и др.]. – Брест, 2013. – С. 7–12.

11. Наумчик, Г. О. Разработка метода диспергирования газа с помощью турбулентного потока жидкости на границе пористой стенки / Г. О. Наумчик, В. С. Белов // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2017. – № 2. – С. 102–105.
12. Пневмогидравлический диспергатор газа : пат. BY 12838 / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик. – Оpubl. 28.02.2022.
13. Антонова, Е. С. Определение режима работы эжекционной флотационной установки для очистки сточных вод / Е. С. Антонова, В. О. Карпикова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 4. – С. 400–421. – URL: <https://journals.rudn.ru/ecology/article/view/42522/24408> (дата обращения: 11.06.2025).
14. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Физматгиз, 1959. – 699 с.: ил.
15. Grau, R. A. Visual technique for measuring bubble size in flotation machines / R. A. Grau, K. Heiskanen // Minerals Engineering. – 2002. – Vol. 15. – P. 507–513.
16. Акопян, В. Б. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами / В. Б. Акопян, Ю. А. Ершов; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. – М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2005. – 223 с.
17. Глембоцкий, В. А. Флотация : учебник для вузов по специальности «Обогащение полезных ископаемых» / В. А. Глембоцкий, В. И. Классен. – М.: Недра, 1973. – 384 с.
18. Белов, В. С. Разработка устройства для получения мелкой газожидкостной дисперсии гидродинамическим методом : дис. ... магистра техн. наук : 1–70 80 01 / Белов Вадим Сергеевич; Брестский государственный технический университет. – Брест, 2017. – 52 л.
19. Gas Dispersion Measurements McGill Bubble Viewer // McGill University. – URL: <https://www.mcgill.ca/minpro/our-laboratory/beneficiation-laboratory/gas-dispersion-measurements> (date of access: 11.06.2025).
20. Poletaev, I. Bubble patterns recognition using neural networks: Application to the analysis of a two-phase bubbly jet / I. Poletaev, M. P. Tokarev, K. S. Pervunin // International Journal of Multiphase Flow. – 2020. – Vol. 126. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301932219305701#bbib45> (date of access: 11.06.2025).
6. Pennaya separaciya i kolonnaya flotaciya / YU. B. Rubinshtejn, V. I. Melik-Gajkazyan, N. V. Matveenko, S. B. Leonov. – М.: Nedra, 1989. – 304 s.
7. Ksenofontov, B. S. Povyshenie effektivnosti strujnoj aeracii v processah flotacionnoj oчитstki stochnyh vod / B. S. Ksenofontov // Santechnika. – 2020. – № 4. – С. 36–39.
8. Ksenofontov, B. S. Intensifikaciya flotacionnoj oчитstki stochnyh vod s ispol'zovaniem strujnyh aeratorov i ezhektorov / B. S. Ksenofontov, E. S. Stel'mah // Vodooчistka. – 2018. – № 6. – С. 25–35.
9. Meshcheryakov, N. F. Flotacionnye mashiny i apparaty / N. F. Meshcheryakov. – М.: Nedra, 1982. – 200 s.
10. Belov, S. G. Pnevmoгидравлический диспергатор газа «Tornado» / S. G. Belov, G. O. Naumchik, E. I. Dmuhajlo // Aktual'nye nauchno-tekhnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya : materialy IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 25–27 sent. 2013 g. / Brest. gos. tekhn. un-t; redkol.: A. A. Volchek [i dr.]. – Brest, 2013. – S. 7–12.
11. Наумчик, Г. О. Разработка метода диспергирования газа с помощью турбулентного потока жидкости на границе пористой стенки / Г. О. Наумчик, В. С. Белов // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2017. – № 2. – С. 102–105.
12. Пневмогидравлический диспергатор газа : пат. BY 12838 / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик. – Оpubl. 28.02.2022.
13. Антонова, Е. С. Определение режима работы эжекционной флотационной установки для очистки сточных вод / Е. С. Антонова, В. О. Карпикова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 4. – С. 400–421. – URL: <https://journals.rudn.ru/ecology/article/view/42522/24408> (дата обращения: 11.06.2025).
14. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Физматгиз, 1959. – 699 с.: ил.
15. Grau, R. A. Visual technique for measuring bubble size in flotation machines / R. A. Grau, K. Heiskanen // Minerals Engineering. – 2002. – Vol. 15. – P. 507–513.
16. Акопян, В. Б. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами / В. Б. Акопян, Ю. А. Ершов; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. – М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2005. – 223 с.
17. Глембоцкий, В. А. Флотация : учебник для вузов по специальности «Обогащение полезных ископаемых» / В. А. Глембоцкий, В. И. Классен. – М.: Недра, 1973. – 384 с.
18. Белов, В. С. Разработка устройства для получения мелкой газожидкостной дисперсии гидродинамическим методом : дис. ... магистра техн. наук : 1–70 80 01 / Белов Вадим Сергеевич; Брестский государственный технический университет. – Брест, 2017. – 52 л.
19. Gas Dispersion Measurements McGill Bubble Viewer // McGill University. – URL: <https://www.mcgill.ca/minpro/our-laboratory/beneficiation-laboratory/gas-dispersion-measurements> (date of access: 11.06.2025).
20. Poletaev, I. Bubble patterns recognition using neural networks: Application to the analysis of a two-phase bubbly jet / I. Poletaev, M. P. Tokarev, K. S. Pervunin // International Journal of Multiphase Flow. – 2020. – Vol. 126. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301932219305701#bbib45> (date of access: 11.06.2025).

References

1. Perepelkin, K. E. Gazovye emul'sii / K. E. Perepelkin, V. S. Matveev. – L.: Himiya, 1979. – 164 s.
2. Zolotov, A. V. Sposoby polucheniya gazovoj dispersii v ob'eme zhidkosti / A. V. Zolotov, I. S. Bagreeva // Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoj opyt. – 2017. – № 1. – С. 18–22.
3. Ksenofontov, B. S. Ispol'zovanie processov strujnoj aeracii v processah flotacionnoj oчитstki stochnyh vod / B. S. Ksenofontov // Santechnika. – 2022. – № 6. – С. 32–37.
4. Anopol'skij, V. N. Primenenie napornoj flotacii v tekhnologii oчитstki prirodnyh i stochnyh vod / V. N. Anopol'skij, G. N. Feld'shtejn, E. G. Fel'dshtejn // Vodooчistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. – 2008. – № 8 (8). – С. 38–44.
5. ZHernoklev, A. K. Aeraciya i ozonirovanie v processah oчитstki vody / A. K. ZHernoklev, L. P. Pilnevich, V. V. Savich. – Minsk : Tonpik, 2002. – 129 s.

Материал поступил 23.06.2025, одобрен 14.07.2025, принят к публикации 15.07.2025

УДК 556.555.6

РЕЖИМ СТОКА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ РЕК БЕЛАРУСИ

А. А. Волчек¹, И. Н. Розумец², С. В. Сидак³, Ю. П. Городнюк⁴¹ Д. г. н. РФ и РБ, профессор, профессор кафедры природообустройства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by² Магистр, аспирант кафедры природообустройства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ivan.rozumets@bk.ru³ Магистр физ.-мат. н., старший преподаватель кафедры математики и информатики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: harchik-sveta@mail.ru⁴ Магистр, аспирант кафедры природообустройства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: juliagirodniuk99@gmail.com

Реферат

В данной работе рассматриваются методы оценки стока взвешенных наносов в реках Ясельда и Лесная, а также анализ их взаимосвязи с гидрометеорологическими параметрами. Основным подходом является использование регрессионных моделей, основанных на статистической связи между мутностью воды и расходом воды. В частности, применяются нелинейные регрессионные уравнения степенного вида и их логарифмические преобразования для восстановления пропущенных данных. На основе полученных моделей восстановлены среднегодовые значения расхода взвешенных наносов за отдельные годы, что позволило выявить характерные пики в 1988, 1998, 2009 и 2012 годах для обеих рек. Анализ многолетних рядов показал наличие локальных максимумов, свидетельствующих о сложных гидрологических процессах и возможных влияниях природных и антропогенных факторов. Важным аспектом исследования является оценка сезонных изменений стока наносов, что позволяет более полно понять динамику процессов переноса взвешенных частиц в течение года.

Использование статистических методов позволяет достаточно точно оценивать динамику наносов, однако точность зависит от качества исходных данных и учета дополнительных факторов. В целом выбранные модели являются эффективными инструментами для оценки взвешенных наносов при ограниченности данных, что важно для гидрологического мониторинга и управления водными ресурсами. Результаты подчеркивают необходимость комплексного подхода с учетом региональных особенностей и расширения базы наблюдений для повышения надежности прогнозов.

Дополнительно в работе проведен анализ влияния климатических изменений на параметры стока и перенос взвешенных наносов. Установлено, что увеличение частоты экстремальных осадков способствует росту интенсивности переноса взвешенных частиц, что отражается на увеличении пиковых значений мутности и расхода наносов. Эти данные важны для разработки мероприятий по охране водных ресурсов и предотвращению эрозионных процессов.

Ключевые слова: твердый сток, взвешенные наносы, модель, сток наносов, регрессия.

RUNOFF REGIME OF SUSPENDED SEDIMENTS OF BELARUSIAN RIVERS

A. A. Volchak, I. N. Rozumec, S. V. Sidak, Y. P. Haradniuk

Abstract

This study examines methods for estimating the suspended sediment load in the Yaselda and Lesnaya rivers, as well as analyzing their relationship with hydro-meteorological parameters. The primary approach involves using regression models based on statistical correlations between water turbidity and water discharge. Specifically, nonlinear power-type regression equations and their logarithmic transformations are applied to reconstruct missing data. Based on the developed models, annual average values of suspended sediment discharge for individual years were restored, revealing characteristic peaks in 1988, 1998, 2009, and 2012 for both rivers. The analysis of multi-year series showed the presence of local maxima, indicating complex hydrological processes and potential influences of natural and anthropogenic factors. An important aspect of the research is the assessment of seasonal variations in sediment runoff, which allows for a more comprehensive understanding of the dynamics of suspended particle transport throughout the year.

The use of statistical methods enables fairly accurate evaluation of sediment dynamics; however, the precision depends on the quality of initial data and consideration of additional factors. Overall the selected models are effective tools for estimating suspended sediments in conditions of limited data, which is crucial for hydrological monitoring and water resource management. The results highlight the need for a comprehensive approach that considers regional features and expands observation networks to improve forecast reliability.

Additionally, the study includes an analysis of the impact of climate change on runoff parameters and sediment transport. It was established that an increase in the frequency of extreme precipitation events contributes to a rise in the intensity of suspended particle transfer, reflected in increased peak values of turbidity and sediment discharge. These findings are important for developing measures aimed at water resource protection and erosion prevention.

Keywords: solid runoff, suspended sediments, model, sediment runoff, regression.

Введение

Для проектирования и эксплуатации водохозяйственных и гидротехнических сооружений, систем водоснабжения важно располагать надежными данными многолетних наблюдений за твердым стоком рек Беларуси. Эти данные содержатся в гидрологических ежегодниках государственных водных кадастров СССР и Беларуси. Из-за отсутствия данных за определенные годы и месяцы прерывается ряд наблюдений и снижается значимость проведенного анализа. Кроме того, на территории Беларуси насчитывается большое количество рек, на которых отсутствуют гидрометрические посты или ведутся лишь наблюдения за расходом воды. Однако эти реки вносят в основной водоток значительное количество взвешенных

наносов. Определение этих наносов необходимо для оценки сроков заиления водохранилищ. Речные наносы образуются в русле и пойме реки, являясь важной частью любой речной экосистемы. Помимо своей экологической функции эти наносы широко применяются в строительстве в качестве нерудных материалов [1–5].

В Беларуси насчитывается около 20,8 тысяч рек, общая протяженность которых составляет 90,6 тысяч километров. По численности и длине преобладают малые реки (длина до 100 км) и ручьи (длина до 10 км), которые составляют соответственно 93 % от общего числа рек и 53 % от их общей длины.

Мутность воды в реках значительно варьируется по поперечному сечению потока, вдоль его длины и во времени. Распределение мут-

ности по ширине русла обладает сложным и в значительной степени хаотичным характером. Обычно мутность увеличивается от поверхности к дну, что обусловлено преимущественным накоплением крупных фракций наносов на дне. Мелкие частицы, как правило, распределяются более равномерно по глубине. Поэтому, чем больше в составе наносов крупных фракций, тем более неравномерным является их распределение по вертикали. При росте турбулентности потоков распределение взвешенных наносов по вертикали становится более однородным. Однако это лишь общая схема; на практике ситуация усложняется из-за возникновения водоворотов и циркуляционных течений, которые нарушают простую картину распределения [6].

Еще более сложный характер носит распределение наносов по ширине реки. Здесь вообще трудно подметить сколько-нибудь отчетливо выраженную закономерность. Распределение наносов по ширине потока сильно меняется в зависимости от направления течения, местных размывов русла и берегов, впадения притоков, несущих большее или меньшее количество наносов, чем главная река.

Важной особенностью рек с имеющимися данными о взвешенных наносах является малый сток наносов. Это обусловлено характером питания и рельефом местности, а также малой транспортирующей способностью потока [7–8].

В настоящее время проводятся немногочисленные измерения наносов на реках Беларуси, которые недостаточны для объективной оценки режима стока наносов. В таком случае прибегают к расчетным методам [9–10].

Таблица 1 – Изученность стока взвешенных наносов на реках Беларуси

Река	Пункт наблюдений	Период наблюдений за твердым стоком	Месяц и год, за который отсутствуют значения твердого стока
Вилия	Вилейка	1983–2021 гг.	март 2012 г.; июль 2013 г.; май 2014 г.; январь, февраль, декабрь 2018 г.
Вилия	Стешицы	1981–2021 гг.	март 2012 г.; июль 2013 г.; май 2014 г.; январь, февраль, декабрь 2018 г.
Ясельда	Сенин	1971–2021 гг.	май 1971 г.; весь 1975 г.; весь 1976 г.; январь, февраль 1979 г.; март 2012 г.; июль 2013 г.; май 2014 г.; январь, февраль, декабрь 2018 г.
Полота	Янково 1-е	1990–2021 гг.	декабрь 1999 г.; август, сентябрь, октябрь 2002 г.; февраль 2023 г.; сентябрь 2004 г.; май 2005 г.; февраль 2007 г.; январь, февраль, октябрь 2012 г.; январь, февраль, март 2014 г.

Как правило, недостаточность и неточность данных наблюдений за расходом наносов на реках препятствуют получению надежной информации о характеристиках его распределения. В случае отсутствия или недостаточности данных наблюдений за стоком взвешенных наносов на исследуемом водотоке все характеристики и параметры твердого стока определяются на основе данных реки-аналога. Под рекой-аналогом понимается река, для которой имеются гидрологические наблюдения и которая находится в схожих условиях формирования стока с исследуемой рекой, для которой проводится расчет [12].

При выборе реки-аналога должны выполняться следующие требования:

- однотипность стока реки-аналога и исследуемой реки;
- возможная географическая близость расположения водосборов;
- площади водосборов не должны различаться более чем в 10 раз;
- однородность условий формирования стока, сходство климатических условий, однотипность почв (грунтов) и гидрогеологических условий, близкую степень озерности, залесенности, заболоченности и распаханности водосборов;
- отсутствие факторов, существенно искажающих естественный речной сток (регулирование стока, сбросы и изъятие воды).

В таблице 2 представлены значения основных гидрографических характеристик водосборов при подборе рек-аналогов, основными критериями соответствия при выборе которых послужили площадь, средняя высота, средний уклон водосбора.

Так как полный ряд, без пропуска значений, присутствует лишь у р. Лесной в створе Тюхиничи, то восстанавливать будем по ее ряду. Для определения среднемесячных расходов взвешенных наносов, отсутствующих в литературных источниках, построили график, отображающий прямые линии связи (рисунок 1). Уравнения регрессии имеют вид: $R_c = 8,07 \cdot R_r - 0,14$ и $R_c = 1,43 \cdot R_r + 0,01$, где R_c и R_r – расходы взвешенных наносов на реке Ясельде в створе Сенин и реке Лесной в створе Тюхиничи.

Целью настоящей работы является оценка режима стока взвешенных наносов рек Беларуси за многолетний период.

Для реализации поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

- 1) восстановление рядов взвешенного стока рек Беларуси;
- 2) оценка многолетней изменчивости стока наносов;
- 3) построение регрессионной модели связи расходов воды и расходов наносов.

Исходные данные и методы исследования

Информационной основой для исследования послужили многолетние ряды наблюдений за расходами взвешенных наносов и расходами воды. Данные предоставлены государственным учреждением «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь [11].

В настоящее время наблюдение за стоком наносов осуществляется на шести реках Беларуси (Полоте, Полпе, Страче, Лесной, Добысне, Узе). Наиболее полные и продолжительные ряды наблюдений имеются для рек: Вилия в створе Вилейка и Стешицы, Ясельда в створе Сенин, Полота в створе Янково 1-е. В таблице 1 представлены сведения о периодах наблюдений за твердым стоком данных рек, а также об отсутствии инструментальных наблюдений за твердым стоком.

Таблица 2 – Гидрографические характеристики рек, по которым ведутся наблюдения за твердым стоком

Река	Пункт	Площадь водосбора (км ²)	Средняя высота (м)	Средний уклон (‰)
Вилия	Вилейка	4190	150	0,3
Вилия	Стешицы	1230	150	0,3
Ясельда	Сенин	5110	140	0,15
Полота	Янково 1-е	618	130	0,5
Лесная	Тюхиничи	2590	150	0,2

Существует несколько методов оценки стока взвешенных наносов, которые основаны на различных теоретических концепциях и выбираются в зависимости от конкретных условий и требований. Согласно энергетической парадигме, сумма взвешенных и влекомых наносов в потоке прямо связана с затратами энергии потока на их транспортировку. Балансовая парадигма учитывает обмен наносов между потоком и руслом, а количество взвешенных наносов на конечной границе определяется транспортирующей способностью потока и гидромеханическими свойствами переносимого материала. Однако применение этих методов осложнено из-за недостатка данных, что делает их непрактичными для точной количественной оценки транспорта наносов.

Особое место занимает стохастическая концепция, которая объединяет ряд статистических методов. Она предполагает возможность прогнозирования стока взвешенных наносов с помощью одного или нескольких предикторов – переменных, оказывающих влияние на данный процесс. На основе этих предикторов создаются статистические модели, позволяющие с высокой точностью оценивать объемы наносов. Основные статистические подходы делятся на две категории: вероятностные методы, основанные на предположении сходства эмпирических распределений расходов воды и мутности при различных временных интервалах; и регрессионные методы, которые подбирают предикторы и строят модели различного типа, включая метод кривых транспорта наносов.

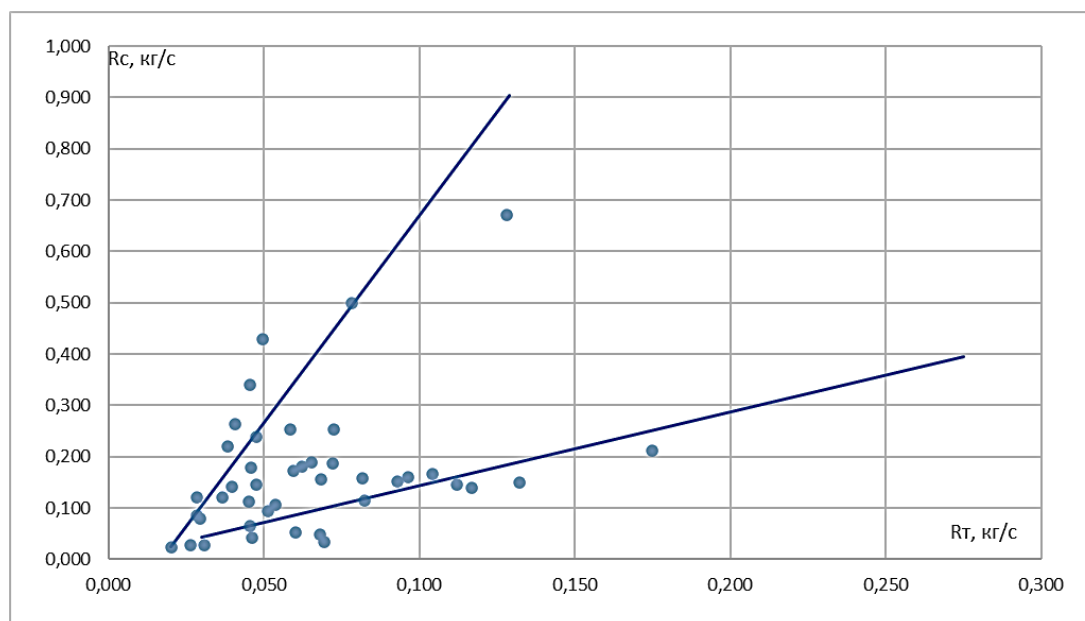


Рисунок 1 – Связь расходов взвешенных наносов на р. Лесной в створе Тюхиничи и р. Ясельде в створе Сенин

Нелинейные регрессионные модели, используемые в методе кривых транспорта наносов, применяются для аппроксимации данных о расходах и мутности воды, полученных в результате наблюдений или экспериментов. Эти данные могут быть представлены в виде временных рядов с разной продолжительностью и частотой измерений. Основная идея заключается в том, что мутность воды функционально связана с расходом воды. Однако эта зависимость не является универсальной: мутность может зависеть не только от расхода, но и от других факторов, таких как наличие примесей, микроорганизмов или органических веществ в воде [13–17].

Расход наносов (R кг/с), переносимых рекой, через поперечное сечение может быть определен по формуле [18–20]

$$R = C \cdot Q \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где C – мутность воды, г/м³, Q – расход воды, м³/с.

Анализ моделей для расчета мутности воды на малых реках показал, что вполне допустимо использование регрессионных моделей. В силу того что мутность воды хорошо коррелирует с расходами воды и носит нелинейный характер, то нами использована нелинейная регрессионная модель степенного вида:

$$C = aQ^b, \quad (2)$$

где a и b – параметры подгонки.

Степенную зависимость с помощью логарифмического преобразования можно представить как

$$\log C = \log a + b \log Q. \quad (3)$$

Результаты и их обсуждение

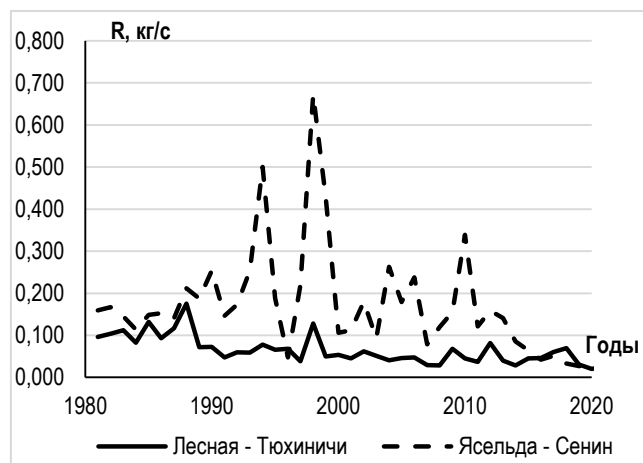
Используя уравнения регрессии, восстановили пропущенные значения за отдельные месяцы. Поскольку восстанавливаются только отдельные элементы годового ряда, это позволяет обеспечить наибольшую точность при получении среднегодовых показателей. Восстановленные среднегодовые значения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения восстановленных среднегодовых расходов взвешенных наносов

Река, пункт	Год	Восстановленные среднегодовые значения R , (кг/с)
Ясельда – Сенин	2012	0,157
	2013	0,143
	2014	0,09
	2018	0,068

Ряды наблюдений для р. Ясельды и р. Лесной представлены на рисунке 2. На обоих графиках выделяются пики повышенного расхода наносов в 1988, 1998, 2009, 2012 годах. Однако на р. Лесной

имеются и собственные пики, не сходящиеся с р. Ясельдой, такие как 1994, 2010 годы.

Рисунок 2 – Многолетние ряды среднегодовых значений расходов взвешенных наносов (R , кг/с) на р. Лесной в створе Тюхиничи и р. Ясельде в створе Сенин

Для построения регрессионной модели необходимо провести анализ исходных данных исследованием статистических свойств рядов наблюдений. Поэтому используются частотные гистограммы рядов мутности и расхода воды для сравнения с кривой гауссова распределения (рисунок 3).

Представленные расчетные методы требуют обоснования для каждой отдельной реки. Нелинейный регрессионный анализ используется в уравнениях (1) и (2), а линейная регрессия – в уравнении (3). Структура данных оказывает влияние на точность методов. В уравнениях (1) и (2) наличие ошибок снижает точность расчетов, особенно в области высоких значений Q и C .

Коэффициенты a и b являются параметрами модели, которые используются для подгонки данных методом кривой транспорта наносов. В контексте регрессионного анализа a и b служат для передачи информационного сигнала к зависимой переменной.

Для уменьшения количества ошибок в построении нелинейных регрессионных моделей используется метод наименьших квадратов. Поиск экстремума функции потерь выполняется с помощью широкого спектра методов оптимизации.

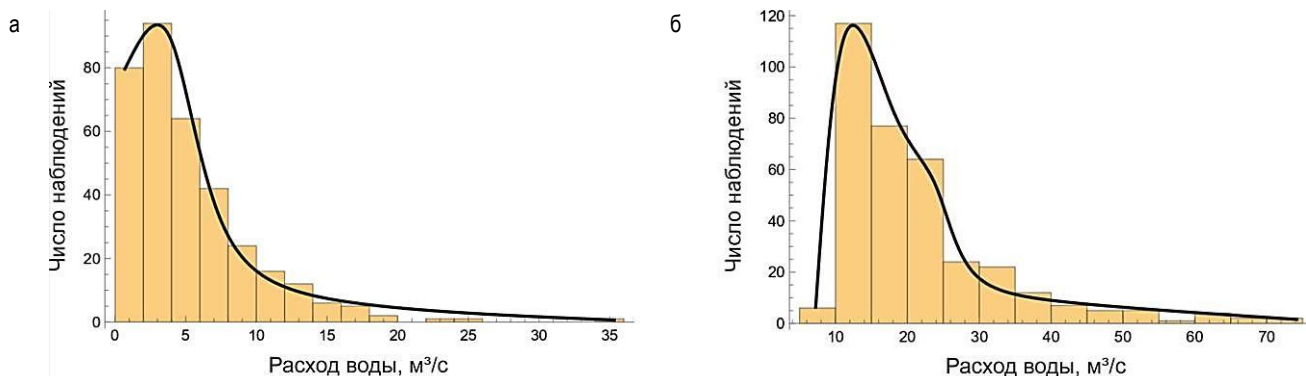


Рисунок 3 – Частотные гистограммы рядов измеренных значений расхода воды Q : а – р. Полота – с. Янково 1-е за 1990–2010 гг; б – р. Вилия – г. Вилейка за 1990–2010 гг.

Полученные коэффициенты детерминации (таблица 4) близки к единице, что показывает работоспособность модели. Однако для некоторых пунктов наблюдения он составляет 0,59 (р. Полота – с. Янково 1-е). Так же для объединенного ряда значений 0,62.

Для модели линейного распределения (таблица 5) по уравнению (3) коэффициенты детерминации высокие. Так, для р. Вилии – г. Вилейка он составляет 0,98. А для р. Полота – с. Янково 1-е составляет 0,74, минимальное значение в нашей выборке.

Регрессионные модели, основанные на измеренных значениях концентрации (C) и расхода воды (Q), могут использоваться только для определения мгновенных значений C и не подходят для оценки концентрации из расходов воды, усредненных за другие периоды. Предсказать ошибки расчетов затруднительно, поскольку на результат влияют многочисленные факторы, такие как изменения гидроклиматических условий.

Замена расхода воды в регрессионном уравнении должна иметь статистическую обоснованность, поскольку считается, что расход воды является наиболее эффективным предиктором для оценки концентрации взвешенных наносов при отсутствии других данных.

Таблица 4 – Коэффициенты регрессии, полученные по уравнению (1) для рядов измеренных C и Q

Река – створ	Параметр		
	a	b	r^2
р. Полота – с. Янково 1-е	4,978	0,031	0,59
р. Вилия – г. Вилейка	9,186	0,439	0,81
р. Вилия – с. Стешицы	3,032	0,676	0,84
р. Лесная – с. Тюхиничи	5,947	0,324	0,74
р. Ясельда – с. Сенин	24,426	0,179	0,77
Объединенный ряд	10,181	0,134	0,62

Таблица 5 – Коэффициенты регрессии, полученные по уравнениям (3) для рядов измеренных C и Q

Параметр	Линейная регрессия					
	р. Полота – с. Янково 1-е	р. Вилия – г. Вилейка	р. Вилия – с. Стешицы	р. Лесная – с. Тюхиничи	р. Ясельда – с. Сенин	Объединенный ряд
$\log a$	0,255	0,95	0,379	0,588	1,11	0,69
a	1,291	2,584	1,461	1,8	3,036	1,994
b	0,034	0,204	0,391	0,208	0,188	0,150
k	2,947	1,092	1,079	1,334	1,535	3,389
r^2	0,74	0,98	0,96	0,93	0,95	0,88

Заключение

Восстановление пропущенных значений взвешенных наносов на реках Ясельда и Лесная выполнено с использованием регрессионных моделей, основанных на связи между расходами наносов. В частности, уравнение регрессии позволило определить недостающие значения для р. Ясельды в створе Сенин.

Анализ многолетних рядов показал наличие характерных пиков расхода наносов в 1988, 1998, 2009 и 2012 годах, а также наличие пиков у р. Лесной (например, 1994 и 2010 годы), что свидетельствует о сложных гидрологических процессах и возможных влияниях природных или антропогенных факторов.

В целом выбранные методы позволяют достаточно точно восстанавливать пропущенные значения и анализировать динамику взвешенных наносов на исследуемых реках. Тем не менее для повышения точности рекомендуется использовать комплексный подход с учетом дополнительных факторов и более обширных данных.

Список цитированных источников

- Волчек, А. А. Современные изменения твердого стока наносов на реках Беларуси / А. А. Волчек, И. Н. Розумец // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы эффективного и комплексного использования водных ресурсов», приуроченной ко Всемирному дню водных ресурсов (Минск, 22–24 марта 2023 г.) / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, РУП «ЦНИИКИВР»; редкол.: О. В. Ковзунова (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Национальная библиотека Беларуси, 2023. – С. 51–54.

- Розумец, И. Н. Пространственно-временные колебания речных наносов на территории Беларуси / А. А. Волчек, И. Н. Розумец // V Международная научно-практическая конференция (Гомель, 25–26 мая 2023 года): сборник материалов / М-во образования Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, Воронежский гос. ун-т, Гомельский обл. отдел обществ. об-ния «Белорусское геогр. о-во», Рос. центр науки и культуры в Гомеле; редкол.: А. И. Павловский (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2023. – С. 65–68.
- Розумец, И. Н. Сезонная изменчивость расхода воды и мутности рек / А. А. Волчек, И. Н. Розумец // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания. ICER – 2023: сборник научных статей Международной научно-практической конференции «Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды», посвященной памяти доцента кафедры природообустройства, кандидата географических наук, доцента Шлока Ирины Николаевны, Брест, 16–17 октября 2023 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет; под ред. А. А. Волчека [и др.]. – Брест: БрГТУ, 2023. – С. 30–38.
- Экологические проблемы, вызванные добычей нерудных строительных материалов из русел рек / А. А. Волчек, С. И. Парфомук, Н. Н. Шешко [и др.] // Вестник БрГТУ. – 2023. – № 1 (130). – С. 113–117.
- Гидроэкологическое обоснование добычи нерудных строительных материалов в русле р. Припять участок н.п. Качановичи / А. А. Волчек [и др.] // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2023. – № 1. – С. 111–122.

6. Материалы I Белорусского географического конгресса: к 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 70-летию Белорусского географического общества, Минск, 8–13 апр. 2024 г. : в 7 ч. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: Е. Г. Кольмакова (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2024. – Ч. 1. Современные проблемы гидрометеорологии. – С. 71–75.
 7. Караушев, А. Н. Речная гидравлика / А. Н. Караушев. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – 416 с.
 8. Караушев, А. Н. Теория и методы расчета речных наносов / А. Н. Караушев. – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 272 с.
 9. Маккавеев, Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне / Н. И. Маккавеев. – М. : Изд-во АН СССР, 1955. – 355 с.
 10. Чалов, Р. С. Русловедение: теория, география, практика / Р. С. Чалов. – М. : Изд-во ЛКИ, 2008. – Т. 1. – 608 с.
 11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Белоруссия и Верхнее Поднепровье. – Л. : Гидрометеиздат, 1966. – Т. 5, ч. 1. – 718 с.
 12. Ковязина, И. А. Факторы формирования стока взвешенных наносов рек и методы его количественной оценки / И. А. Ковязина, Д. С. Баяндина // Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках : материалы Междунар. науч.-практ. оч.-заоч. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, 60-летию каф. физ. географии и образоват. технологий, 100-летию со дня рождения проф. О. Ф. Якушко, Минск, 24–26 марта 2021 г. / Белорус. гос. ун-т ; под общ. ред. П. С. Лопуха ; редкол.: П. С. Лопух (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2021. – С. 478–483.
 13. Тананаев, Н. И. Использование регрессионного анализа в расчетах стока взвешенных наносов: особенности метода / Н. И. Тананаев // Водные ресурсы. – 2013. – Т. 40, № 6. – С. 557–557.
 14. Лопатин, Г. В. Наносы рек СССР / Г. В. Лопатин. – М. : Географгиз, 1952. – 365 с.
 15. Asselman, N. Fitting and interpretation of sediment rating curves / N. Asselman // J. Hydrol. – 2000. – Vol. 234. – P. 228–248.
 16. Nash, D. B. Effective sediment-transporting discharge from magnitude frequency analysis / D. B. Nash // J. Geol. – 1994. – Vol. 102. – P. 79–95.
 17. Ковалевич, О. Г. Методы расчета нормы стока взвешенных наносов / О. Г. Ковалевич // Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана : матер. Междунар. науч.-практ. конф. Владивосток, 2010. – Ч. 1. – С. 139–141.
 18. Волчек, А. А. Пакет прикладных программ для определения расчетных характеристик речного стока // А. А. Волчек, С. И. Парфомук / Веснік Палескага дзяржаўнага ўніверсітэта. Сэрыя прыродазнаўчых навук. – 2009. – № 1. – С. 22–30.
 19. Статистические методы в природопользовании / В. Е. Валуев, А. А. Волчек, П. С. Пойта, П. В. Шведовский. – Брест : Изд-во Брестского политехнического института, 1999. – 252 с.
 20. Волчек, А. А. Учет разовых гидрометрических измерений при определении основных гидрологических характеристик и параметров русла / А. А. Волчек, Н. Н. Шешко // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Водохозяйственное строительство и теплотехника. – 2011. – № 2 (68). – С. 7–13.
- References**
1. Volchek, A. A. Sovremennye izmeneniya tverdogo stoka nanosov na reках Belarusi / A. A. Volchek, I. N. Rozumec // Sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye voprosy effektivnogo i kompleksnogo ispol'zovaniya vodnyh resursov», priurochennoj ko Vsemirnomu dnyu vodnyh resursov (Minsk, 22–24 marta 2023 g.) / Ministerstvo prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy, RUP «CNIIKIVR» ; redkol.: O. V. Kovzunova (otv. red.) [i dr.]. – Minsk : Nacional'naya biblioteka Belarusi, 2023. – S. 51–54.
 2. Rozumec, I. N. Prostranstvenno-vremennye kolebaniya rechnykh nanosov na territorii Belarusi / A. A. Volchek, I. N. Rozumec // V Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya (Gomel', 25–26 maya 2023 goda) : sbornik materialov / M-vo obrazovaniya Respubliki Belarus', Gomel'skij gos. un-t im. F. Skoriny, Voronezhskij gos. un-t, Gomel'skij obl. otdel obshchestv. ob-niya «Belorusskoe geogr. o-vo», Ros. centr nauki i kul'tury v Gomele ; redkol. : A. I. Pavlovskij (gl. red.) [i dr.]. – Gomel' : GGU im. F. Skoriny, 2023. – S. 65–68.
 3. Rozumec, I. N. Sezonnaya izmenchivost' raskhoda vody i mutnosti rek / A. A. Volchek, I. N. Rozumec // Aktual'nye nauchno-tehnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya. ICEP – 2023 : sbornik nauchnyh statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i ohrana okruzhayushchej sredy», posvyashchennoj pamyati docenta kafedry prirodoobustrojstva, kandidata geograficheskikh nauk, docenta SHpoka Iriny Nikolaevny, Brest, 16–17 oktyabrya 2023 g. / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet ; pod red. A. A. Volcheka [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2023. – S. 30–38.
 4. Ekologicheskie problemy, vyzvannye dobychej nerudnykh stroitel'nykh materialov iz rusel rek / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk, N. N. SHeshko [i dr.] // Vestnik BrGTU. – 2023. – № 1 (130). – S. 113–117.
 5. Gidroekologicheskoe obosnovanie dobychi nerudnykh stroitel'nykh materialov v rusle r. Pripyat' uchastok n. p. Kachanovichy / A. A. Volchek [i dr.] // Vesnik Bresckaga yuniversiteta. Seryya 5. Biyalogiya. Navuki ab zyamli. – 2023. – № 1. – S. 111–122.
 6. Materialy I Belorusskogo geograficheskogo kongressa: k 90-letiyu fakul'teta geografii i geoinformatiki Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta i 70-letiyu Belorusskogo geograficheskogo obshchestva, Minsk, 8–13 apr. 2024 g. : v 7 ch. / Belorus. gos. un-t ; redkol.: E. G. Kol'makova (gl. red.) [i dr.]. – Minsk : BGU, 2024. – CH. 1. Sovremennye problemy gidrometeorologii. – S. 71–75.
 7. Karaushev, A. N. Rechnaya gidravlika / A. N. Karaushev. – L. : Gidrometeoizdat, 1969. – 416 s.
 8. Karaushev, A. N. Teoriya i metody rascheta rechnykh nanosov / A. N. Karaushev. – L. : Gidrometeoizdat, 1977. – 272 s.
 9. Makkaev, N. I. Ruslo reki i eroziya v ee bassejne / N. I. Makkaev. – M. : Izd-vo AN SSSR, 1955. – 355 s.
 10. CHalov, R. S. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika / R. S. CHalov. – M. : Izd-vo LKI, 2008. – T. 1. – 608 s.
 11. Resursy poverhnostnykh vod SSSR. Belorussiya i Verhnee Podneprov'e. – L. : Gidrometeoizdat, 1966. – T. 5, ch. 1. – 718 s.
 12. Kovyazina, I. A. Faktory formirovaniya stoka vzveshennykh nanosov rek i metody ego kolichestvennoj ocenki / I. A. Kovyazina, D. S. Bayandina // Razvitie geograficheskikh issledovaniy v Belarusi v XX–XXI vekah : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. och.-zaoch. konf., posvyashch. 100-letiyu Belorus. gos. un-ta, 60-letiyu kaf. fiz. geografii i obrazovat. tekhnologii, 100-letiyu so dnya rozhdeniya prof. O. F. YAKushko, Minsk, 24–26 marta 2021 g. / Belorus. gos. un-t ; pod obshch. red. P. S. Lopuha ; redkol.: P. S. Lopuh (gl. red.) [i dr.]. – Minsk : BGU, 2021. – S. 478–483.
 13. Tananaev, N. I. Ispolzovanie regressionnogo analiza v raschetah stoka vzveshennykh nanosov: osobennosti metoda / N. I. Tananaev // Vodnye resursy. – 2013. – T. 40, № 6. – S. 557–557.
 14. Lopatin, G. V. Nanosy rek SSSR / G. V. Lopatin. – M. : Geografiz, 1952. – 365 s.
 15. Asselman, N. Fitting and interpretation of sediment rating curves / N. Asselman // J. Hydrol. – 2000. – Vol. 234. – P. 228–248.
 16. Nash, D. B. Effective sediment-transporting discharge from magnitude frequency analysis / D. B. Nash // J. Geol. – 1994. – Vol. 102. – P. 79–95.
 17. Kovalevich, O. G. Metody rascheta normy stoka vzveshennykh nanosov / O. G. Kovalevich // Aktual'nye problemy osvoeniya biologicheskikh resursov Mirovogo okeana : mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Vladivostok, 2010. – CH. 1. – S. 139–141.
 18. Volchek, A. A. Paket prikladnykh programm dlya opredeleniya raschetnykh harakteristik rechnogo stoka // A. A. Volchek, S. I. Parfomuk / Vesnik Paleskaga dzhzyarzhaynaga universiteta. Seryya pryrodaznaychykh navuk. – 2009. – № 1. – S. 22–30.
 19. Statisticheskie metody v prirodopol'zovanii / V. E. Valuev, A. A. Volchek, P. S. Poyta, P. V. SHvedovskij. – Brest : Izd-vo Brestskogo politekhnicheskogo instituta, 1999. – 252 s.
 20. Volchek, A. A. Uchet razovykh gidrometricheskikh izmerenij pri opredelenii osnovnykh gidrologicheskikh harakteristik i parametrov rusla / A. A. Volchek, N. N. SHeshko // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teplotekhnika. – 2011. – № 2 (68). – S. 7–13.

Материал поступил 18.06.2025, одобрен 25.06.2025, принят к публикации 26.06.2025

УДК 556.5

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В КОЛЕБАНИЯХ СТОКА РЕК БАСЕЙНА ЗАПАДНОЙ ДВИНЫ И ИХ ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ

**А. А. Волчек¹, Н. Н. Филатов², Н. В. Гнатюк³, О. П. Мешик⁴, С. И. Парфомук⁵,
М. В. Борушко⁶, Ю. В. Радченко⁷, С. В. Сидак⁸, Ю. П. Городнюк⁹, А. С. Протасевич¹⁰**

¹ Д. г. н. РФ и РБ, профессор, профессор кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

² Д. г. н., профессор, член-корреспондент РАН, г. н. с., Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН – обособленная организация ФИЦ КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия, e-mail: nfilatov@rambler.ru

³ К. г. н., н. с., заместитель директора научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: gnatiuk.n@gmail.com

⁴ К. т. н., доцент, декан факультета инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: omeshik@mail.ru

⁵ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой математики и информатики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: parfom@mail.ru

⁶ Магистр, старший преподаватель кафедры лингвистических дисциплин и межкультурных коммуникаций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: borushko.marina@mail.ru

⁷ Ph. D., научный сотрудник научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: yulia.rad@gmail.com

⁸ Магистр, старший преподаватель кафедры математики и информатики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: harchik-sveta@mail.ru

⁹ Магистр, ассистент кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: juliagirodniuk99@gmail.com

¹⁰ Магистр, старший преподаватель кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: protasevichnastua@gmail.com

Реферат

В статье представлены результаты исследований пространственно-временных колебаний характерных расходов воды Западной Двины и ее притоков, расположенных на территории Беларуси за период инструментальных наблюдений. Для створа Витебска рассматривался гидрологический ряд в 145 лет, с 1877 по 2021 гг.

Показано, что изменение климата увеличило неравномерность изменений стока как по бассейнам рек Западной Двины, так и его внутригодовому распределению по сезонам года, а также в зависимости от характеристик рек – большие, средние, малые. Значительные изменения стока произошли в весенний период, связанные со снижением стока весеннего половодья и более ранним его наступлением. В весенний, летний и осенний период прослеживается разная направленность изменения стока, особенно в летний период – его увеличение.

Прогноз стока на период до 2035 года в основном подтвердил выявленные тенденции его изменения за период с 1961 по 2015 год. При незначительном изменении стока в среднем за год, высокая вероятность его неравномерности и разнонаправленности в сезоны и месяцы. Усиление неравномерности внутригодового распределения стока и увеличение рисков наводнений, обусловленных резкими оттепелями в зимний период, более ранним наступлением весеннего половодья и увеличением интенсивности дождевых паводков может привести к увеличению рисков экстремальных явлений.

Значимость оценок и прогнозов речного стока в условиях изменяющегося климата определяется целесообразностью их последующего учета при планировании водоохранных и водохозяйственных мероприятий, связанных с совершенствованием управления речным бассейном Западной Двины.

Ключевые слова: расход воды, годовой сток, весеннее половодье, минимальный летне-осенний сток, минимальный зимний сток, климат, прогнозные оценки.

CONTEMPORARY TRENDS IN RUNOFF FLUCTUATIONS IN THE WESTERN DVINA BASIN RIVERS AND THEIR FORECAST ESTIMATES

**A. A. Volchak, N. N. Filatov, N. V. Gnatiuk, O. P. Meshik, S. I. Parfomuk, M. V. Borushko,
Y. V. Radchenko, S. V. Sidak, Y. P. Haradniuk, A. S. Protasevich**

Abstract

The article presents the results of studies of spatial and temporal fluctuations in the typical water discharges of the Western Dvina River and its tributaries located in the territory of Belarus during the period of instrumental observations. A hydrological series of 145 years (from 1877 to 2021) at the Vitebsk gauging station is considered.

It is shown that climate change has increased the unevenness in runoff changes, both in the basins of the Western Dvina rivers and in its intra-annual distribution by seasons of the year. Also the unevenness in runoff changes is related to the rivers watershed areas distinguished as large, medium, small. Significant changes in runoff occurred in the spring period, which are related to a decrease in the runoff of the spring flood and its earlier onset. In the spring, summer and autumn periods, different directions of runoff changes are observed, in the summer period it increases.

The runoff forecast for the period up to 2035 basically confirmed the identified trends in its change in the period from 1961 to 2015. With an insignificant change in runoff on average per year, there is a high probability of its unevenness and multidirectionality in seasons and months. Increased unevenness of the intra-annual distribution of runoff and an increase in the risk of floods caused by sharp thaws in winter, an earlier onset of spring floods and an increase in the intensity of rain floods can lead to an increase in the risk of extreme events.

The significance of river runoff assessments and forecasts in the changing climate is determined by the feasibility of their further consideration when planning water protection and water management measures related to improving the management of the Western Dvina river basins.

Keywords: water consumption, annual runoff, spring flood, minimum summer-autumn runoff, minimum winter runoff, climate, forecast estimates.

Введение

Вопросы рационального управления водными ресурсами всё чаще находятся в фокусе внимания международного сообщества с учетом нарастающего дефицита водных ресурсов на планете и постоянно растущего спроса на воду в большинстве стран.

Международное сообщество скоординировало усилия всех стран, определив 17 целей устойчивого развития на период до 2030 года, одной из которых является обеспечение наличия и распределения стока рек, а также его рационального использования и санитарии для всех [1]. Особенно это актуально для трансграничных рек [2]. Республика Беларусь является участником данной инициативы.

Большинство крупных рек Беларуси являются трансграничными, и управление водным режимом таких рек является межгосударственной задачей. Одной из первичных задач является объективная оценка

современного состояния водных ресурсов как в целом для бассейна реки, так и по отдельным странам, по которым она протекает. Ключевым вопросом в исследовании водного режима рек являются прогнозные оценки водных ресурсов на ближнюю и отдаленную перспективу. Одной из таких рек является река Западная Двина. Она одна из наиболее крупных рек Беларуси, уступая по водности лишь Днепру. Западная Двина вытекает из оз. Корякино, в 14 км юго-западнее г. п. Пено. Протекает по Тверской и Смоленской областям (Россия), Витебской области (Беларусь), далее по территории Латвии (Даугава) и впадает в Рижский залив Балтийского моря у г. Риги. Численность населения в бассейне реки в пределах Республики Беларусь составляет 1327 тыс. чел., а плотность населения – 40 чел/км². Площади водосбора Западной Двины (Даугава) по странам, в которых он расположен, приведены в таблице 1 [3, 4, 5, 6].

Таблица 1 – Страны, на территории которых расположен бассейн р. Западная Двина (Даугава)

Общая площадь бассейна реки, тыс. км ²	Страна	Площадь водосбора в км ² (% от общей площади бассейна)
87,9	Россия	24,8 (28,2)
	Беларусь	33,2 тыс. (37,8)
	Латвия	29,9 (34,0)

Целью настоящего исследования является установление современных тенденций в колебаниях стока рек бассейна Западной Двины на территории Беларуси и их прогнозные оценки для рационального и объективного управления водным режимом.

Материалы и методы исследования

Природные условия бассейна реки Западная Двина определяются географическим положением – простираением в северо-восточной части Восточно-Европейской равнины. Бассейн представляет собой неширокую (100–150 км) изогнутую полосу, вытянутую

в широтном направлении и как бы открытую в сторону Балтийского моря. Он граничит с водосборами: на севере – озёра Чудское и Ильмень, на востоке и юго-востоке – реки Волга и Днепр, на юге и юго-западе – река Неман. Водораздел бассейна проходит по Свенцянским грядам, восточным отрогам Белорусской гряды, Валдайской, Городокской и Латгальской (на юго-востоке Латвии, высоты – до 289 м) возвышенностям [6].

Гидрографическая сеть в бассейне Западной Двины представлена значительным количеством озёр (около 3 % всего водосбора), многочисленными реками (12 тыс.) и болотами (рисунок 1).

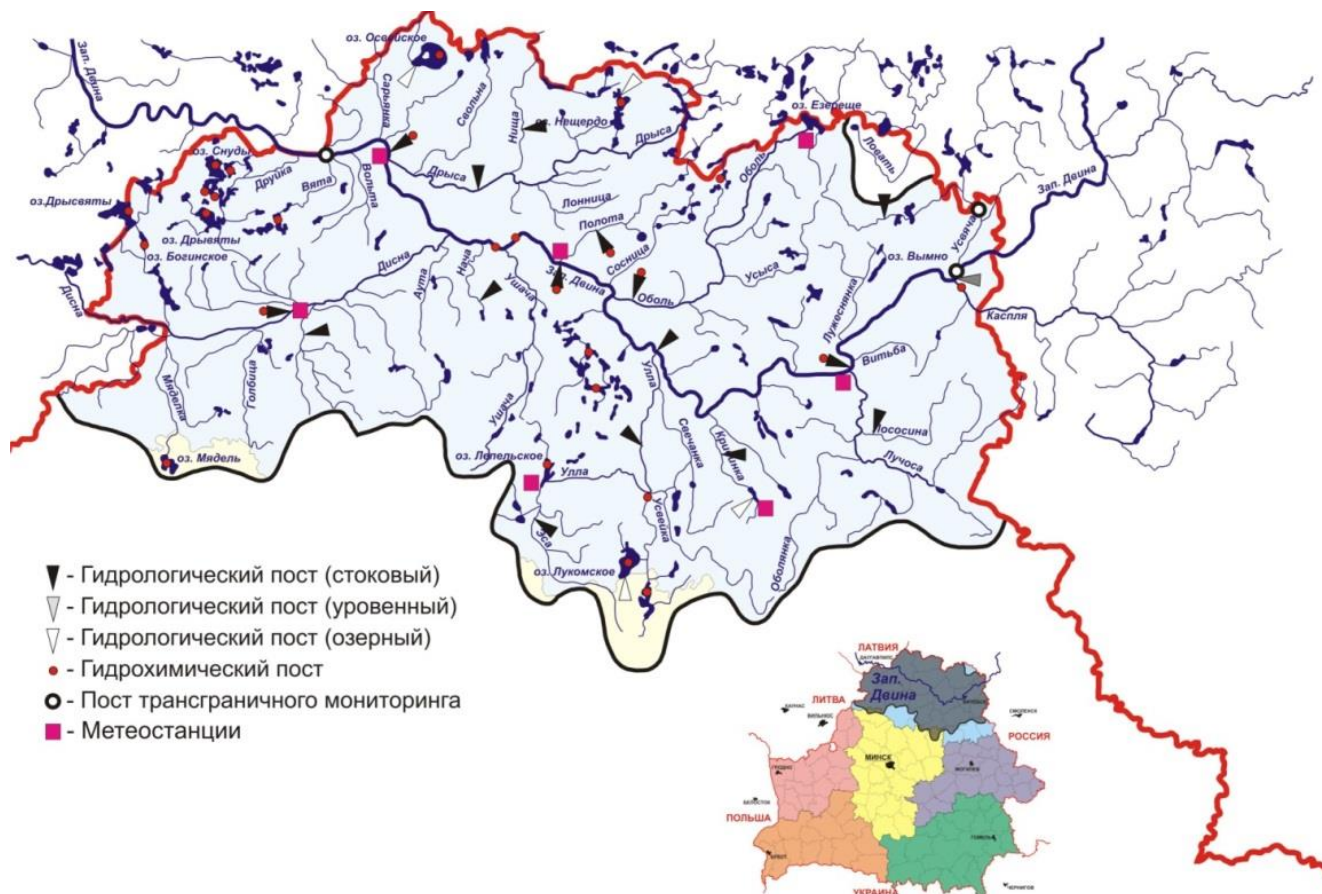


Рисунок 1 – Гидрографическая сеть и сеть существующих постов метеорологических и гидрологических наблюдений в бассейне р. Западная Двина (на территории Беларуси)

Длина реки от истока до устья – 1 020 км (в пределах Беларуси – 328 км). Общая площадь водосбора – 87,9 тыс. км² (в пределах Беларуси – 33,2 тыс. км²). Бассейн реки формируют 12 тыс. средних и малых рек. Основные притоки: правые – р. Торопа (длина 174 км), р. Оболь (длина 148 км), р. Дрыса (длина 183 км); левые – р. Межа (длина 259 км), р. Каспля (длина 136 км), р. Лучоса (длина 90 км), р. Улла (длина 123 км), р. Дисна (длина 178 км), р. Друйка (длина 52 км).

Густота речной сети составляет 0,51 км/км², насчитывается свыше 1 тыс. рек длиной более 1 км. Озёрами занято 3 % площади водосбора. Особенностью режима является высокое весеннее половодье, низкая летняя межень с частыми дождевыми паводками и устойчивая зимняя межень. На период весеннего половодья приходится 56 % годового стока, на летне-весеннюю и зимнюю межень – 33 и 11 % соответственно [3, 4, 5, 6].

Климатические условия

Непосредственное влияние Балтийского моря объясняет климатические особенности бассейна. Климат территории формируется под преобладающим влиянием Атлантического океана, его теплого Северо-Атлантического течения. Бассейн Западной Двины отличается мягким климатом, хорошими условиями увлажнения, умеренной температурой воздуха. Кроме того, чередование воздушных масс различного происхождения создает характерный для бассейна неустойчивый тип погоды [6].

Для бассейна Западной Двины характерна сглаженность температурного режима: внутригодовые амплитуды колебания температуры воздуха здесь в среднем равны 25 °С.

Количество осадков в течение года уменьшается с запада на восток – от 900 мм на побережье до 650 мм в средней части бассейна, увеличение осадков – до 700 мм наблюдается при продвижении от центра бассейна к северу – к Валдайской возвышенности.

Начало зимнего периода в верхней части бассейна приходится на середину ноября, в нижней – на третью декаду месяца, а в самом низовье – на конец ноября. При этом следует отметить, что в западной части бассейна дата осеннего перехода температуры воздуха через 0 °С выражена в большинстве случаев весьма нечетко.

Средняя продолжительность зимнего периода в нижнем участке бассейна составляет 120 дней, в среднем – 130–135, в верхнем – 140 и более дней.

Осенью устойчивый снежный покров в восточной части бассейна появляется чаще всего, начиная с конца ноября, а в западной – со второй половины декабря. Таяние снега весной на западе заканчивается обычно в конце марта, а на востоке – в начале апреля. Продолжительность залегания снежного покрова колеблется в верхней части бассейна в пределах 130–140 дней, в средней – 120–130, в нижней – 70–80 дней.

Зимой часто наблюдаются оттепели различной продолжительности, которые вызывают зимние паводки. Число дней с оттепелями увеличивается от 10 в верховьях реки до 30 в ее нижней части. В отдельные годы продолжительность оттепелей в верхней части бассейна доходит до 30 %, а в нижней части – до 60 % зимнего периода.

Весной и в первой половине лета рост температуры продолжается до июля – самого теплого месяца в году. Затем температура воздуха понижается; при этом понижение температуры осенью происходит медленнее, чем ее повышение весной. Такое явление обусловлено близостью моря, отдающего в осенние месяцы накопленное за лето тепло.

Абсолютные минимумы температуры воздуха имеют значение порядка –30–40 °С (январь); наиболее высокие – порядка +31–+35 °С (июль, август).

В бассейне преобладают ветры юго-западного, западного и северо-западного направлений. В холодный период года преобладают ветры юго-западных и западных направлений. Различные формы рельефа трансформируют этот преобладающий поток. Повторяемость ветров юго-западной направленности горизонта (Ю, ЮЗ, З) составляет 45–50 %. Сравнительно часто (15–20 %) дуют юго-восточные ветры, связанные с юго-западной периферией сибирского антициклона или малоподвижными антициклонами Восточной Европы [3, 4, 5, 6].

Сеть пунктов метеорологических и гидрологических наблюдений, расположенных в белорусской части бассейна р. Западная Двина, представлена на рисунке 1.

Характеристика водных ресурсов

Объем стока реки Западная Двина в среднем за многолетний период наблюдений составляет 7,1 км³/год на входе в пределы республики (г. Витебск) и увеличивается на границе с Литвой до 13,9 км³/год. Среднемноголетний сток, формирующийся в пределах республики, составляет 6,8 км³/год. Объем речного стока в р. Западная Двина за многолетний период наблюдений и за 2023 год приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Речной сток Западной Двины в пределах Беларуси за многолетний период и 2023 год [7]

Створ	Площадь водосбора, тыс. км ²		Многолетние значения речного стока, км ³ /год			Речной сток 2023 г., км ³ /год
	всего	В пределах Беларуси	среднее	наибольшее	наименьшее	
Витебск	27,3	3,1	7,1	11,9	3,1	9,45
Полоцк	41,7	17,3	9,6	15,8	4,6	14,3
гр. Латвии	61,7	33,2	14,2	23,4	6,8	20,1

За водным режимом рек бассейна р. Западная Двина в пределах республики ведутся стационарные наблюдения на 21 гидрометрическом посту, из них 5 расположено на самой р. Западная Двина, 5 – на водоемах. Гидрометрический пост в г. Витебске, открытый в 1877 г., имеет наиболее длительный период наблюдений за речным стоком в этом бассейне с 1877 по 2021 гг., т. е. 145 лет. На предварительном этапе проведен статистический анализ, восстановлены пропущенные данные с помощью программного комплекса «Гидролог-2» [8]. Для исследования влияния современного потепления климата выполнен сравнительный анализ двух интервалов: 1877–1986 гг. до начала потепления и 1987–2021 гг. собственно период потепления. Кроме того, отдельно анализировались ряды наблюдений за последние 50 лет (1972–2021 гг.), т. е. расчетный период, рекомендуемый для определения статистических гидрологических характеристик.

Естественный режим стока претерпел некоторые (в основном не существенные) изменения только на небольших реках, в бассейнах которых проводятся мелиоративные работы, регулирование речных русел, созданы шлюзы, плотины и водохранилища различного хозяйственного назначения. Так, например, отмечается некоторое искажение естественного гидрологического режима рек в следующих

створах: р. Кривинка – н. п. Добригоры (с 1965 г.), р. Эсса – н. п. Гадивля (с 1963 г.), р. Усса – н. п. Казиново (с 1963 г.), р. Уша – н. п. Толкачи (с 1967 г.), р. Березовка – н. п. Сатуки (с 1962 г.), р. Ница – н. п. Соколище (с 1959 г.) [6].

В речной сети р. Западная Двина как по количеству, так и по суммарной длине, преобладают малые водотоки, в водосборах которых формируется основная часть местного речного стока.

Исходными данными послужили материалы наблюдений Государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (Белгидромет) Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь (Минприроды) за различными видами стока по действующим гидрологическим постам Беларуси за период инструментальных наблюдений по 2021 год включительно, опубликованные в государственных кадастрах. В исследованиях по оценке изменения стока за период с 1961 по 2015 гг. и его прогнозу на период до 2035 года использованы данные по девяти постам с наиболее продолжительными и непрерывными периодами наблюдений за стоком и при условии наличия данных за указанный период (таблица 3) [6].

Таблица 3 – Перечень гидрологических постов, которые используются для оценки и прогноза изменения поверхностного стока

Номер на (рисунок 1)	Наименование поста (река – населенный пункт)
1	Двина – Витебск
2	Двина – Полоцк
3	Оболь – Оболь
4	Полота – Янково
5	Нача – Нача
6	Дисна – Шарковщина
7	Березовка – Саутки
8	Дриса – Дерновичи
9	Нища – Соколище

Исследование внутренней структуры временных рядов может выполняться различными методами: построением разностных интегральных кривых, корреляционных, автокорреляционных и спектральных функций, использованием спектрально-временного анализа, причем каждый из них имеет свои преимущества и недостатки [9].

Тенденции или систематические изменения в стоке, связанные с антропогенными факторами, проявляются медленно и постепенно, что затрудняет их выявление. Лишь в отдельных случаях при слабом антропогенном влиянии тенденции прослеживаются уже при графическом анализе однородности данных наблюдений по методу аналогии.

Объективное выявление антропогенных тенденций возможно при соблюдении условия репрезентативности ряда, которая оценивается по реке-аналогу с учетом анализа четного числа периодов разной водности. После этого анализа тенденция определяется аналитически.

С достаточной для практических расчетов точностью можно использовать линейные тренды:

$$Q(t) = Q(0) \pm \Delta Q \cdot t, \quad (1)$$

где $Q(t)$ – расход воды в момент времени t , м³/с; $Q(0)$ – величина расходов воды на начало расчетного периода, м³/с; ΔQ – скорость изменения расходов воды, м³/с/год; t – календарный год.

В отдельных случаях использовались и более сложные виды трендов.

Методика прогнозирования климата

Для прогнозов изменения климата должны использоваться как глобальные, так и региональные климатические модели, которые основаны на описании процессов в динамике и базируются на численном решении систем уравнений в частных производных математической физики. Кроме того, необходимость использования климатических моделей для прогноза метеорологических показателей вместо статистических методов обработки метеорологических данных обусловлена многообразием как природных, так и антропогенных факторов – как в целом на планете, так и в регионе, которые оказывают и потенциально могут оказывать влияние на изменение климата [10, 11].

Исследования по оценке и прогнозу изменения климата для территории Беларуси, выполненные с учетом обязательств Республики Беларусь по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата, описаны нами в работе [10]. Остановимся на некоторых вопросах прогнозирования климата на территории Беларуси.

Согласно Четвертому национальному сообщению в соответствии с обязательствами Республики Беларусь по Рамочной конвенции ООН об изменении климата (2006 г.) отмечается снижение водности в бассейнах рек в период с 1988 г. с уменьшением стока от 4 до 13 % [12]. Характерным для рассматриваемого периода является изменение распределения среднемесячного стока внутри года, в первую очередь это касается зимних и весенних месяцев, когда заметно увеличиваются месячные расходы в реках на всей территории страны – на 30–90 % в январе – марте. Увеличение зимнего стока связано с увеличением частоты оттепелей и прохождением зимних паводков. В апреле и мае сток резко уменьшается. В Сообщении приведено общее заключение о снижении максимального стока рек бассейна Западной Двины.

В Пятом национальном сообщении Республики Беларусь в соответствии с обязательствами по Рамочной конвенции ООН об изменении климата (2009 г.) используется модель LEAP [13].

В Сообщении приводится заключение, что «изменение климата приведет к увеличению изменчивости стока, увеличению повторяемости экстремальных явлений (засух, интенсивных паводков)».

В Беларуси исследования по изучению климата также проводятся и в рамках проекта трансграничного сотрудничества TACIS SKPI «Оказание поддержки в реализации Киотского протокола в странах СНГ» [14]. В рамках этого проекта используются модели – ECHAM5, модель Института Макса Планка атмосферной циркуляции и модель CSIRO Mk3 биопродуктивности.

Выполненные исследования позволили сделать ряд обобщений:

- ожидается увеличение количества дней с положительными температурами в конце зимы;
- разница между 1990 годом и нынешним климатом составила +1,2 °C;
- на более ранние периоды сместится дата устойчивого перехода температуры через 0 °C;
- продолжится рост осадков в зимние месяцы и сокращение осадков в ранневесенние месяцы, особенно на юге страны.

Согласно этому сценарию в XXI веке средняя температура приземного воздуха в целом по территории Беларуси будет продолжаться повышаться, в первую очередь за счет повышения минимальных температур. Перечисленные тенденции, как и многие другие особенности изменяющегося климата, окажут существенные воздействия на условия жизни граждан и экономическую деятельность. Последствия быстрой изменчивости климатических условий будут проявляться в росте повторяемости опасных гидрометеорологических явлений и неблагоприятных резких изменений погоды, которые приводят к социально-экономическому ущербу, непосредственно влияют на эффективность деятельности таких жизненно важных отраслей экономики, как сельскохозяйственное производство, лесное хозяйство, энергетика, транспорт, строительство, жилищно-коммунальное хозяйство, а также на здоровье людей [15].

На основании анализа данных Республиканского гидрометеорологического центра (РГМЦ) его сотрудниками были получены следующие результаты.

В Беларуси на конец XX и начало XXI века пришелся самый продолжительный период потепления за все время инструментальных наблюдений за температурой воздуха на протяжении последних почти 130 лет. Особенность этого потепления не только в небывалой его продолжительности, но и в более высокой температуре воздуха, которая в среднем за двадцать лет (1989–2009 гг.) превысила климатическую норму на 1,1 °C. Из двадцати самых теплых лет, начиная с послевоенного периода (1945 года), шестнадцать лет приходится на период 1989–2010 годы.

Повышение температурного режима произошло практически в каждом месяце. Рост температуры воздуха наиболее значителен в зимние и первые весенние месяцы. Намечается тенденция увеличения продолжительности безморозкового периода. Майские заморозки различной интенсивности наблюдаются ежегодно, и они наиболее опасны, особенно для теплолюбивых культур. Опасность осенних заморозков не столь значительна, так как увеличение температуры воздуха в весенние и летние месяцы определяет ускоренное созревание сельскохозяйственных культур.

Повышенные температуры первых весенних месяцев приводят к более раннему сходу снежного покрова и переходу температуры воздуха через 0 °C в сторону повышения. В среднем за рассматриваемый период этот переход происходил на 10–15 дней раньше средних многолетних значений. Продолжительность периода со снежным покровом в Республике Беларусь сократилась на 10–15 дней, а глубина промерзания уменьшилась на 6–10 см. На декаду раньше начинается вегетационный период.

В научно-методическом контексте всестороннее изучение изменения климата и его последствий для экономики Беларуси проведено академиком В. Ф. Логиновым [16]. В его работах проводится сравнительный анализ различных моделей циркуляции атмосферы и океана (МОЦА). По его данным, наилучшим образом моделирует данные базового периода модель HadCM2 (Великобритания) и учитывает совместное увеличение парниковых газов и сульфатных аэрозолей. Несколько худшие результаты сравнения показывают модели CSIRO Mk2 (Австралия) и CGCM1 (Канада).

Прогнозные данные с использованием модели HadCM2 на период 2010–2039 гг. показывают увеличение среднегодовой температуры воздуха на 1 °C, при этом среднегодовая дневная температура повышается на 0,92 °C, а ночная – на 1,15 °C. Приращения сумм

температур выше 0, 5 и 10 °С ожидаются примерно одинаковыми и составляют приблизительно 200–220 °С, приращение сумм для 15 °С значительно выше.

Существующие оценки изменений климата для территории Беларуси не противоречат концепции глобального потепления климата. В последние десятилетия намечается четко выраженная тенденция потепления, особенно в зимние и весенние месяцы (I–IV). Наконец XX – начало XXI века приходится самый продолжительный период потепления за весь более чем 120-летний период систематических инструментальных наблюдений в Беларуси.

Следует отметить, что приведенные результаты исследований и оценок, выполненных в Беларуси, носят наиболее общий и приближенный характер. В разрезе речных бассейнов оценка воздействия глобального изменения климата на водные ресурсы в Беларуси исследована недостаточно. Можно отметить лишь отдельные работы [17, 18, 6, 19].

Методология оценки воздействия изменения климата на сток рек

Для прогнозных оценок изменения стока рек бассейнов адаптирован метод гидролого-климатических расчетов (ГКР), предложенный В. С. Мезенцевым, основанный на совместном решении уравнений водного и теплоэнергетического балансов [20]. Положив в основу гидролого-климатическую гипотезу В. С. Мезенцева [20], разработана многофакторная модель, включающая стандартное уравнение водного баланса участка суши с независимой оценкой основных элементов баланса (атмосферные осадки, суммарное испарение и климатический сток) в годовом разрезе. Разработанная модель использована для оценки возможных изменений водных ресурсов рек в зависимости от тех или иных гипотез климатических колебаний и антропогенных воздействий на характеристики водосборов.

Уравнение водного баланса речного водосбора за некоторый промежуток времени имеет вид:

$$H(I) = E(I) + Y_K(I) \pm \Delta W(I), \quad (2)$$

где $H(I)$ – суммарные ресурсы увлажнения, мм; $E(I)$ – суммарное испарение, мм; $Y_K(I)$ – суммарный климатический сток, мм; $\Delta W(I)$ – изменение влагозапасов деятельного слоя почвогрунтов, мм; I – интервал осреднения.

Суммарное испарение находится по формуле

$$E(I) = E_m(I) \left[1 + \left(\frac{\frac{E_m(I)}{W_{HB}} + V(I)^{1-r(I)}}{KX(I) + g(I) + V(I)} \right)^{\frac{1}{n(I)}} \right], \quad (3)$$

где $E_m(I)$ – максимально возможное суммарное испарение, мм; W_{HB} – наименьшая влагоемкость почвы, мм; $V(I) = W(I) / W_{HB}$ – относительная влажность почвогрунтов на начало расчетного периода; $KX(I)$ – сумма измеренных атмосферных осадков, мм; $g(I)$ – грунтовая составляющая водного баланса, мм; $r(I)$ – параметр, зависящий от водно-физических свойств и механического состава почвогрунтов; $n(I)$ – параметр, учитывающий физико-географические условия стока.

Относительная влажность почвы на конец расчетного периода определяется из соотношений

$$V(I+1) = V(I) \cdot \left(\frac{V_{cp}(I)}{V(I)} \right)^{r(I)}; \quad (4)$$

$$V_{cp}(I) = \left(\frac{KX(I) + g(I) + V(I)}{\frac{E_m(I)}{W_{HB}} + V(I)^{1-r(I)}} \right)^{\frac{1}{r(I)}}. \quad (5)$$

Полученные значения $V_{cp}(I)$ сравнивают с относительной величиной полной влагоемкости $V_{пв}$. Если $V_{cp}(I) \leq V_{пв}$, то принимается расчетное значение относительной средней влажности, в противном случае, когда $V_{cp}(I) \geq V_{пв}$ к расчету принимается $V_{cp}(I) = V_{пв}$, разница $(V_{cp}(I) - V_{пв}) \cdot W_{HB}$ относится к поверхностному стоку.

Величина атмосферных осадков в месяцы холодного периода за вычетом величины суммарного испарения переносится на период половодья, т. е. на март месяц.

Максимально возможное суммарное испарение определялось по методике, описанной в работе [21, 22].

Суммарные ресурсы увлажнения определяются следующим образом:

$$H(I) = KX(I) + W_{HB}(V(I) - V(I+1)). \quad (6)$$

Решение системы уравнений (2) – (6) осуществляется методом итераций до тех пор, пока значение относительной влажности почвогрунтов на начало расчетного интервала не будет равно значению относительной влажности на конец последнего интервала. При расчете начальное значение влажности принимается равным значению наименьшей влагоемкости, т. е. $W(1) = W_{HB}$, откуда $V(1) = 1$. Сходимость решения метода ГКР достигается уже на четвертом шаге расчета.

Корректировка климатического стока осуществляется с помощью коэффициентов, учитывающих влияние различных факторов на формирование руслового стока, т. е.

$$Y_p(I) = k(I) \cdot Y_K(I), \quad (7)$$

где $Y_p(I)$ – суммарный русловый сток, мм; $k(I)$ – коэффициент, учитывающий гидрографические характеристики водосбора.

Моделирование водного баланса исследуемой реки реализовано нами в виде компьютерной программы и осуществляется в два этапа. На первом этапе производится настройка модели по известным составляющим водного и теплового балансов исследуемой реки. При настройке модели преследуется цель достичь наибольшего соответствия рассчитанного климатического и руслового стоков. Первый этап заканчивается построением графиков климатического и руслового стока и выводом ошибки моделирования.

Хорошее совпадение измеренного и рассчитанного стока свидетельствует о корректности модели. Полученные параметры модели использованы при проведении численного эксперимента.

Второй этап представляет собой непосредственный расчет водного баланса исследуемой реки, используя параметры, полученные при калибровке модели. Расчет элементов водного баланса исследуемой реки производится с учетом конкретных особенностей рассматриваемого водосбора [23].

Результаты моделирования свидетельствуют о высокой точности расчета водного баланса как для практического применения, так и для теоретических исследований, что проверено на большом количестве рек Беларуси с площадью водосбора около 1000 км², на которых ведутся гидрометрические наблюдения. Таким образом, при наличии данных об атмосферных осадках, температуре воздуха, дефицитах влажности воздуха на расчетный период и современные значения стока воды реки, а также гидрографических характеристик водосбора, с помощью приведенной методики возможно получить прогнозные оценки водного баланса малых рек Беларуси на расчетную перспективу.

Решение уравнения водного баланса для водосбора связано с определением среднего значения тех элементов, наблюдения за которыми ведутся в отдельных точках водосбора. Поэтому одной из главных составляющих моделирования водного режима является корректная оценка климатических характеристик и их осреднение по водосбору. Подробно эта задача рассмотрена в работе [24].

При настройке моделей по предлагаемой методике возникли проблемы с определением параметров для зимних месяцев. Дело в том, что модель недостаточно точно учитывала участвовавшие в последнее время оттепели. Поэтому проведена корректировка модели, учитывающая оттепели. Полученная при настройке модели разница между русловым и климатическим стоком относилась к стоку, сформировавшемуся во время оттепелей, которая фиксировалась в настройках модели. При прогнозировании стока будущего эта составляющая добавлялась непосредственно к стоку, а ее величина отнималась от атмосферных осадков соответствующего месяца и на период половодья переносилась осадки за вычетом суммарного испарения и стока в период оттепелей. Причем величина стока в период оттепелей корректировалась с учетом прогнозируемой температуры соответствующего месяца. В первом приближении величину этого стока можно принять из соотношения месячных температур воздуха и величины стока, в период оттепелей полученной при настройке модели.

Прогнозные оценки изменения стока рек осуществлялись по следующей схеме. Настраивалась модель по средним многолетним данным по речному стоку, атмосферным осадкам, температуре воздуха и дефицитам влажности воздуха. Затем вводились прогнозные величины для соответствующей перспективы по тем метеостанциям, которые были использованы при настройке модели. Считывались параметры настройки модели, и осуществлялась прогнозная оценка. Полученные значения климатического стока сравнивались между собой по соотношению $\Delta_{кл.} = Y_{кл.}^{пр.} / Y_{кл.}^{cos.} \cdot 100\%$. Непосредственная прогнозная оценка руслового стока находилась из соотношения $Q^{пр.} = Q^{cos.} \cdot \Delta_{кл.} \cdot 100, м^3 / с$.

Пример моделирования среднегогодового годового стока и его внутригодового распределения (калибровка модели и прогноз) для р. Дисна – Шарковщина представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Измеренный и рассчитанный сток р. Дисны в створе Шарковщины

Полученные результаты и их обсуждение

Анализ многолетних колебаний годового стока

Годовой сток

В ходе исследований проведен статистический анализ многолетних колебаний годового стока р. Западная Двина в створе г. Витебска за период 1877–2021 гг. с целью выявления квазипериодичности и тренда.

Хронологический ход среднегодовых расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебска представлен на рисунке 3.

Основные статистические характеристики анализируемых рядов помещены в таблицу 4.

Статистически значимых различий в средних величинах расходов воды за период с 1877–1986 гг. и 1987–2021 гг. не установлено. Критическое значение односторонний критерий Стьюдента составляет $t_{кр} = 1,67$, в то время как t -статистика = 1,17. Различий в дисперсиях (коэффициентах вариации) не установлено. Существенно изменился коэффициент асимметрии, что необходимо учитывать при подборе кривых распределения вероятностей. Существенно трансформировался градиент изменения стока, который подтверждается коэффициентом корреляции. Полученные результаты хорошо согласуются с полученными нами ранее результатами [26, 27].

Уточнение водных ресурсов бассейна Западной Двины в Беларуси

В течение последних лет водные ресурсы страны были подвержены трансформации в силу воздействия естественных и антропогенных факторов на сток. Уточненные поверхностные водные ресурсы бассейна Западной Двины за период с 1956 по 2015 гг. и данные о трансформации стока на исследуемом 60-летнем интервале по отношению к периоду инструментальных наблюдений до 1996 г. по бассейну Западной Двины приведены в таблице 5.

Суммарные поверхностные ресурсы бассейна Западной Двины практически не изменились. В то же время произошло перераспределение естественных водных ресурсов по бассейнам отдельных рек. Имеет место незначительный рост водности Западной Двины за последние годы.

Для рек бассейна Западной Двины характерно незначительное увеличение значений стока. Изменения объемов стока рек и гидрологического режима в современных условиях вызваны усилением интенсивности общей циркуляции атмосферы.

Весенние половодья

В ходе исследований проведен статистический анализ многолетних колебаний максимальных расходов воды весеннего половодья р. Западная Двина в створе г. Витебска за период 1877–2021 гг. с целью выявления квазипериодичности и тренда.

Хронологический ход максимальных расходов воды весеннего половодья р. Западная Двина в створе г. Витебска представлен на рисунке 4.

Основные статистические характеристики анализируемых рядов помещены в таблице 6.

Статистически значимо различие в максимальных расходах воды весеннего половодья за период с 1877–1986 гг. и 1987–2021 гг. Критическое значение односторонний критерий Стьюдента составляет $t_{кр} = 1,67$, в то время как t -статистика = 4,85. Существенных различий в дисперсиях (коэффициентах вариации) не установлено. Существенно трансформировался градиент изменения стока, который подтверждается коэффициентом корреляции.

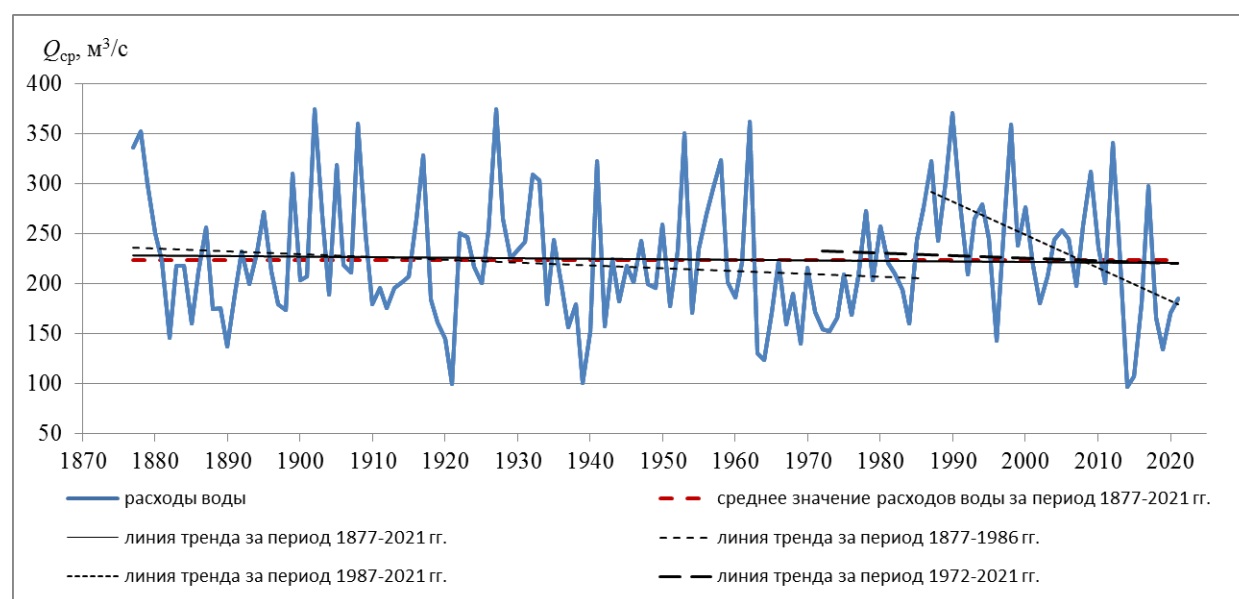


Рисунок 3 – Хронологический ход среднегодовых расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебска

Примечание – Легенда на рисунках 4–6 соответствует легенде, представленной на рисунке 3.

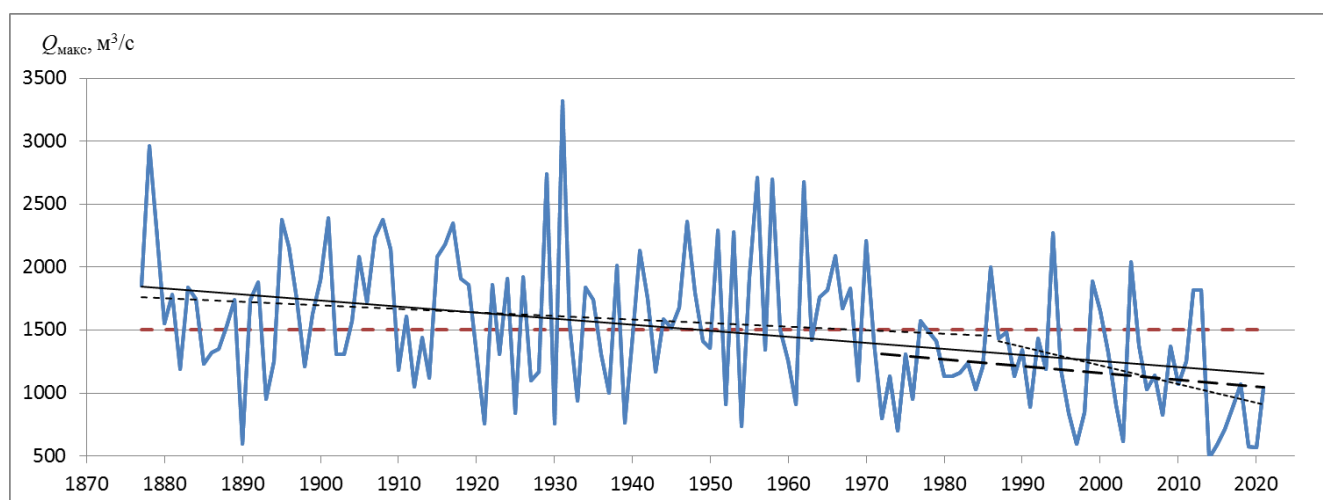
Таблица 4 – Основные статистические характеристики среднегодовых расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебска за различные интервалы осреднения

Характеристики	Период осреднения, г.			
	1877–2021 (145 лет)	1877–1986 (110 лет)	1987–2021 (35 лет)	1972–2021 (50 лет)
$Q_{\text{ср}}$, м ³ /с	224	221	236	227
C_v	0,28	0,27	0,28	0,27
C_s	0,49	0,69	–0,04	0,21
$r(1)$	0,28	0,24	0,34	0,38
ΔQ 10, м ³ /с	–0,54	–2,75	–32,9	–2,54
r	–0,04	–0,15	–0,51	–0,06
$r_{\text{кр}, p=5\%}$	0,163	0,188	0,326	0,275
% от $Q_{\text{ср}}$	–0,24	–1,25	–13,96	–1,12

Примечание: $Q_{\text{ср}}$ – среднегодовое значение годовых расходов воды; C_v – коэффициент вариации; C_s – коэффициент асимметрии; $r(1)$ – коэффициент автокорреляции; ΔQ 10 – градиент изменения расходов воды за 10 лет; r – коэффициент корреляции модели (1); $r_{\text{кр}, p=5\%}$ – критические значения коэффициента корреляции [25]; % от $Q_{\text{ср}}$ – процентные изменения расходов воды за 10 лет к среднегодовому значению годовых расходов воды. Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции.

Таблица 5 – Естественные ресурсы бассейна Западной Двины и Беларуси в целом в 1956–2015 гг. (числитель) и изменение стока по отношению к периоду до 1996 г. (знаменатель)

Речной бассейн	Речной сток, км ³ /год									
	местный					общий				
	Обеспеченность, %					Обеспеченность, %				
	5	25	50	75	95	5	25	50	75	95
Западная Двина	<u>10,6</u> 0,1	<u>7,8</u> 0,1	<u>6,9</u> 0,1	<u>5,5</u> 0,0	<u>4,4</u> 0,1	<u>22,3</u> 0,4	<u>16,4</u> 0,2	<u>14,1</u> 0,2	<u>11,6</u> 0,3	<u>9,0</u> 0,4
В целом по Беларуси	<u>51,8</u> 0,3	<u>37,9</u> 0,4	<u>34,1</u> 0,1	<u>28,1</u> –0,2	<u>22,7</u> –0,1	<u>88,2</u> 1,1	<u>64,3</u> 0,9	<u>56,9</u> 0,7	<u>46,4</u> 0,2	<u>37,5</u> 1,2

**Рисунок 4** – Хронологический ход максимальных расходов воды весеннего половодья р. Западная Двина в створе г. Витебска**Таблица 6** – Основные статистические характеристики максимальных расходов воды весеннего половодья р. Западная Двина в створе г. Витебска за различные интервалы осреднения

Характеристики	Период осреднения, г.			
	1877–2021 (145 лет)	1877–1986 (110 лет)	1987–2021 (35 лет)	1972–2021 (50 лет)
$Q_{\text{ср}}$, м ³ /с	1501	1608	1162	1179
C_v	0,37	0,33	0,39	0,35
C_s	0,52	0,52	0,57	0,55
$r(1)$	0,11	–0,06	0,23	0,22
ΔQ 10, м ³ /с	–48,31	–28,52	–146,88	–55,04
r	–0,37	–0,17	–0,33	–0,19
$r_{\text{кр}, p=5\%}$	0,163	0,188	0,326	0,275
% от $Q_{\text{ср}}$	–3,22	–1,77	–12,64	–4,67

Водный режим р. Западная Двина в общем отличается от режима средних и малых рек. Гидрограф весеннего половодья р. Западная Двина характеризуется значительной крутизной как на подъеме, так и на спаде, и лишь в некоторые годы при замедленном и прерывистом снеготаянии весеннее половодье состоит из нескольких волн. Высота весеннего подъема в среднем 6–7 м, а в годы с высоким половодьем уровень может повышаться до 9–12 м над предподъемным.

Для каждого бассейна характерна своя форма гидрографа весеннего половодья в связи с различными природными факторами (рельеф и конфигурация, залесенность и заболоченность территории бассейна). На малых реках половодье проходит несколькими волнами, на больших – носит ступенчатый характер при затяжном таянии снега; при быстром снеготаянии половодье проходит одной волной с резким интенсивным подъемом и более плавным спадом. Однако в годы с весьма недружным развитием весенних процессов при замедленном и прерывистом снеготаянии весеннее половодье проходит несколькими волнами.

На снижение максимума и увеличение продолжительности половодья оказывает влияние лес (степень залесенности, характер размещения) и болота, сток с которых замедлен в связи с малыми уклонами. Половодье, в зависимости от величины реки, продолжается 30–120 суток, ширина разливов во время половодья колеблется от 0,1–0,2 до 1–2 км, глубина затоплений – от 1–1,5 до 2–2,5 м, их длительность – 7–10 суток [28]. Спад весеннего половодья продолжается в среднем 30–40 дней, а на реках с заболоченными и значительно залесенными водосборами несколько дольше – до 60 дней.

Относительно регулярные наблюдения за гидрологическими параметрами стока рек начаты в конце XIX в. Однако несистематизированные сведения об уровнях и расходах в ранний период в силу отсутствия высотной привязки не используются в практике гидрологических расчетов обеспеченных величин. Гидрологические характеристики половодий для р. Западная Двина, полученные на основании обработки однородных рядов наблюдений речного стока, приведены в таблице 7 [28].

Характеристика наводнений на реках бассейна Западной Двины

В целом для рек бассейна Западной Двины на Беларуси природной генетической основой формирования наводнений являются факторы половодий, такие как степень осеннего увлажнения почвы, дата наступления зимнего периода, высота снежного покрова, дружность весны, отсутствие резких колебаний температуры и заморозков, промерзание почвы.

В таблице 8 представлены наиболее значительные наводнения на реках бассейна Западной Двины, вызванные весенним половодьем за период инструментальных наблюдений [29].

За последнее время опасные высокие уровни воды на реках бассейна Западной Двины наблюдались в 2010, 2011, 2012, 2013, 2018, 2021 годах, максимальные из них приведены в таблице 9. Как видно из таблицы 9, максимальные опасные уровни наблюдались в 2010 и в 2013 годах. В формировании половодья 2010 года особую роль сыграли большие снегозапасы (больше нормы на 20–100 %), толщина ледяного покрова была больше нормы на 3–10 см.

Таблица 7 – Гидрологические характеристики половодий для Западной Двины

Створ	Уровни весеннего половодья, см над "0" графика			Отметка выхода воды на пойму, см над "0" графика
	1 %	25 %	50 %	
г. Полоцк	1409	1060	933	1195
г. Верхнедвинск	1420	1062	898	950

Таблица 8 – Годы с наводнениями в период весенних половодий

Река-пост	Характеристика наводнения		
	катастрофическое $P < 1 \%$	выдающееся $P = 1-2 \%$	большое $P = 3-10 \%$
Западная Двина – г. п. Сураж		1929, 1931, 1956	1878, 1895, 1901, 1908, 1915, 1917, 1958, 1962
Западная Двина – г. Витебск	1931	1878, 1929, 1956	1958, 1962
Западная Двина – г. п. Улла	1931	1941, 1951, 1956	
Западная Двина – г. Полоцк	1931	1951, 1956	1941, 1953, 1958, 1962
Западная Двина – г. Верхнедвинск	1931	1956	1958, 1962
Оболь – г. п. Оболь		1956	1938, 1951, 1953, 1955, 1958, 1962, 1965
Дисна – г. п. Шарковщина	1931	1951	1953, 1956, 1958

Таблица 9 – Опасные уровни воды весеннего половодья за период 2010–2021 гг. на водосборе Западной Двины

Река – пост	Отметка «0» поста, м БС	Опасный высокий уровень над нулем поста, см	Уровень воды над нулем поста, см	
			максимальный и дата наблюдений	при затоплении и дата наблюдений
Западная Двина – Полоцк	106,14	1050	1097 22.04.2013	1065 5.04.2010
Западная Двина – Верхнедвинск	99,38	840	1098 23.04.2013	911 17.04.2013
Улла – Бочейково	119,52	650	672 30 31.03.2010	655 29.03.2010
Дисна – Шарковщина	116,52	600	778 21.04.2013	680 18.04.2013

Изменения максимальных расходов воды весеннего половодья и их причины

В последнее время большую роль в увеличении частоты и разрушительных наводнений помимо природных факторов играют антропогенные воздействия. Среди них в первую очередь следует назвать сведение лесов (максимальный поверхностный сток возрастает на 250–300 %), освоение поймы, нерациональное ведение сельского хозяйства и др. Существенное уменьшение максимального, увеличение минимального зимнего и минимального летне-осеннего стока связано как с природными факторами, так и с освоением пойм, служащих природными регуляторами стока.

Наибольший расход воды р. Западная Двина у г. Витебска наблюдался в 1931 г. и составил 3320 м³/с, что соответствует обеспеченности $P = 0,7 \%$.

С середины 60-х гг. прошлого столетия максимальный сток имеет тенденцию к снижению, что подтверждает проверка на статистическую значимость средних величин за различные периоды. Так, статистически различимыми на 5%-ом уровне значимости являются средние за период с 1877 по 1965 гг. ($\bar{Q} = 1670 \text{ м}^3/\text{с}$) и с 1966 по 2021 гг. ($\bar{Q} = 1440 \text{ м}^3/\text{с}$), а также средние за период с 1877 по 1986 гг. ($\bar{Q} = 1610 \text{ м}^3/\text{с}$) и с 1986 по 2021 гг. ($\bar{Q} = 1160 \text{ м}^3/\text{с}$). В текущем столетии расходы воды весеннего половодья превышали норму в 2000 г. ($Q = 1650 \text{ м}^3/\text{с}$), в 2004 г. ($Q = 2040 \text{ м}^3/\text{с}$), в 2012 г. и 2013 г. ($Q = 1820 \text{ м}^3/\text{с}$).

Таким образом, на всех реках бассейна Западной Двины имеет тенденция к снижению стока весеннего половодья, независимо от их географического положения, что подтверждают уравнения линии тренда (таблица 6).

По результатам проверки на значимость выявлено, что для всех рек коэффициенты корреляции являются статистически значимыми.

Устойчивость выборочных статистик (средних, коэффициентов вариации, коэффициентов автокорреляции) временных рядов максимальных расходов воды весеннего половодья оценивалась для четырех периодов (таблица 6).

Анализ средних максимальных расходов воды весеннего половодья для рассматриваемых периодов показывает, что произошли существенные уменьшения максимального стока. Это обусловлено в первую очередь многолетними климатическими процессами, выраженными увеличением числа и продолжительностью оттепелей в зимний период. Что касается размаха колебаний, то, судя по коэффициентам автокорреляции, отвергать нулевую гипотезу нет оснований и различия в их значениях следует признать не существенными.

Таблица 10 – Обеспеченные величины максимальных расходов воды весеннего половодья р. Западная Двина в створе г. Витебска за различные периоды, м³/с

Период	Обеспеченность, %			
	1	5	10	50
1877–2021	3060	2530	2260	1510
1877–1965	3170	2680	2430	1670
1966–2021	2520	2080	1860	1240
Изменения, %	–20,5	–22,4	–23,5	–25,7

Как показал анализ таблицы 10, имеет место существенные расхождения в обеспеченных величинах за рассматриваемые периоды. Это означает, что при разработке вероятностных прогнозов необходимо учитывать факт неоднородности временных рядов максимальных расходов воды весеннего половодья рек бассейна р. Западная Двина.

Анализ пространственной структуры изменения максимальных расходов воды весеннего половодья позволяет утверждать, что практически на всем бассейне р. Западная Двина произошло изменение стока весеннего половодья в сторону уменьшения.

Масштабы гидромелиоративных работ в бассейне р. Западная Двина значительно меньше, чем в бассейне р. Припять, тем не менее, падение максимальных расходов воды весеннего половодья на этих реках согласовано. Можно предположить, что основная причина, вызвавшая уменьшение максимальных расходов воды весеннего половодья рек бассейна р. Западная Двина, носит природный характер и в меньшей степени связана с антропогенными воздействиями [6].

Анализ многолетнего хода максимальных расходов воды весеннего половодья рек бассейна Западной Двины показал, что на всех реках наблюдается тенденция к снижению стока весеннего половодья, особенно явно выраженная с середины 60-х годов прошлого столетия. Для количественной оценки этих трансформаций построены линии трендов для различных периодов осреднения (таблица 6).

Минимальный сток

Летне-осенняя межень обычно наступает в конце мая – середине июня и заканчивается в октябре. В некоторые годы при дружном прохождении весеннего половодья период низкого стока на реках бассейна Западной Двины начинается в конце апреля – начале мая, а в годы затяжного половодья или когда на его спаде идут дожди – в конце июня – начале июля. Средняя продолжительность летне-осенней межени на малых и средних реках до 140–165 суток, до 96 суток на р. Западная Двина в створе г. Витебска. Почти каждый год межень прерывается значительными дождевыми паводками и складывается из двух, в отдельные годы из III–IV четырех периодов. Наиболее прерывистой меженью характеризуются реки Витебской возвышенности. Относительно устойчивая межень в бассейне р. Западная Двина. Сток летне-осенней межени на малых и средних реках составляет 5–20 %, на самой р. Западная Двина – 7–12 % годового. Величина среднего слоя стока межени на малых и средних реках колеблется от 3 до 50 мм. Наибольшая величина слоя стока (25–50 мм) наблюдается на возвышенностях, наименьшая (около 3 – 15 мм) на низинах. Наиболее маловодный

Заметное снижение максимальных расходов воды весеннего половодья в конце XX века вызвано увеличением количества оттепелей зимой, во время которых значительные снежные запасы трансформируются в сток зимней межени. Это вызывает увеличение зимнего стока, а порой приводит к зимним паводкам и снижает максимальные расходы весной.

Для подтверждения данной гипотезы приведен многолетний ход расходов минимального зимнего стока, который имеет тенденцию к увеличению, что подтверждается положительным линейным трендом.

По результатам проверки на значимость линейных трендов выявлено, что для р. Западная Двина в створе г. Витебска их коэффициенты корреляции являются статистически значимыми на 5 %-ом уровне для периодов – 1877–2021 гг. и 1987–2021 гг.

В связи с наличием тенденций уменьшения стока выполнен сравнительный анализ изменения обеспеченных величин максимальных расходов воды весеннего половодья за периоды: 1877–1965 гг. и 1966–2021 гг. Используя распределение Пирсона III типа получены обеспеченные величины стока для рассматриваемых периодов (таблица 10).

период преимущественно в июле – августе. Особенно низкие уровни наблюдаются в период засухи. Продолжительность маловодного периода на малых и средних реках 5–30 суток.

Основные статистические характеристики анализируемых рядов помещены в таблицу 11.

Статистически значимых различий в минимальных летне-осенних расходах воды за период с 1877–1986 гг. и 1987–2021 гг. не установлено. Критическое значение односторонний критерий Стьюдента составляет $t_{кр} = 1,67$, в то время как t -статистика = 0,47. Различий в дисперсиях (коэффициентах вариации) не установлено. Существенно изменился коэффициент асимметрии, что необходимо учитывать при подборе кривых распределения вероятностей. Существенно трансформировался градиент изменения стока, который подтверждается коэффициентом корреляции. Полученные результаты хорошо согласуются с полученными нами ранее результатами [30].

Зимняя межень обычно устанавливается в конце ноября – середине декабря. Наиболее ранние даты наступления межени попадают на конец октября – начало ноября, наиболее поздние – на январь, заканчивается зимняя межень обычно в марте, крайние сроки межени – февраль – апрель. В отдельные годы межень прерывается зимними паводками от оттепелей и складывается из II–IV периодов. Наиболее устойчивая зимняя межень в Беларуси наблюдается на реках бассейна Западной Двины. Сток зимней межени составляет 5–15 % годового стока (от 3 до 45 мм годового стока). Наиболее маловодный период зимней межени преимущественно в феврале и марте. Продолжительность его на малых и средних реках до 60 суток, на р. Западная Двина – до 70 суток. В наиболее маловодные периоды на отдельных малых реках возможно отсутствие стока как летом (пересыхание рек), так и зимой (перемерзание рек). В период межени местами возникает дефицит воды для использования в промышленности, сельском хозяйстве (особенно для обеспечения мелиоративных систем при двухстороннем регулировании водного режима) и коммунальном хозяйстве. Низкие уровни, уменьшение глубин в реках усложняют речное судоходство и лесосплав. Для предупреждения этого, а также для рационализации использования водных ресурсов проводится перераспределение речного стока, строятся водохранилища. Уровни и расходы воды в реках в период межени сперва определяют при помощи гидрологических прогнозов, что позволяет планировать мероприятия по предотвращению нехватки воды.

Основные статистические характеристики анализируемых рядов помещены в таблицу 12.

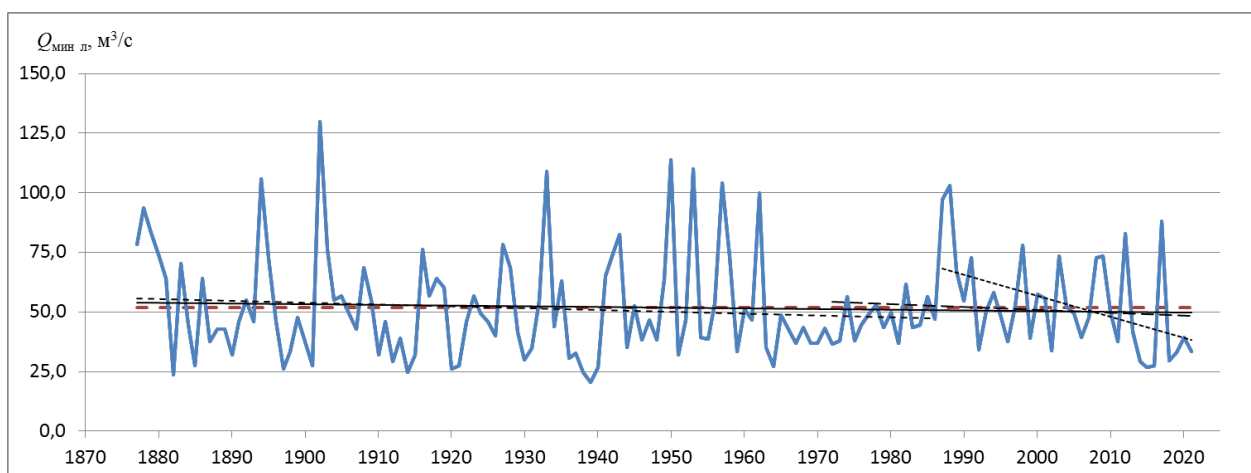


Рисунок 5 – Хронологический ход минимальных летне-осенних расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебска

Таблица 11 – Основные статистические характеристики минимальных летне-осенних расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебска за различные интервалы осреднения

Характеристики	Период осреднения, гг.			
	1877–2021 (145 лет)	1877–1986 (110 лет)	1987–2021 (35 лет)	1972–2021 (50 лет)
Q_{cp} , м³/с	51,9	51,4	53,3	51,3
C_v	0,41	0,42	0,38	0,35
C_s	1,22	1,36	0,76	1,07
$r(1)$	0,16	0,17	0,18	0,14
ΔQ 10, м³/с	–0,31	–0,76	–8,86	–1,17
r	–0,06	–0,11	–0,44	–0,10
$r_{кр, p=5\%}$	0,163	0,188	0,326	0,275
% от Q_{cp}	–0,60	–1,48	–16,62	–2,28

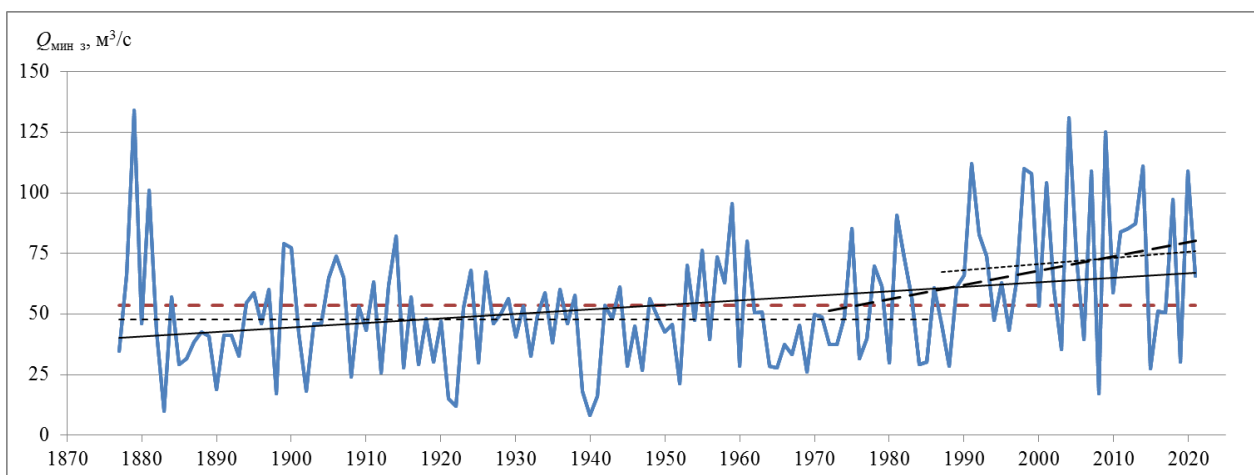


Рисунок 6 – Хронологический ход минимальных зимних расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебска

Таблица 12 – Основные статистические характеристики минимальных зимних расходов воды р. Западная Двина в створе г. Витебска за различные интервалы осреднения

Характеристики	Период осреднения, гг.			
	1877–2021 (145 лет)	1877–1986 (110 лет)	1987–2021 (35 лет)	1972–2021 (50 лет)
Q_{cp} , м³/с	53,5	47,8	71,7	65,8
C_v	0,48	0,43	0,43	0,45
C_s	0,89	0,85	0,19	0,44
$r(1)$	0,07	0,02	–0,30	–0,14
ΔQ 10, м³/с	1,86	0,02	2,48	5,88
r	0,30	0,00	0,08	0,29
$r_{кр, p=5\%}$	0,163	0,188	0,326	0,275
% от Q_{cp}	3,47	0,04	3,45	8,93

Наблюдается статистически значимый рост минимальных зимних расходов воды за период с 1987–2021 гг. по отношению к периоду 1877–1986 гг. Критическое значение односторонний критерий Стьюдента составляет $t_{кр} = 1,68$, в то время как t -статистика = 4,29. Различий в дисперсиях (коэффициентах вариации) не установлено. Существенно изменился коэффициент асимметрии, что необходимо учитывать при подборе кривых распределения вероятностей. Существенно трансформировался градиент изменения стока в целом за рассматриваемый период, а также за период с 1972 по 201 гг., что подтверждается коэффициентами корреляции.

Наблюдаемые изменения климата

Тенденции изменения климата за прошедший репрезентативный период времени с учетом мирового опыта проведения таких оценок определены с использованием статистических методов.

При этом в качестве репрезентативных периодов принимаются периоды с 1986 г. по 2010 г. (настоящее время) по отношению к периоду с 1961 по 1985 гг. с учетом мирового опыта определения тенденций изменения текущего состояния климатических характеристик.

Для анализа тенденций изменения климатических данных использовались детальные данные измерений с 1961 по 2010 гг.

в суточном разрезе: среднесуточные значения температуры воздуха и суммы осадков по метеорологическим станциям в бассейне р. Западная Двина – Верхнедвинск, Лепель, Витебск.

Данные получены из Интернета [31] из открытой базы данных международного проекта «European Climate Assessment and Dataset» (Оценка климата в Европе и общая база данных). Координация проекта осуществлялась Королевским метеорологическим институтом Нидерландов (Royal Netherlands Meteorological Institute – KNMI) с участием 56 национальных метеорологических агентств и гидрологических служб.

Для точной оценки изменений климатических характеристик в бассейне реки Западной Двины выполнена статистическая обработка рядов данных в месячном разрезе с определением изменения температуры воздуха (на сколько °C) и количества осадков (на сколько %) за период с 1986 по 2011 гг. по отношению к периоду с 1961 по 1985 гг. с учетом статистической значимости сравнения двух выборок. Поэтому принимается гипотеза о том, что статистически значимых различий не обнаружено.

Результаты определения изменения климатических характеристик за период с 1961 по 2010 год в графическом виде представлены на рисунках 7, 8.

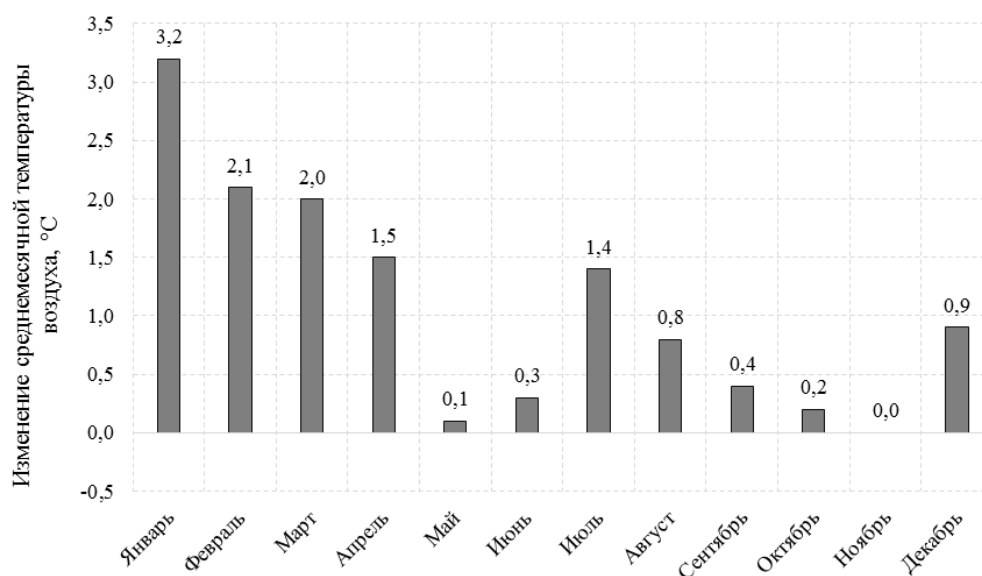


Рисунок 7 – Общая оценка изменения среднемесячной температуры воздуха (°C) в бассейнах рек Западная Двина (1986–2010) – (1961–1985)

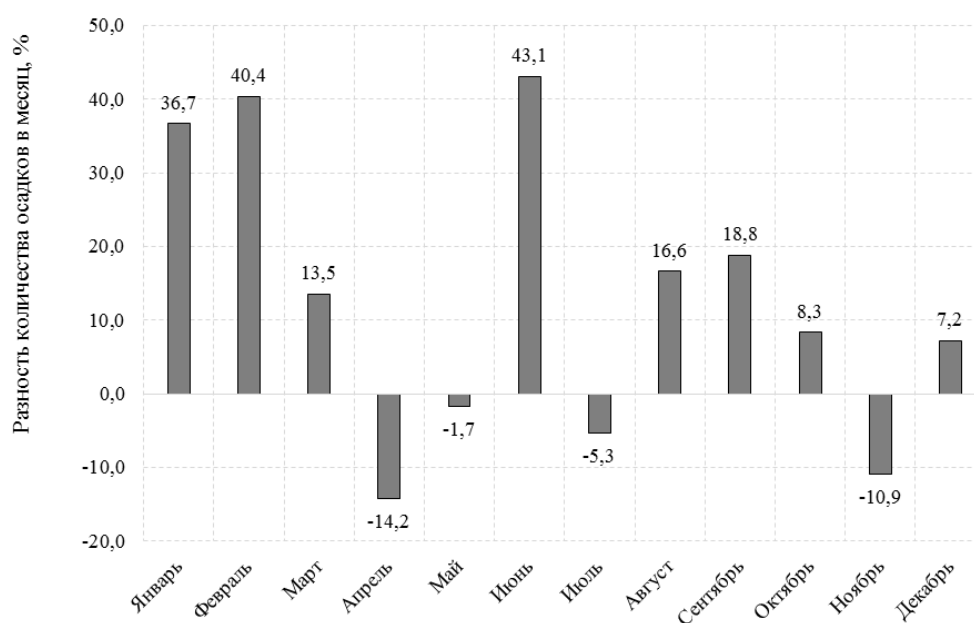


Рисунок 8 – Общая оценка изменения месячного количества осадков (%) в бассейне Западной Двины (1986–2010) – (1961–1985)

Из результатов оценок тенденций изменения климатических характеристик следует, что за последние 50 лет в среднем на 1,1 °С произошло повышение температуры воздуха в бассейне Западной Двины. При этом отмечается существенная неравномерность внутригодового распределения повышения температуры воздуха с максимальным повышением в зимний период – до 3,2 °С в бассейне р. Западная Двина.

В годовом разрезе существенного изменения суммарного годового количества осадков не произошло – в среднем произошло уве-

личение их количества на 11,1 % в бассейне р. Западная Двина. При этом также отмечается существенная неравномерность внутригодового распределения изменения количества осадков: максимальное увеличение на 40 % в зимние месяцы и в июне, а также снижение в апреле на 14 % в бассейне р. Западная Двина.

Наблюдаемые изменения стока

Для прогноза стока проведен анализ его изменения за период с 1961 до 2009 гг. (таблицы 13, 14).

Таблица 13 – Изменение стока в бассейне реки Западная Двина за период с 1961 по 2009 гг. по месяцам

Река	Гидрологический пост	Площадь водосбора, км ²	Характеристика	Значения расходов воды за периоды (1985–2009), (1961–1984), м ³ /с, разница, %											
				январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Дриса	Дерновичи	3070	Q _{ср.}	32,6	32,0	46,7	94,5	56,0	27,3	20,2	19,0	22,7	31,1	37,5	34,7
			Q _{1961–1966}	25,0	21,0	29,8	100,4	59,3	23,1	16,8	15,3	17,8	24,1	30,4	29,7
			Q _{1985–2009}	39,3	41,8	61,6	89,3	53,1	31,0	23,2	22,3	27,3	37,6	44,1	39,3
			Δ%	56,9	99,0	106,8	–11,1	–10,3	34,1	37,9	46,3	53,9	56,1	45,2	32,4
Березовка	Саутки	25600	Q _{ср.}	2,7	2,7	7,4	11,3	3,5	1,9	1,6	1,3	1,2	2,0	2,8	2,7
			Q _{1961–1984}	1,4	1,1	6,7	12,8	3,3	1,5	1,3	1,4	0,8	1,4	2,4	2,0
			Q _{1985–2009}	3,9	4,2	8,2	10,0	3,7	2,3	1,8	1,2	1,6	2,5	3,2	3,2
			Δ%	183,0	274,7	22,4	–21,9	13,3	50,3	35,4	–13,2	91,6	73,7	37,0	58,9
Дисна	Шарковщина	33600	Q _{ср.}	22,3	22,4	48,7	87,5	32,3	14,9	10,5	9,7	12,5	16,5	19,1	20,6
			Q _{1961–1984}	15,6	14,0	44,0	97,6	31,2	13,1	9,3	10,2	11,0	17,1	19,0	19,6
			Q _{1985–2009}	28,6	30,2	52,9	78,2	33,3	16,5	11,6	9,3	13,9	15,9	19,3	21,6
			Δ%	82,9	116,2	20,2	–19,9	6,8	25,8	25,4	–8,2	26,8	–7,2	1,5	10,3
Западная Двина	Полоцк	624	Q _{ср.}	200	180	356	1080	494	240	176	155	165	202	248	212
			Q _{1961–1984}	163	119	234	1120	494	198	162	123	112	139	191	183
			Q _{1985–2009}	234	237	468	1043	494	279	189	184	213	260	299	238
			Δ%	43,6	100,1	99,6	–7,0	–0,2	40,9	16,5	49,3	89,8	87,6	56,4	30,4
Западная Двина	Витебск	920	Q _{ср.}	131	117	242	835	367	170	127	116	124	157	184	150
			Q _{1961–1984}	106	76,5	138	875	366	136	113	84,1	79,4	103	139	126
			Q _{1985–2009}	156	155	342	796	368	202	141	146	167	209	228	173
			Δ%	46,7	102,5	148,3	–9,0	0,7	48,2	24,4	73,1	110,3	101,5	63,6	37,1
Оболь	Оболь	4860	Q _{ср.}	13,8	13,6	29,1	69,5	24,6	11,2	7,7	7,0	8,5	11,6	15,8	13,6
			Q _{1961–1984}	9,90	6,80	21,5	71,2	24,4	8,80	5,30	4,50	4,20	7,40	11,8	11,2
			Q _{1985–2009}	17,2	19,3	35,5	68,0	24,8	13,4	9,60	9,10	12,0	15,2	19,1	15,6
			Δ%	74,7	184,6	65,1	–4,4	1,7	52,5	80,9	100,1	184,0	104,2	62,7	38,9
Полота	Янково	1720	Q _{ср.}	3,90	3,70	6,10	13,7	7,30	3,70	2,90	2,40	2,60	3,70	5,00	4,50
			Q _{1961–1984}	2,80	2,20	4,00	13,7	7,30	2,90	2,50	2,20	2,10	2,90	4,30	4,00
			Q _{1985–2009}	5,00	5,10	7,90	13,8	7,30	4,30	3,30	2,70	3,00	4,40	5,60	4,90
			Δ%	79,6	137,9	94,8	1,1	0,9	46,9	31,3	20,3	44,1	51,4	31,2	23,2
Нача	Нача	1200	Q _{ср.}	1,10	1,10	2,00	5,00	2,00	0,90	0,60	0,50	0,40	0,60	0,90	1,00
			Q _{1961–1984}	0,70	0,50	1,50	5,20	2,00	0,70	0,50	0,40	0,30	0,40	0,70	0,80
			Q _{1985–2009}	1,40	1,60	2,60	4,80	2,00	1,00	0,70	0,50	0,50	0,80	1,20	1,20
			Δ%	100,8	198,0	76,9	–8,5	1,8	34,5	31,4	10,7	43,0	92,2	80,3	42,7
Ница	Соколище	10300	Q _{ср.}	7,80	7,50	11,8	28,0	16,4	7,40	4,90	4,60	5,50	7,70	9,70	9,70
			Q _{1961–1984}	5,40	4,40	7,40	28,0	16,5	5,80	3,80	3,50	4,40	6,10	8,00	8,10
			Q _{1985–2009}	10,0	10,3	15,9	28,0	16,4	8,80	6,00	5,60	6,60	9,10	11,3	11,2
			Δ%	83,2	136,8	115,9	0,1	–0,4	50,4	56,9	61,7	51,1	48,9	41,9	38,5
Среднее изменение стока по бассейну Западной Двины, %				83,5	145,0	83,3	–9,0	1,6	42,6	37,8	37,8	77,2	67,6	46,6	34,7

Карты изменения стока за период с 1961 года приведены в приложении В [6].

Таблица 14 – Изменение характерных расходов воды в бассейне реки Западная Двина за период с 1961 по 2009 гг.

Река	Гидрологический пост	Площадь водосбора, км ²	Абсолютные значения, м ³ /с				Относительные значения, %			
			средний	максимальный весеннего половодья	минимальный летне-осенней межени	минимальный зимней межени	средний	максимальный весеннего половодья	минимальный летне-осенней межени	минимальный зимней межени
Дриса	Дерновичи	3070	13,2	49,9	4,00	6,80	1,9	–8,8	28,9	45,7
Березовка	Саутки	554	0,14	1,36	0,02	0,04	25,1	–17,8	44,5	100,5
Дисна	Шарковщина	4540	0,81	4,82	0,17	0,28	7,5	–28,5	8,8	19,1
Зап. Двина	Полоцк	41700	529	2487	137	229	26,4	–8,4	23,1	81,5
Зап. Двина	Витебск	27300	270	1366	61,1	73,3	31,5	–9,5	27,5	43,2
Оболь	Оболь	4860	3,24	21,9	0,49	1,07	43,2	–8,9	30,2	88,6
Полота	Янково	1720	3,09	11,4	0,83	1,22	35,8	1,6	30,2	70,3
Нача	Нача	1200	1,17	6,73	0,16	0,50	24,0	–15,9	66,9	101,6
Нища	Соколище	10300	1,11	4,60	0,13	0,26	39,5	–7,9	33,8	95,8

В разрезе среднемесячных значений стока произошли следующие изменения. В целом в бассейне р. Западный Буг отмечается общее снижение стока во все месяцы с большей или меньшей интенсивностью. В бассейне р. Западная Двина снижение стока наблюдается только в апреле и в отдельных случаях в пределах водосборов малых рек. Самые значительные изменения стока произошли в бассейне р. Западная Двина в феврале с его максимальным увеличением от 100 до 270 %.

Сценарии и прогноз изменения климата

Долгосрочные на период 35–50 лет (2021–2050 гг.) сценарии изменения климата для рек бассейна Западной Двины получены путем расчетов по региональной климатической модели CCLM с использованием выходных данных глобальной климатической модели ECHAM5. Расчеты проведены с участием специалистов Вильнюсского университета имени Гедиминаса, имеющих соответствующее программное обеспечение и доступ к серверам программного обеспечения и баз данных указанных климатических моделей (Институт метеорологии Макса Планка – глобальная модель ECHAM5, Потсдамский институт изучения климата – региональная модель CCLM), а также опыт проведения подобных расчетов. Региональная климатическая модель CCLM включает большую часть Европы и наиболее подготовлена для ее использования при прогнозировании изменения климата.

Для моделирования изменения климата бассейна р. Западная Двина, исходя из размера сетки модели, использовались климатиче-

ские данные по метеорологической станции Утена (Литва) и Вилейка (Беларусь); для бассейна р. Западный Буг – Барановичи (Беларусь).

Сценарии изменения климата получены для двух вариантов (сценариев) выбросов парниковых газов (принятых в мировой практике и наиболее используемых для оценок изменения климата сценариев социально-экономического развития человечества) [32, 33]:

I вариант: A1B (*relatively high-emission scenario*) – более «жесткий» сценарий, относительно высокие выбросы парниковых газов за счет быстрого развития экономики и роста численности населения до середины XXI века, а затем замедление роста населения, быстрое внедрение современных технологий и сбалансированное использование энергетических ресурсов;

II вариант: B1 (*low-emission scenario*) – более «мягкий» сценарий, невысокие выбросы парниковых газов, весьма вероятно внезапная глобализация, число жителей изменяется подобно тому, как планируется в сценарии A1, но происходит весьма быстрое превращение экономической системы в информационную, а также общество становится менее потребительским, интенсивное внедрение новых чистых технологий.

Результаты определения сценариев изменения климата для рек бассейна Западной Двины с использованием региональной модели CCLM (с учетом выходных данных глобальной климатической модели ECHAM5) представлены на рисунках 9, 10.

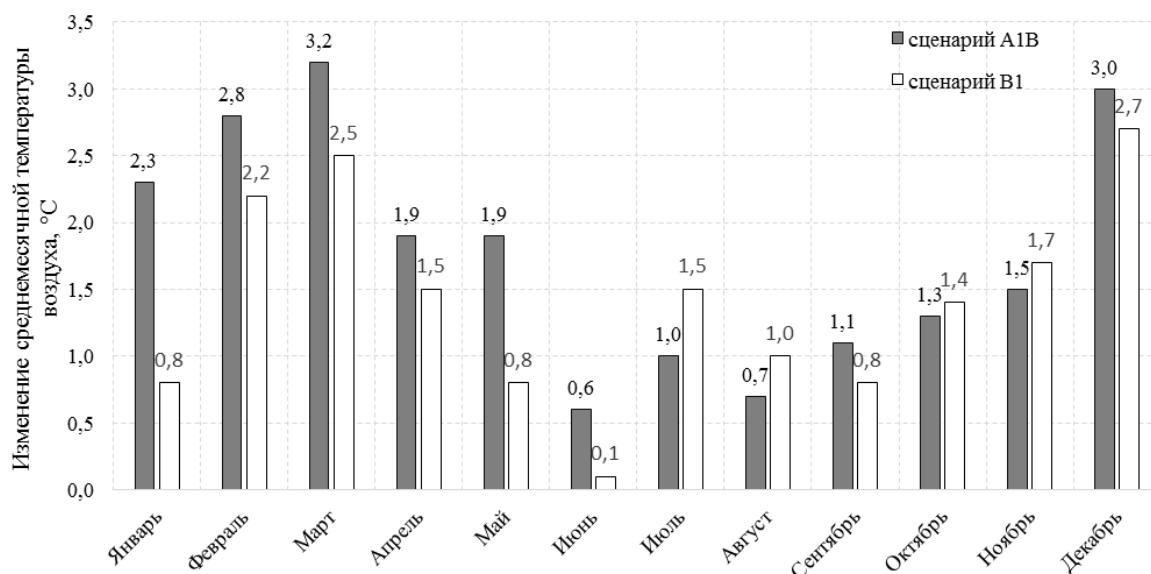


Рисунок 9 – Прогноз изменения среднемесячной температуры воздуха (°C) для бассейна р. Западная Двина до 2035 г. (средняя величина за период 2021–2050 гг.)

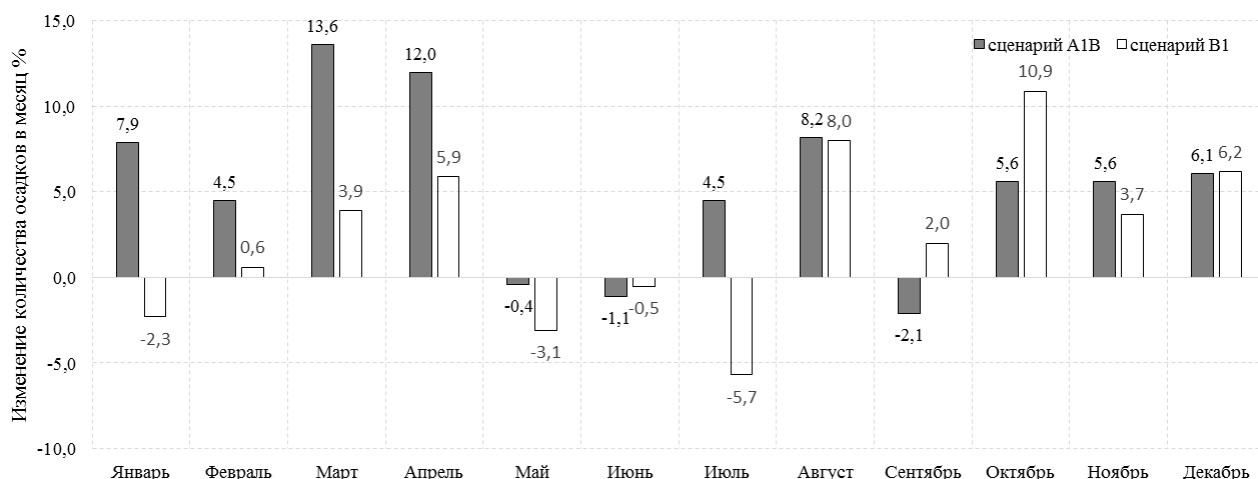


Рисунок 10 – Прогноз изменения месячного количества осадков (%) для бассейна р. Западная Двина до 2035 г. (средняя величина за период 2021–2050 гг.)

В наиболее общем виде по сценариям изменения климата на период 2021–2050 гг. (для среднего значения 2035 г.) для бассейна реки Западная Двина можно сформулировать следующие выводы:

- в среднем за год повышением температуры воздуха на 1,8 °C по сценарию A1B с максимальным повышением температуры в зимние и весенние месяцы (на 3,2 °C);
- в среднем за год повышением температуры воздуха на 1,4 °C по сценарию B1 с максимальным повышением температуры в зимние и весенние месяцы (на 2,7 °C);
- в среднем за год увеличением осадков на 5,4 % по сценарию A1B с незначительным уменьшением количества осадков в летние месяцы и увеличением количества осадков в другие месяцы;
- в среднем за год увеличением осадков на 2,5 % по сценарию B1 с незначительным уменьшением количества осадков в летние месяцы и увеличением количества осадков в другие месяцы.

Прогноз изменения стока

По выше приведенной методике выполнены прогнозные оценки по рекам бассейна Западной Двины для двух сценариев развития климата A1B и B1.

При изменении климата получены следующие обобщенные характеристики прогноза стока.

По объемам стока возможна резкая дифференциация между малыми и средними реками. При увеличении стока в среднем за год отмечается неравномерность и разнонаправленность в сезоны и месяцы. Особенно резко прослеживается разная направленность изменения стока в летние месяцы.

В среднем за год возможно увеличение стока на 9 % в бассейне реки Западная Двина. В зимний период прогнозируется не очень значительное увеличение стока на 7–13 %. Весной прогнозируется увеличение стока не более чем на 6–10 %. В летний период возможно увеличение стока на 10–29 %.

В таблице 15 приведен обобщенный прогноз изменения стока для бассейна Западной Двины.

Обобщение выполнено с учетом комбинации сценариев A1B и B1, а также уточнения с использованием мультимодельного ансамбля из четырех сценариев CMIP5, предложенного Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) в 2013 году в Пятом докладе по изменению климата [34].

Таблица 15 – Прогноз изменения поверхностного стока до 2035 года для бассейна реки Западная Двина в % от современного состояния

Река – населенный пункт	Зима	Весна	Лето	Осень	Среднегодовой
Дисна – Шарковщина	12,9	9,6	27,8	0,0	9,7
Дриса – Дерновичи	11,8	1,8	9,9	-0,8	4,3
Березовка – Саутки	12,6	8,9	27,2	2,1	10,5
Западная Двина – Полоцк	10,5	12,3	12,1	0,6	9,0
Западная Двина – Витебск	10,6	10,5	24,2	2,8	9,2
Оболь – Оболь	9,8	11,2	22,4	3,3	9,7
Полота – Янково	8,9	10,3	20,8	0,5	9,0
Нача – Нача	9,4	9,3	22,0	0,7	9,6
Нища – Соколище	9,2	10,2	26,1	0,8	9,3
Среднее по бассейну:	10,6	9,4	21,4	1,1	8,9

Закключение

Оценка изменения речного стока бассейна реки Западная Двина за период с 1961 по 2015 год показала некоторое увеличение на 0,5–4,0 %.

Однако, в связи с изменением климата, увеличилась неравномерность изменений стока как по бассейну реки Западная Двина, так и его внутригодовому распределению по сезонам года, а также в зависимости от характеристик рек – большие, средние, малые. Значительные изменения стока произошли в весенний период, связанные со снижением стока весеннего половодья и более ранним его наступлением. В весенний, летний и осенний период прослеживается разная направленность изменения стока, особенно в летний период – его увеличение.

Прогноз стока на период до 2035 года в основном подтвердил выявленные тенденции его изменения за период с 1961 по 2015 год. По прогнозным оценкам изменение объемов стока также возможна

резкая дифференциация между северной и южной частью республики, между малыми и большими реками. При незначительном изменении стока в среднем за год высокая вероятность его неравномерности и разнонаправленности в сезоны и месяцы. Для рек Западной Двины прогнозируются не значительные изменения стока.

Следует отметить, что прогнозные оценки изменения стока рек в условиях изменяющегося климата следует рассматривать как вероятностные, связанные с допущением ряда неопределенностей, исходя из различных факторов, основные из которых это:

- погрешность выявленных тенденций изменения метеорологических и гидрологических характеристик с учетом оценки статистической значимости этих тенденций;
- неопределенность и неоднозначность сценариев изменения климата;

– неопределенность результатов расчетов с использованием гидрологических моделей для прогнозирования стока, обусловленную как погрешностями самих моделей и их верификации, так и с неопределенностями используемых в них данных и коэффициентов;

– неопределенность прогнозов влияния факторов антропогенной нагрузки на водные ресурсы с учетом изменения климата.

Однако значимость оценок и прогнозов речного стока в условиях изменяющегося климата определяется целесообразностью их последующего учета при планировании водоохранных и водохозяйственных мероприятий, связанных с совершенствованием управления речным бассейном Западной Двины.

Особенно это актуально в связи с тем, что одним из наиболее негативных последствий изменения климата для речного стока является возможное увеличение частоты и интенсивности неблагоприятных метеорологических и гидрологических явлений. К этим явлениям относятся ливни, засухи, поздние заморозки, наводнения, обусловленные паводками и половодьями, особенно при соединении факторов таяния снега и осадков в виде мокрого снега и дождя, а также возможного увеличения продолжительности половодья.

Усиление неравномерности внутригодового распределения стока и увеличение рисков наводнений, обусловленных резкими оттепелями в зимний период, более ранним наступлением весеннего половодья и увеличением интенсивности дождевых паводков может привести к увеличению рисков экстремальных явлений.

Проблема возникновения маловодных периодов актуальна для рек бассейна Западной Двины. Хотя в настоящее и будущее время нет явных предпосылок для возникновения дефицита водных ресурсов, тем не менее повышается вероятность наступления длительных маловодных периодов. Во время маловодных периодов может произойти ухудшение экологического состояния и рекреационного потенциала поверхностных водных объектов и прилегающих территорий, изменение гидрогеологического режима грунтовых вод, истощение почвенного покрова в пойме и т. п.

Кроме того, за счет возможного увеличения частоты и продолжительности засушливых периодов повышаются риски существенного уменьшения стока малых рек со снижением в них уровня воды, ухудшением ее качества и уменьшением рекреационного потенциала этих рек.

Поэтому разработка и реализация мер по адаптации к изменению климата в части совершенствования управления водными ресурсами является актуальной задачей.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант № X25KI-036).

Список цитированных источников

1. The role of science in achieving the Sustainable Development Goals / C. Kroll [et al.] // *Nature Sustainability*. – 2019. – Vol. 2, Iss. 9. – P. 804–809.
2. Transboundary Water Governance Scholarship: A Critical Review / R. G. Varady, T. R. Albrecht, S. Modak [et al.] // *Environments*. – 2023. – Vol. 10, Iss. 2. – DOI: 10.3390/environments10020027.
3. Калинин, М. Ю. Водные ресурсы Витебской области / М. Ю. Калинин, А. А. Волчек; под ред. М. Ю. Калинина. – Минск: ООО «Белсэкс», 2004. – 144 с.
4. Западная Двина – Даугава. Река и время / Л. С. Аносова, И. Анцане, А. Брамбис [и др.]; под общ. ред. В. Ф. Логинова, Г. Я. Сегеля. – Минск: Беларус. наука, 2006. – 270 с.
5. Оценка трансграничных водотоков Республики Беларусь. Реализация Конвенции ЕЭК ООН по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер / Совместный проект Европейского Союза и Программы развития ООН «Построение потенциала в области Стратегической экологической оценки и в области реализации природоохранных конвенций в Республике Беларусь». – Минск: ООО «Белсэкс», 2010. – 99 с.
6. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А. А. Волчек, В. Н. Корнеев, С. И. Парфомук, И. А. Булак; под общ. ред. А. А. Волчека, В. Н. Корнеева. – Брест: Альтернатива, 2017. – 228 с.
7. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (2023). – Минск: ЦНИИКИВР, 2024. – 145 с.
8. Волчек, А. А. Пакет прикладных программ для определения расчетных характеристик речного стока / А. А. Волчек, С. И. Парфомук // *Вестник Палескага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя прыродазнаўчых навук*. – 2009. – № 1. – С. 22–30.
9. Волчек, А. А. Математические модели в природопользовании. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / А. А. Волчек, П. В. Шведовский, Л. В. Образцов. – Минск: Издательский центр БГУ, 2002. – 282 с.
10. Руководство по водным ресурсам и адаптации к изменению климата. – ООН, Нью-Йорк и Женева, 2009. – 143 с.
11. Understanding the role of climate models in climate change projections / S. Kang [et al.] // *Nature Climate Change*. – 2019. – Vol. 9, Iss. 4. – P. 273–278.
12. Второе, третье, четвертое национальное сообщение Республики Беларусь в соответствии с обязательствами по Рамочной конвенции ООН об изменении климата / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – Минск, 2006. – 143 с.
13. Пятое национальное сообщение Республики Беларусь в соответствии с обязательствами по Рамочной конвенции ООН об изменении климата / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – Минск: БелНИЦ «Экология», 2010. – 195 с.
14. Воздействие изменения климата на реки и озера района речного бассейна (РРБ) Нямунаса. – 2010. – 57 с.
15. Explaining Extreme Events of 2014 from a Climate Perspective / S. C. Herring, M. P. Hoerling, J. P. Kossin [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2015. – Vol. 96, Iss. 12. – P. S1–S172. – DOI: 10.1175/BAMS-ExplainingExtremeEvents2014.1.
16. Логинов, В. Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия / В. Ф. Логинов. – Минск: ТетраСистемс, 2008. – 494 с.
17. Прогнозные оценки стока рек бассейнов Западной Двины и Западного Буга в современных климатических изменениях / В. Н. Корнеев, А. А. Волчек, Л. Н. Гертман, И. А. Булак // *Природные ресурсы*. – 2014. – № 2. – С. 72–85.
18. Волчек, А. А. Влияние изменения климата на водные ресурсы малых рек Беларуси / А. А. Волчек, И. И. Кирвель, С. И. Парфомук // *Региональные проблемы водопользования в изменяющихся климатических условиях: материалы научных докладов участников Междунар. науч.-практ. конф., г. Уфа, Республика Башкортостан*. – Уфа: Изд-во: Азтерна, 2014. – С. 106–111.
19. Волчек, А. А. Водные ресурсы Беларуси и экологические риски / А. А. Волчек // *Вопросы географии / Русское географическое общество*. – Сб. 157. Водные проблемы и их решение / В. М. Котляков [и др.]. – М.: Медиа-ПРЕСС, 2023. – С. 81–104.
20. Мезенцев, В. С. Гидролого-климатическая гипотеза и примеры ее использования / В. С. Мезенцев // *Водные ресурсы*. – 1995. – Т. 22, № 3. – С. 299–301.
21. Волчек, А. А. Методика определения максимально возможного испарения по массовым метеоданным (на примере Белоруссии) / А. А. Волчек // *Научно-техническая информация по мелиорации и водному хозяйству (Минводхоз БССР)*. – 1986. – № 12. – С. 17–21.
22. Логинов, В. Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек. – Минск: Тонпик, 2006. – 160 с.
23. Волчек, А. А. Оценка трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья под воздействием природных и антропогенных факторов (на примере р. Ясельды) / А. А. Волчек, С. И. Парфомук // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. – 2007. – № 1. – С. 50–62.
24. Валуев, В. Е. К вопросу интерполяции, осреднения и инженерных расчетов воднобалансовых характеристик / В. Е. Валуев, А. А. Волчек, Н. Т. Юрченко // *Воспроизводство плодородия мелиорируемых земель Сибири: Тр. / СибНИИГиМ*. – Красноярск, 1991. – С. 21–39.
25. Статистические методы в природопользовании: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. Е. Валуев, А. А. Волчек, П. С. Пойта, П. В. Шведовский. – Брест: Изд-во Брестского политехнического института, 1999. – 252 с.
26. Волчек, А. А. Цикличность годового стока Западной Двины / А. А. Волчек, В. В. Лукша // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки*. – 2006. – С. 172–177.
27. Волчек, А. А. Структура временных рядов годового стока Западной Двины / А. А. Волчек, В. В. Лукша // *Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство и теплотехника*. – 2006. – № 2 (38). – С. 20–24.
28. Блакітная кніга Беларусі: энцыкл. / Беларус. энцыкл.; рэдкал.: Н. А. Дзісько, М. М. Курловіч, Я. В. Малашэвіч [і інш.]. – Мінск: БелЭн, 1994. – 415 с.
29. Стихийные гидрометеорологические явления на территории Беларуси: справочник / М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь; под общ. ред. М. А. Гольберга. – Минск: Беларус. науч.-исслед. центр «Экология», 2002. – 132 с.

30. Волчек, А. А. Минимальный сток реки Западная Двина / А. А. Волчек, О. И. Грядунцова // Региональные проблемы экологии: пути решения: Тезисы докладов II междунар. симпозиума в городе Полоцке : в 2-х т. – Полоцк : УО «ПГУ», 2005. – Том I. – С. 98–99.
31. Max Planck Institute for Meteorology – official website. – URL: <http://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/echam/echam5.html> (date of access: 21.05.2025).
32. Изменение климата, 2007. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата : обобщающий докл. / Р. К. Пачаури, Л. Берштейн, П. Бош [и др.]. – Женева : МГЭИК, 2007. – 104 с.
33. Сайт Федеративной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – 1998. – URL: <http://climate2008.igce.ru/v2008/v1/vl-7.pdf> (date of access: 21.05.2025).
34. Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Резюме для политиков // Материалы МГЭИК. – Женева : МГЭИК, 2013. – 28 с. – URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1> (date of access: 21.05.2025).
16. Loginov, V. F. Global'nye i regional'nye izmeneniya klimata: prichiny i sledstviya / V. F. Loginov. – Minsk : TetraSistems, 2008. – 494 s.
17. Prognoznye ocenki stoka rek bassejnov Zapadnoj Dviny i Zapadnogo Buga v sovremennyh klimaticheskikh izmeneniyah / V. N. Korneev, A. A. Volchek, L. N. Gertman, I. A. Bulak // Prirodnye resursy. – 2014. – № 2. – S. 72–85.
18. Volchek, A. A. Vliyaniye izmeneniya klimata na vodnye resursy malyyh rek Belarusi / A. A. Volchek, I. I. Kirvel'. S. I. Parfomuk // Regional'nye problemy vodopol'zovaniya v izmenyayushchihsiya klimaticheskikh usloviyakh : materialy nauchnykh dokladov uchastnikov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., g. Ufa, Respublika Bashkortostan. – Ufa : Izd-vo: Aeterna, 2014. – S. 106–111.
19. Volchek, A. A. Vodnye resursy Belarusi i ekologicheskie riski / A. A. Volchek // Voprosy geografii / Russkoe geograficheskoe obshchestvo. – Sb. 157. Vodnye problemy i ih reshenie / V. M. Kotlyakov [i dr.]. – M. : Media-PRESS, 2023. – S. 81–104.
20. Mezencev, V. S. Gidrologo-klimaticheskaya gipoteza i primery ee ispol'zovaniya / V. S. Mezencev // Vodnye resursy. – 1995. – T. 22, № 3. – S. 299–301.
21. Volchek, A. A. Metodika opredeleniya maksimal'no vozmozhnogo ispareniya po massovym meteodannym (na primere Belorussii) / A. A. Volchek // Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya po melioratsii i vodnomu hozyajstvu (Minvodhoz BSSR). – 1986. – № 12. – S. 17–21.
22. Loginov, V. F. Vodnyj balans rechnykh vodosborov Belarusi / V. F. Loginov, A. A. Volchek. – Minsk : Tonpik, 2006. – 160 s.
23. Volchek, A. A. Ocenka transformatsii vodnogo rezhima malyyh rek Belorusskogo Poles'ya pod vozdeystviem prirodnnykh i antropogennykh faktorov (na primere r. YAsel'da) / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie. – 2007. – № 1. – S. 50–62.
24. Valuev, V. E. K voprosu interpolatsii, osredneniya i inzhenernykh raschetov vodnobilansovykh harakteristik / V. E. Valuev, A. A. Volchek, N. T. Yurchenko // Vospriizvodstvo plodorodiya melioriruemykh zemel' Sibiri: Tr. / SibNIIGiM. – Krasnoyarsk, 1991. – S. 21–39.
25. Statisticheskie metody v prirodopol'zovanii : uchebnoye posobie dlya studentov vysshih uchebnykh zavedeniy / V. E. Valuev, A. A. Volchek, P. S. Pojta, P. V. SHvedovskij. – Brest : Izd-vo Brestskogo politekhnicheskogo instituta, 1999. – 252 s.
26. Volchek, A. A. Ciklichnost' godovogo stoka Zapadnoj Dviny / A. A. Volchek, V. V. Luksha // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Prikladnye nauki. – 2006. – S. 172–177.
27. Volchek, A. A. Struktura vremennykh ryadov godovogo stoka Zapadnoj Dviny / A. A. Volchek, V. V. Luksha // Vestnik BGTU. Vodnohozyajstvennoe stroitel'stvo i teplotekhnika. – 2006. – № 2 (38). – S. 20–24.
28. Blakitnaya kniga Belarusi: encykl. / Belarus. Encykl.; redkal.: N. A. Dzisko, M. M. Kurlovich, YA. V. Malashevich [i insh.]. – Minsk : BelEn, 1994. – 415 s.
29. Stihijnye gidrometeorologicheskie yavleniya na territorii Belarusi : spravochnik / M-vo prirodnnykh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus'; pod obshch. red. M. A. Gol'berga. – Minsk : Belarus. nauch.-issled. centr «Ekologiya», 2002. – 132 s.
30. Volchek, A. A. Minimal'nyy stok reki Zapadnaya Dvina / A. A. Volchek, O. I. Gryadunova // Regional'nye problemy ekologii: puti resheniya: Tезisy dokladov II mezhdunar. simpoziuma v gorode Polocke : v 2-h t. – Polock : UO «PGU», 2005. – Tom I. – S. 98–99.
31. Max Planck Institute for Meteorology – official website. – URL: <http://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/echam/echam5.html> (date of access: 21.05.2025).
32. Изменение климата, 2007. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата : обобщающий докл. / Р. К. Пачаури, Л. Берштейн, П. Бош [и др.]. – Женева : МГЭИК, 2007. – 104 с.
33. Сайт Федеративной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – 1998. – URL: <http://climate2008.igce.ru/v2008/v1/vl-7.pdf> (date of access: 21.05.2025).
34. Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Резюме для политиков // Материалы МГЭИК. – Женева : МГЭИК, 2013. – 28 с. – URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1> (date of access: 21.05.2025).

References

1. The role of science in achieving the Sustainable Development Goals / C. Kroll [et al.] // Nature Sustainability. – 2019. – Vol. 2, Iss. 9. – P. 804–809.
2. Transboundary Water Governance Scholarship: A Critical Review / R. G. Varady, T. R. Albrecht, S. Modak [et al.] // Environments. – 2023. – Vol. 10, Iss. 2. – DOI: 10.3390/environments10020027.
3. Kalinin, M. YU. Vodnye resursy Vitebskoj oblasti / M. YU. Kalinin, A. A. Volchek ; pod red. M. YU. Kalinina. – Minsk : OOO «Belsens», 2004. – 144 s.
4. Zapadnaya Dvina – Daugava. Reka i vremya / L. S. Anosova, I. Ancane, A. Brambis [i dr.]; pod obshch. red. V. F. Loginova, G. YA. Segelya. – Minsk : Belarus. nauka, 2006. – 270 s.
5. Ocenka transgranichnykh vodotokov Respubliki Belarus'. Realizatsiya Konvencii EEK OON po ohrane i ispol'zovaniyu transgranichnykh vodotokov i mezhdunarodnykh ozer / Sovmestnyj proekt Evropejskogo Soyuzu i Programmy razvitiya OON «Postroenie potentsiala v oblasti Strategicheskoy ekologicheskoy ocenki i v oblasti realizatsii prirodooohrannykh konvencij v Respublike Belarus'». – Minsk : OOO «Belsens», 2010. – 99 s.
6. Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchetoм izmeneniya klimata / A. A. Volchek, V. N. Korneev, S. I. Parfomuk, I. A. Bulak ; pod obshch. red. A. A. Volcheka, V. N. Korneeva. – Brest : Al'ternativa, 2017. – 228 s.
7. Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Vodnye resursy, ih ispol'zovanie i kachestvo vod (2023). – Minsk : CNIKIIVR, 2024. – 145 s.
8. Volchek, A. A. Paket prikladnykh programm dlya opredeleniya raschetnykh harakteristik rechnogo stoka / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // Vesnik Paleskaga dzhzyarzhaynaga universiteta. Seryya pryrodaznaychykh navuk. – 2009. – № 1. – S. 22–30.
9. Volchek, A. A. Matematicheskie modeli v prirodopol'zovanii. Uchebnoye posobie dlya studentov vysshih uchebnykh zavedeniy / A. A. Volchek, P. V. SHvedovskij, L. V. Obratcov. – Minsk : Izdatel'skij centr BGTU, 2002. – 282 s.
10. Rukovodstvo po vodnym resursam i adaptatsii k izmeneniyu klimata. – OON, N'yu-York i Zheneva, 2009. – 143 s.
11. Understanding the role of climate models in climate change projections / S. Kang [et al.] // Nature Climate Change. – 2019. – Vol. 9, Iss. 4. – P. 273–278.
12. Vtoroe, tret'e, chetvertoe nacional'noe soobshchenie Respubliki Belarus' v sootvetstvii s obyazatel'stvami po Ramochnoj konvencii OON ob izmenenii klimata / Ministerstvo prirodnnykh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus'. – Minsk, 2006. – 143 s.
13. Pyatoe nacional'noe soobshchenie Respubliki Belarus' v sootvetstvii s obyazatel'stvami po Ramochnoj konvencii OON ob izmenenii klimata / Ministerstvo prirodnnykh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus'. – Minsk : BelNIC «Ekologiya», 2010. – 195 s.
14. Vozdejstvie izmeneniya klimata na reki i ozyora rajona rechnogo bassejna (RRB) Nyamunasa. – 2010. – 57 s.
15. Explaining Extreme Events of 2014 from a Climate Perspective / S. C. Herring, M. P. Hoerling, J. P. Kossin [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2015. – Vol. 96, Iss. 12. – P. S1–S172. – DOI: 10.1175/BAMS-ExplainingExtremeEvents2014.1.
16. Loginov, V. F. Global'nye i regional'nye izmeneniya klimata: prichiny i sledstviya / V. F. Loginov. – Minsk : TetraSistems, 2008. – 494 s.
17. Prognoznye ocenki stoka rek bassejnov Zapadnoj Dviny i Zapadnogo Buga v sovremennyh klimaticheskikh izmeneniyah / V. N. Korneev, A. A. Volchek, L. N. Gertman, I. A. Bulak // Prirodnye resursy. – 2014. – № 2. – S. 72–85.
18. Volchek, A. A. Vliyaniye izmeneniya klimata na vodnye resursy malyyh rek Belarusi / A. A. Volchek, I. I. Kirvel'. S. I. Parfomuk // Regional'nye problemy vodopol'zovaniya v izmenyayushchihsiya klimaticheskikh usloviyakh : materialy nauchnykh dokladov uchastnikov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., g. Ufa, Respublika Bashkortostan. – Ufa : Izd-vo: Aeterna, 2014. – S. 106–111.
19. Volchek, A. A. Vodnye resursy Belarusi i ekologicheskie riski / A. A. Volchek // Voprosy geografii / Russkoe geograficheskoe obshchestvo. – Sb. 157. Vodnye problemy i ih reshenie / V. M. Kotlyakov [i dr.]. – M. : Media-PRESS, 2023. – S. 81–104.
20. Mezencev, V. S. Gidrologo-klimaticheskaya gipoteza i primery ee ispol'zovaniya / V. S. Mezencev // Vodnye resursy. – 1995. – T. 22, № 3. – S. 299–301.
21. Volchek, A. A. Metodika opredeleniya maksimal'no vozmozhnogo ispareniya po massovym meteodannym (na primere Belorussii) / A. A. Volchek // Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya po melioratsii i vodnomu hozyajstvu (Minvodhoz BSSR). – 1986. – № 12. – S. 17–21.
22. Loginov, V. F. Vodnyj balans rechnykh vodosborov Belarusi / V. F. Loginov, A. A. Volchek. – Minsk : Tonpik, 2006. – 160 s.
23. Volchek, A. A. Ocenka transformatsii vodnogo rezhima malyyh rek Belorusskogo Poles'ya pod vozdeystviem prirodnnykh i antropogennykh faktorov (na primere r. YAsel'da) / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie. – 2007. – № 1. – S. 50–62.
24. Valuev, V. E. K voprosu interpolatsii, osredneniya i inzhenernykh raschetov vodnobilansovykh harakteristik / V. E. Valuev, A. A. Volchek, N. T. Yurchenko // Vospriizvodstvo plodorodiya melioriruemykh zemel' Sibiri: Tr. / SibNIIGiM. – Krasnoyarsk, 1991. – S. 21–39.
25. Statisticheskie metody v prirodopol'zovanii : uchebnoye posobie dlya studentov vysshih uchebnykh zavedeniy / V. E. Valuev, A. A. Volchek, P. S. Pojta, P. V. SHvedovskij. – Brest : Izd-vo Brestskogo politekhnicheskogo instituta, 1999. – 252 s.
26. Volchek, A. A. Ciklichnost' godovogo stoka Zapadnoj Dviny / A. A. Volchek, V. V. Luksha // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Prikladnye nauki. – 2006. – S. 172–177.
27. Volchek, A. A. Struktura vremennykh ryadov godovogo stoka Zapadnoj Dviny / A. A. Volchek, V. V. Luksha // Vestnik BGTU. Vodnohozyajstvennoe stroitel'stvo i teplotekhnika. – 2006. – № 2 (38). – S. 20–24.
28. Blakitnaya kniga Belarusi: encykl. / Belarus. Encykl.; redkal.: N. A. Dzisko, M. M. Kurlovich, YA. V. Malashevich [i insh.]. – Minsk : BelEn, 1994. – 415 s.
29. Stihijnye gidrometeorologicheskie yavleniya na territorii Belarusi : spravochnik / M-vo prirodnnykh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus'; pod obshch. red. M. A. Gol'berga. – Minsk : Belarus. nauch.-issled. centr «Ekologiya», 2002. – 132 s.
30. Volchek, A. A. Minimal'nyy stok reki Zapadnaya Dvina / A. A. Volchek, O. I. Gryadunova // Regional'nye problemy ekologii: puti resheniya: Tезisy dokladov II mezhdunar. simpoziuma v gorode Polocke : v 2-h t. – Polock : UO «PGU», 2005. – Tom I. – S. 98–99.
31. Max Planck Institute for Meteorology – official website. – URL: <http://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/echam/echam5.html> (date of access: 21.05.2025).
32. Изменение климата, 2007. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата : обобщающий докл. / Р. К. Пачаури, Л. Берштейн, П. Бош [и др.]. – Женева : МГЭИК, 2007. – 104 с.
33. Сайт Федеративной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – 1998. – URL: <http://climate2008.igce.ru/v2008/v1/vl-7.pdf> (date of access: 21.05.2025).
34. Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Резюме для политиков // Материалы МГЭИК. – Женева : МГЭИК, 2013. – 28 с. – URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1> (date of access: 21.05.2025).

Материал поступил 16.06.2025, одобрен 30.06.2025,
принят к публикации 30.06.2025

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗООЧИСТНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ МЕСТНЫЕ ВИДЫ ТОПЛИВА

В. И. Глуховский¹, Г. И. Морзак², К. А. Сырникова³

¹ К. т. н., заведующий НИЛ «Экопром», Филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Минск, Беларусь,
e-mail: ecoprom@bntu.by

² К. т. н., доцент кафедры инженерной экологии, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: gmorzak@bntu.by

³ Магистрант кафедры инженерной экологии, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: ecology@bntu.by

Реферат

Регулирование валовыми выбросами загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферу при сжигании местных видов топлива направлено не только на охрану окружающей среды, но также содействует соблюдению экологических нормативов, обеспечению энергетической безопасности и улучшению качества жизни населения. Важным фактором развития торфоперерабатывающих предприятий в Беларуси является высокая эффективность использования торфа в экономическом секторе государства. К основной задаче природоохранной деятельности предприятия относится минимизация воздействий на окружающую среду от производственных технологических процессов.

Промышленные объекты, на которых осуществляются технологические процессы с выбросом ЗВ, обязаны разрабатывать, внедрять и контролировать природоохранные мероприятия, направленные на минимизацию всех видов загрязнений окружающей среды. Для защиты атмосферного воздуха предусматриваются меры по совершенствованию систем очистки промышленных выбросов, внедрению газоочистного оборудования, а также методы, направленные на рассеивание, нейтрализацию ЗВ и на соблюдение требований к санитарно-защитной зоне предприятия.

Использование эффективных технологий и контроль за выбросами вредных веществ играют ключевую роль в создании экологически устойчивой и здоровой среды для будущих поколений. Разработка и внедрение мероприятия по совершенствованию существующих технологий в данной отрасли являются актуальными.

В статье предложено техническое решение по повышению эффективности газоочистных установок для предприятий, использующих местные виды топлива. Показано, что модернизация системы очистки на базе батарейных циклонов для котельной установки при сжигании местных видов топлива позволит повысить эффективность очистки, минимизировать воздействия от производственной деятельности котельной на атмосферный воздух, сократить валовый выброс загрязняющих веществ от исследуемого источника.

Ключевые слова: топливосжигающие установки, выбросы загрязняющих веществ, батарейный циклон, природоохранная деятельность, модернизация систем очистки.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF GAS PURIFICATION PLANTS FOR ENTERPRISES USING LOCAL FUELS

V. I. Glukhovsky, G. I. Morzak, K. A. Syrnikova

Abstract

Regulation of gross emissions of pollutants into the atmosphere from the combustion of local fuels is aimed not only at protecting the environment, but also promotes compliance with environmental regulations, ensuring energy security and improving the quality of life of the population. An important factor in the development of peat processing enterprises in Belarus is the high efficiency of peat use in the economic sector of the state. The main objective of the company's environmental protection activities is to minimize environmental impacts from production processes.

Industrial facilities that carry out technological processes with emissions of pollutants are required to develop, implement, and monitor environmental protection measures aimed at minimizing all types of environmental pollution. To protect atmospheric air, measures are provided to improve industrial emissions purification systems, introduce gas cleaning equipment, as well as methods aimed at dispersing, neutralizing pollutants, and complying with the requirements for the sanitary protection zone of the enterprise.

The use of efficient technologies and control of emissions of harmful substances play a key role in creating an environmentally sustainable and healthy environment for future generations. The development and implementation of measures to improve existing technologies in this industry are relevant.

The article proposes a technical solution to improve the efficiency of gas purification plants for enterprises using local fuels. It is shown that the modernization of the purification system based on battery cyclones for a boiler plant when burning local fuels will increase the efficiency of purification, minimize the effects of the boiler house's production activities on atmospheric air, and reduce the gross emission of pollutants from the source under study.

Keywords: fuel-burning plants, pollutant emissions, battery cyclone, environmental protection, modernization of purification systems.

Введение

Рост вовлечения местных видов топлива, таких как древесные отходы, торф и биомасса, в энергетический сектор экономики создает необходимость модернизации газоочистного оборудования на предприятиях по их использованию. Это вызвано растущими экологическими требованиями и необходимостью соблюдения стандартов по выбросам. Этот вид производства имеет стратегическое значение для обеспечения энергетической безопасности страны и сокращения зависимости от импортных ресурсов [1, 2].

Все местные виды топлив подразделяются на две группы:

- торф и получаемые из него брикеты;
- биомасса, к которой относят древесину для топливных нужд, побочные продукты лесной и деревообрабатывающей промышленности (отходы древесины, стружка, опилки, щепа), быстрорастущую

древесину, а также отходы сельскохозяйственного производства, включая солому и костру льна [3, 4].

Биомасса – это вид топлива, который в своём составе полностью или частично содержит органические вещества растительного и (или) животного происхождения, что позволяет использовать его для получения энергии при его сжигании.

Местные виды топлива (МВТ) более экологичны по сравнению с традиционными твёрдыми и жидкими видами, поскольку характеризуются меньшим содержанием золы, незначительное содержание серы и обладают углекислотной нейтральностью. Процесс сжигания биотоплива сопровождается поступлением в атмосферу углекислого газа, доля которого, как правило, не учитывается в общем объеме и балансе выбросов парниковых газов (ПГ), поскольку является частью непосредственного природного карбонового цикла.

Увеличение объемов замещения природных горючих ископаемых на MBT не приводит к ощутимому повышению эффективности топливного потенциала, а также снижению выбросов загрязняющих веществ и ПГ. Это объясняется тем, что в атмосферный воздух кроме углекислого газа поступают метан, закись азота, диоксид серы и другие химические соединения, относящиеся к ПГ. При этом выбросы диоксида углерода и серы в расчёте на единицу получаемой возрастают в силу более низкой теплоты сгорания и содержания водорода, несмотря на относительно низкое содержание серы в торфе и биомассе [5–7].

Воздействия технологических процессов по переработке местных видов топлива на окружающую среду

На котельных установках Республики Беларусь доминирующее положение занимает использование твёрдых видов топлива. При существующих способах сжигания именно данный тип топлива определяет негативные экологические эффекты. Сжигаемые виды топлив, как правило, имеют низкое качество ввиду высокой зольности, сернистости и влажности, при практическом отсутствии технологий их обогащения. Показатели загрязнения атмосферного воздуха зависят от вида топлива, применяемого в процессе сжигания. Поэтому экологичность топливо-энергетического комплекса оценивается в первую очередь структурой топливного баланса. Негативное влияние топливосжигающих установок на атмосферный воздух ха-

рактеризуется определенными факторами и процессами взаимодействия между собой ЗВ и с другими компонентами [8, 9]. Основные направления отрицательного влияния топливосжигающих установок на атмосферный воздух представлены на рисунке 1.

Технологические методы использования местных видов топлив зависят от их состава и физико-химических характеристик, а также технологии процесса сжигания в современных конструкциях котельных установок. Эти методы не позволяют в полной мере обеспечить допустимый безопасный уровень воздействия на окружающую среду. Основные воздействия на окружающую среду от технологических процессов по переработке MBT представлены на рисунке 2.

Воздействия технологических процессов по переработке местных видов топлива на окружающую среду требуют контроля и мер по снижению их негативного воздействия, чтобы минимизировать отрицательные последствия для окружающей среды и здоровья человека. Для снижения таких воздействия на окружающую среду и сохранения ландшафтного биоразнообразия при переработке местных видов топлива необходимо внедрять современные технологии очистки выбросов ЗВ, производственных сточных воды и минимизации образующихся отходов. При этом важно соблюдать требования экологических стандартов и нормативов, проводить мониторинг воздействия на окружающую среду и принимать меры по предотвращению возможных аварий и загрязнений.



Рисунок 1 – Влияния топливосжигающих установок на атмосферный воздух



Рисунок 2 – Основные воздействия технологических процессов по переработке местных видов топлива на окружающую среду

Организация деятельности в области охраны окружающей среды и рационального природопользования на предприятии

Основным направлением эффективности природоохранной деятельности на предприятиях является минимизация негативного воздействия от применяемых технологических процессов на компоненты окружающей среды. Деятельность в области охраны окружающей среды и рационального природопользования осуществляется в соответствии с требованиями природоохранного законодательства Республики Беларусь, а также требованиями ЭкоНП 17.01.06-001–2017 [10]. На предприятиях разрабатываются и поддерживаются в рабочем состоянии процедуры производственных экологических наблюдений [11], а также создается и функционирует система обеспечения соблюдения норм ПДВ и ПДС, нормативов образования и лимитов хранения отходов [12–14].

Организация и ведение работ по охране атмосферного воздуха ведется в соответствии с природоохранными требованиями [15], организация работ по водопотреблению и водоотведению [10]. За пользование природными ресурсами, за выбросы ЗВ в атмосферный воздух, сбросы сточных вод и хранение/захоронение отходов производства предприятием производится оплата экологического налога по соответствующим ставкам с применением соответствующих коэффициентов согласно Налоговому кодексу Республики Беларусь [16]. Все отходы, образующиеся на предприятии, разделяются по видам согласно Общегосударственному классификатору Республики Беларусь ОКРБ 021–2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь» [17]. Обращение с отходами производства осуществляется в соответствии с требованиями НПА, ТНПА [18, 19].

Ежегодно предприятие актуализирует данные экологического паспорта [20], ведется учетная документация и государственная статистическая отчетность в соответствии с законодательством в области охраны окружающей среды, рационального использования природных ресурсов.

На предприятиях, использующих МВТ, постоянно совершенствуются мероприятия по улучшению состояния воздушной среды, такие как:

- модернизация, реконструкция систем обеспыливания;
- контроль эффективности ГОУ;
- своевременное проведение режимно-наладочных испытаний отопительных котлов, техническое обслуживание ГОУ.

Для перехода на использование местных видов топлива необходимо проведение реконструкций котельной установки. На котельных установках торфопредприятий используются котлы ДКВР 10/13. Такая реконструкция заключается в модернизации газового котла, который будет работать на торфе и отсеве торфа. Перевод котельного хозяйства на местные виды топлива позволит предприятию свести к минимуму использование дорогостоящего, как правило, импортного топлива. Первые эксперименты такой реконструкции показали, что местные виды топлива не проигрывают импортному газу, а оборудование, которое работает на торфе и отсеве торфа, дает такую же эффективность.

В таблице 1 представлен перечень ЗВ от работы котельной установки с котлами ДКВР 10/13, работающей на торфобрикетах.

Таблица 1 – Перечень ЗВ от работы котельной установки, работающей на торфобрикетах

Загрязняющее вещество	Код вещества	Класс опасности
Твердые частицы суммарно	2902	3
Азота диоксид	0301	3
Серы диоксид	0301	3
Углерод оксид (окись углерода, угарный газ)	337	4

Анализ данных по качественным и количественным характеристикам выбросов ЗВ в атмосферный воздух показал, что наиболее важным звеном для совершенствования природоохранной деятельности является разработка и внедрение мероприятий по минимизации выбросов твердых частиц от эксплуатации котельной установки. Для очистки отходящего газового потока, как правило, на таких котельных установках применяют мультициклонные аппараты [21, 22].

Модернизация систем очистки на базе батарейных циклонов для котельных установок при сжигании местных видов топлива

Батарейный циклон представляет собой конструкцию из нескольких десятков до сотен циклонных элементов, соединённых общим корпусом и бункером. К корпусу циклона подсоединён единый подвод и отвод газа [23–25]. Для отделения пыли от газов в таком очистителе воздуха создаются центробежные и гравитационные силы. Батарейные циклоны состоят из корпуса, выхлопной трубы и направляющего аппарата. Принцип работы циклонного аппарата аналогичен струйному эжектору, т. е. при тангенциальной подаче запыленного газа (при работе под разрежением) на оси образуется зона повышенного разрежения. Запыленный поток, на который действуют центробежные силы, совершает вращательное движение и движется в направлении наименьшего сопротивления в сторону пылевыводного отверстия, проходит в пылевой бункер, перетекает в приосевую зону и поступает в выхлопной патрубок. При этом в пылевом бункере в зависимости от расхода газа образуется гидродинамическая ситуация.

На рисунке 3 представлена принципиальная схема работы батарейного циклона. Газ из распределительной камеры поступает в элементы по оси. Лопатки направляющего аппарата задают газу вращательное движение, направляя его по нисходящей в сторону отверстия для спуска пыли. Загрязнённый пылью воздух поступает в циклоны через входной патрубок. В циклонах он начинает вращательное винтообразное движение, создается центробежная сила, за счет которой твердые частички ЗВ (пыль) прижимаются к стенкам циклонов и под действием силы трения начинают двигаться медленнее. Они теряют скорость и скатываются вниз в сборный конус. Все скопившиеся твердые частицы выводятся в пылепровод через шлюзовый затвор. Батарейные установки комплектуются сборной коробкой, циклонами правого и левого исполнения и общего бункера.

При установке циклонных элементов в группу или батарею в каждом циклонном элементе образуется своя гидродинамическая обстановка. Это обусловлено неравномерным расположением циклонных элементов и загрузкой материала [26, 27]. Таким образом, у ближайших к входному патрубку элементов наблюдается большая загрузка твердыми частицами, сила завихрения в них снижается, разрежение на оси уменьшается по сравнению с элементами дальнего ряда. Это приводит к созданию в общем пылевом бункере аэродинамической разветки – аэродинамическому перекоосу давления по сечению под каждым циклонным элементом.

На практике это приводит к возникновению перетоков газов между циклонными элементами: циклоны первого ряда больше загружены пылью, разрежение на оси меньше, уловленный материал вместе с газом поступает в общий пылевой бункер и перетекает в элементы дальнего ряда, которые в меньшей степени загружены пылью, завихрение в них больше, а значит больше разрежение на оси. В результате данные элементы просто выбрасывают уловленную пыль из аппарата (рисунок 4). По этой причине батарейные или групповые циклоны не поддаются настройке и регулированию.

При проектировании батарейных или групповых циклонов обычно устанавливают высокоэффективные циклонные элементы с эффективностью улавливания каждого 97–98 %, при установке в группу их эффективность снижается до 70–80 % за счет перетоков газов. Для устранения такого явления целесообразно использовать транзит-приемники с пылевыми затворами.

Проведенные исследования показали, что процесс сепарации частиц в транзит-приемнике циклона заканчивается уже на расстоянии 2–5 диаметров от пылевыводного отверстия циклона, что позволяет оптимизировать его длину и разместить внутри бункера батарейного циклона, а сброс уловленного материала осуществлять в общий бункер. Установление транзит – приемников с пылевым затвором приведет к изолированию циклонных элементов друг от друга, повышению эффективности пылеулавливания до 95–98 % за счет изменения структуры потока в сепарационной зоне циклона (рисунок 5).

В результате проведения предлагаемой модернизации системы очистки на базе батарейного циклона будет достигнуто значительное сокращение выбросов твердых частиц от эксплуатации котельной установки при сжигании местных видов топлива (таблица 2).

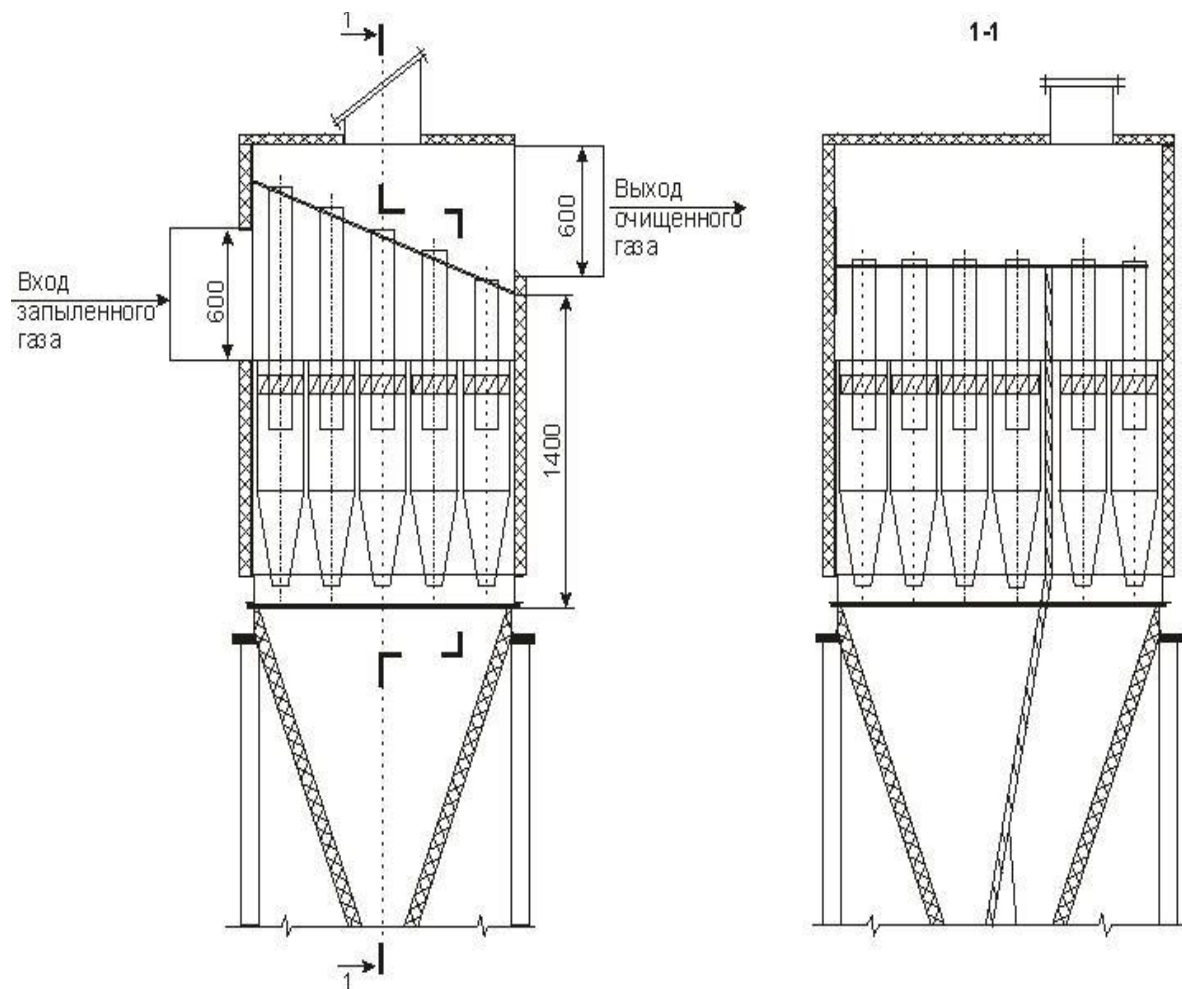


Рисунок 3 – Схема работы батарейного циклона

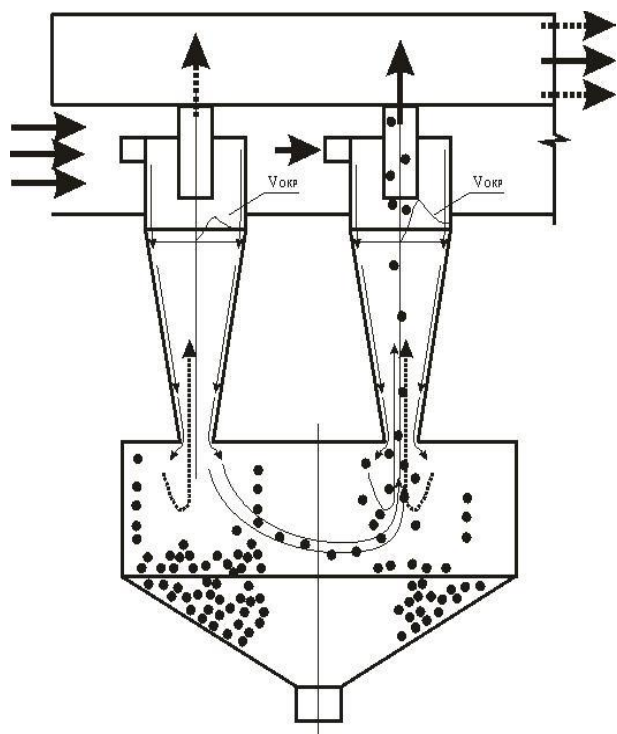


Рисунок 4 – Схема потоков в групповом циклоне с общим пылеприемником

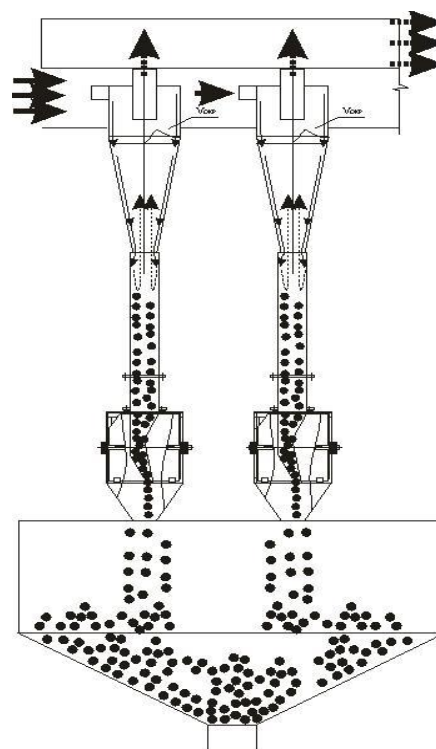
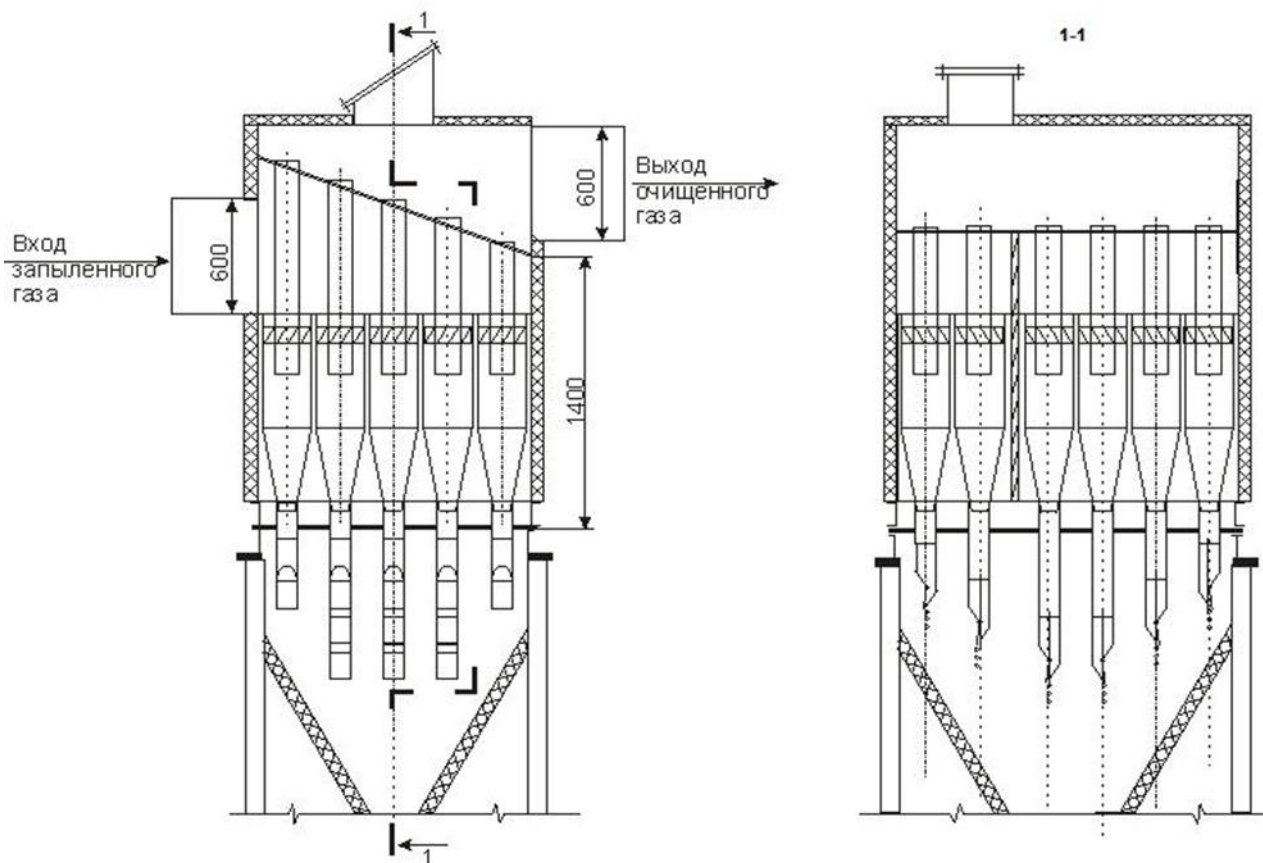


Рисунок 5 – Схема потоков в групповом циклоне с индивидуальными пылеприемниками

Таблица 2 – Динамика изменения выбросов ЗВ от природоохранного мероприятия для типовой котельной установки на местном виде топлива

Загрязняющее вещество	Код вещества	Класс опасности	Усредненные выбросы до реализации мероприятий		Усредненные выбросы после реализации мероприятий	
			г/с	т/год	г/с	т/год
Твердые частицы суммарно	2902	3	4,0	95,0	2,0	50,6

На рисунке 6 представлена схема батарейного циклона после модернизации.

**Рисунок 6** – Батарейный циклон после модернизации

Заключение

При проектировании и установке батарейных циклонов образуется особая гидродинамическая обстановка, вызванная неравномерным расположением циклонных элементов и загрузкой пылью, что приводит к аэродинамическому перекосу давления по сечению под каждым циклонным элементом. На практике это приводит к возникновению перетоков газов между циклонными элементами. Для устранения такого явления предлагается использовать транзит-приемники с пылевыми затворами. Установление транзит-приемников с пылевым затвором приведет к повышению эффективности пылеулавливания до 95–98 % за счет изменения структуры потока в сепарационной зоне циклона.

Модернизация установок очистки на базе групповых и батарейных циклонов не требует значительных затрат на использование сырья и материалов, изменения системы аспирации очищаемых газов, замены тягодутьевых устройств и позволяет установить транзит-приемники в стесненных условиях действующего производства.

Таким образом, внедрение предлагаемого технического решения по модернизации системы очистки на базе батарейных циклонов для котельной установки при сжигании местных видов топлива позволит повысить эффективность очистки, минимизировать воздействия от производственной деятельности котельной на атмосферный воздух, сократить валовый выброс загрязняющих веществ от исследуемого источника.

Список цитированных источников

1. Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 24 февр. 2021 г., № 103 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: https://docs.yandex.by/docs/view?tm=1745391982&tid=by&lang=ru&name=Programma_energoprogramma2021_2025.pdf&text (дата обращения: 10.04.2025).
2. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 23 дек. 2015 г., № 1084 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <http://www.pravo.by/document/?guid=3961&p0=C21501084> (дата обращения: 10.04.2025).
3. Овчинников, В. М. Основные виды и характеристика энергетических ресурсов: учеб.-метод. пособие / В. М. Овчинников, Л. В. Шенец, В. В. Макеев. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 117 с.
4. Вавилов, А. В. Топливо из нетрадиционных энергоресурсов / А. В. Вавилов. – Минск : СтройМедиаПроект, 2014. – 80 с.
5. Станюта, Д. Топливное направление использования торфа по-прежнему актуально / Д. Станюта // Энергоэффективность. – 2020. – № 9. – С. 13–15.
6. Овчинников, В. М. Энергетическая стратегия Беларуси: учеб.-метод. пособие / В. М. Овчинников, Л. В. Шенец, М. П. Малашенко. – Гомель : БелГУТ, 2017. – 99 с.

7. Черноусов, С. В. Энергетика Беларуси смотрит в будущее / С. В. Черноусов // Энергоэффективность. – 2006. – № 1. – С. 5–8.
8. Охрана окружающей среды и природопользование. Наилучшие доступные технические методы для топливосжигающих установок теплоэнергетики = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Найлепшыя даступныя тэхнічныя метады для топливосжигающих установок теплоэнергетики: ТКП 17.02-17-2019 (33140). – Введ. 01.01.2020. – Минск : Белорус. гос. инст-т стандартизации и сертификации, 2019. – 84 с.
9. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью до 25 МВт = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Атмасфера. Выкіды забруджальных рэчываў у атмасфернае паветра. Парадак вызначэння выкідаў пры спальванні паліва ў катлах цеплапрадукцыйнаасцю да 25 МВт: ТКП 17.08-01-2006(02120). – Введ. 28.02.2006. – Минск : Белорус. гос. инст-т стандартизации и сертификации, 2006. – 56 с.
10. Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности : экологические нормы и правила ЭкоНП 17.01.06-001–2017 : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 18 июля 2017 г. № 5-т : с изм. 21 нояб. 2022 г., №23-Т // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22339485&p1=1&p5=0> (дата обращения: 12.04.2025).
11. Об осуществлении производственных наблюдений в области охраны окружающей среды, рационального (устойчивого) использования природных ресурсов : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 11 окт. 2013 г., № 52 : с изм. и доп. 24 окт. 2019 г., № 36 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь (дата обращения: 12.04.2025).
12. О деятельности, связанной с выбросами загрязняющих веществ в атмосферный воздух : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды РБ, 27 дек. 2023 г., № 33 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22441147> (дата обращения: 12.04.2025).
13. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Правила ведения учета добываемых подземных вод, изымаемых поверхностных вод и сбрасываемых сточных вод в окружающую среду = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Гідрасфера. Правілы вядзення ўліку падземных вод, якія здабываюцца, канфіскаўных паверхневых вод і сіданых сцэкавых вод у навакольнае асяроддзе : ТКП 17.06-12-2015 (01120). – Введ. 01.07.2015. – Минск : Белорус. гос. инст-т стандартизации и сертификации, 2015. – 32 с.
14. О порядке обращения с отходами : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 28 нояб. 2019 № 818 : с изм. и доп. от 21 сент. 2024 г., №53948 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь (дата обращения: 12.04.2025).
15. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосферный воздух (в том числе озоновый слой). Требования экологической безопасности в области охраны атмосферного воздуха : экологические нормы и правила. ЭкоНП 17.08.06 001 2022 : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 29.12.2022 № 32-Т : с изм. 29 дек. 2023 г., № 17-Т. – URL: <https://docs.yandex.by/docs/view?tm=1747126128&tid=by&lang=ru&name=17-T-ot-27.12.2023.pdf&text> (дата обращения: 12.04.2025).
16. Налоговый кодекс Республики Беларусь (Особенная часть) : 29 декабря 2009 г. № 71-3: принят Палатой представителей 11 декабря 2009 г.; одобрен Советом Респ. 18 декабря 2009 г.; в ред. Закона Респ. Беларусь от 13.12.2024 г. № 47-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=hk0900071> (дата обращения: 12.04.2025).
17. Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь : общегосударственный классификатор Республики Беларусь ОКРБ 021–2019 : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 9 сент. 2019 г., № 3-Т // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21934631&p1=1> (дата обращения: 12.04.2025).
18. Об обращении с отходами: Закон Респ. Беларусь : 20 июля 2007 г., № 271-3: принят Палатой представителей 7 июня 2007 г.; одобрен Советом Респ. 22 июня 2007 г.; в ред. Закона Респ. Беларусь от 29.12.2023 г. № 333-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H10700271> (дата обращения: 12.04.2025).
19. О порядке обращения с отходами : постановления Совета Министров Респ. Беларусь, 28 нояб. 2019 г., №818 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21900818> (дата обращения: 12.04.2025).
20. Инструкция о порядке ведения экологического паспорта предприятия : постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 07 июня 2013, № 25 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21327635> (дата обращения: 16.04.2025).
21. Ветошкин, А. Г. Инженерная защита атмосферы от вредных выбросов : учеб. пособие / А. Г. Ветошкин. – 3-е изд. – М. : Инфра-Инженерия, 2023. – 316 с.
22. Балабанов, В. И. Инженерная защита окружающей среды: учебник / В. И. Балабанов, Л. А. Журавлева, Н. Б. Мартынова. – М. : ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2022. – 233 с.
23. Ключенкова, М. И. Защита окружающей среды от промышленных газовых выбросов: учеб. пособие / М. И. Ключенкова, А. В. Луканин. – М. : ИНФА-М, 2021. – 142 с.
24. Инженерная экология и очистка выбросов промышленных предприятий: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальностям "Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна", "Водохозяйственное строительство", "Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов" / Б. М. Хрусталева, В. И. Теличенко, В. Д. Сизов [и др.] ; под общ. ред. Б. М. Хрусталева, В. И. Теличенко. – М. : Издательство АСВ, 2016. – 556 с.
25. Инженерная экология: учебное пособие для вузов / И. С. Бракович, И. М. Золотарева, С. П. Кундас [и др.] ; под ред. Б. М. Хрусталева. – Минск : Вышэйшая школа, 2020. – 222 с.
26. Луканин, А. В. Инженерная экология: процессы и аппараты очистки газозооных выбросов: учеб. пособие / А. В. Луканин. – М. : НИЦ ИНФА-М, 2024. – 523 с.
27. Очистка и дезодорация газозооных выбросов / В. А. Пронин, В. О. Мамченко, О. В. Долговская, В. А. Цветков. – СПб. : Университет ИТМО, 2022. – 156 с.

References

1. Gosudarstvennaya programma «Energoberezhenie» na 2021–2025 gody : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 24 fevr. 2021 g., № 103 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: https://docs.yandex.by/docs/view?tm=1745391982&tid=by&lang=ru&name=Programma_energoprogramma2021_2025.pdf&text (data obrashcheniya: 10.04.2025).
2. Koncepciya energeticheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus' : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 23 dek. 2015 g., № 1084 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <http://www.pravo.by/document/?guid=3961&p0=C21501084> (data obrashcheniya: 10.04.2025).
3. Ovchinnikov, V. M. Osnovnye vidy i karakteristika energeticheskikh resursov: ucheb.-metod. posobie / V. M. Ovchinnikov, L. V. SHenec, V. V. Makeev. – Gomel' : BelGUT, 2015. – 117 s.
4. Vavilov, A. V. Toplivo iz netradicionnykh energoresursov / A. V. Vavilov. – Minsk : StrojMediaProekt, 2014. – 80 s.

5. Stanyuta, D. Toplivnoe napravlenie ispol'zovaniya torfa po-prezhnemu aktual'no / D. Stanyuta // *Energoeffektivnost'*. – 2020. – № 9. – S. 13–15.
6. Ovchinnikov, V. M. Energeticheskaya strategiya Belarusi: ucheb.-metod. posobie / V. M. Ovchinnikov, L. V. SHenec, M. P. Malashenko. – Gomel' : BelGUT, 2017. – 99 s.
7. CHernousov, S. V. Energetika Belarusi smotrit v budushchee / S. V. CHernousov // *Energoeffektivnost'*. – 2006. – № 1. – S. 5–8.
8. Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Nailuchshie dostupnye tekhnicheskie metody dlya toplivoszhigayushchih ustanovok teploenergetiki = Ahova navakol'naga asyaroddzya i pryrodakarystanne. Najlepshyya dastupnyya tekhnichnyya metody dlya toplivoszhigayushchih ustalovak ceplaenergetyki: TKP 17.02-17-2019 (33140). – Vved. 01.01.2020. – Minsk : Belorus. gos. inst-t standartizacii i sertifikacii, 2019. – 84 s.
9. Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Atmosfera. Vybrosoy zagryaznyayushchih veshchestv v atmosferyj vozduh. Poryadok opredeleniya vybrosov pri szhiganiy topliva v kotlah teploproduit'nost'yu do 25 MVt = Ahova navakol'naga asyaroddzya i pryrodakarystanne. Atmosfera. Vykydy zabrudzhal'nyh rechyay u atmosfery pavetra. Paradak vyznachennyya vykyday pry spal'vanniy paliva y katlah ceplaprodukcyjnascy da 25 MVt: TKP 17.08-01-2006(02120). – Vved. 28.02.2006. – Minsk : Belorus. gos. inst-t standartizacii i sertifikacii, 2006. – 56 s.
10. Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Trebovaniya ekologicheskoy bezopasnosti : ekologicheskije normy i pravila EkoNiP 17.01.06-001–2017 : postanovlenie Ministerstva prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus', 18 iyulya 2017 g. № 5-t : s izm. 21 noyab. 2022 g., №23-T // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22339485p1=1&p5=0> (data obrashcheniya: 12.04.2025).
11. Ob osushchestvlenii proizvodstvennyh nablyudenij v oblasti ohrany okruzhayushchej sredy, racional'nogo (ustojchivogo) ispol'zovaniya prirodnyh resursov : postanovlenie Ministerstva prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus', 11 okt. 2013 g., № 52 : s izm. i dop. 24 okt. 2019 g., № 36 // ETALON. Zakonodatel'stvo Respubliki Belarus' / Nac. centr pravovoj inform. Resp. Belarus' (data obrashcheniya: 12.04.2025).
12. O deyatel'nosti, svyazannoy s vybrosami zagryaznyayushchih veshchestv v atmosferyj vozduh : postanovlenie Ministerstva prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy RB, 27 dek. 2023 g., № 33 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22441147> (data obrashcheniya: 12.04.2025).
13. Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Gidrosfera. Pravila vedeniya ucheta dobyvaemyh podzemnyh vod, iznyaemyh poverhnostnyh vod i sbrasyvaemyh stochnykh vod v okruzhayushchuyu sredu = Ahova navakol'naga asyaroddzya i pryrodakarystanne. Gidrasfera. Pravily vyadzennyya yliku padzemnyh vod, yakiya zdabyvayucca, kanfiskoynyyh paverhnevyyh vod i skidanyh scyokavyyh vod u navakol'nae asyaroddze : TKP 17.06-12-2015 (01120). – Vved. 01.07.2015. – Minsk : Belorus. gos. inst-t standartizacii i sertifikacii, 2015. – 32 s.
14. O poryadke obrashcheniya s othodami : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 28 noyab. 2019 № 818 : s izm. i dop. ot 21 sent. 2024 g., 5/53948 // ETALON. Zakonodatel'stvo Respubliki Belarus' / Nac. centr pravovoj inform. Resp. Belarus' (data obrashcheniya: 12.04.2025).
15. Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Atmosferyj vozduh (v tom chisle ozonovyy sloj). Trebovaniya ekologicheskoy bezopasnosti v oblasti ohrany atmosferyj vozduha : ekologicheskije normy i pravila. EkoNiP 17.08.06 001 2022 : postanovlenie Ministerstva prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus' ot 29.12.2022 № 32-T : s izm. 29 dek. 2023 g., № 17-T. – URL: <https://docs.yandex.by/docs/view?tm=1747126128&tid=by&lang=ru&name=17-T-ot-27.12.2023.pdf&text> (data obrashcheniya: 12.04.2025).
16. Nalogovyy kodeks Respubliki Belarus' (Osobennaya chast') : 29 dekabrya 2009 g. № 71-Z: prinyat Palatoj predstavitelej 11 dekabrya 2009 g.: odobr. Sovetom Resp. 18 dekabrya 2009 g.: v red. Zakona Resp. Belarus' ot 13.12.2024 g. № 47-Z // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=hk0900071> (data obrashcheniya: 12.04.2025).
17. Klassifikator othodov, obrazuyushchihsya v Respublike Belarus' : obshchegosudarstvennyj klassifikator Respubliki Belarus' OKRB 021–2019 : postanovlenie Ministerstva prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus', 9 sent. 2019 g., № 3-T // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21934631p1=1> (data obrashcheniya: 12.04.2025).
18. Ob obrashchenii s othodami: Zakon Resp. Belarus' : 20 iyulya 2007 g., № 271-Z: prinyat Palatoj predstavitelej 7 iyunya 2007 g.: odobr. Sovetom Resp. 22 iyunya 2007 g.: v red. Zakona Resp. Belarus' ot 29.12.2023 g. № 333-Z // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H10700271> (data obrashcheniya: 12.04.2025).
19. O poryadke obrashcheniya s othodami : postanovleniya Soveta Ministrov Resp. Belarus', 28 noyab. 2019 g., №818 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21900818> (data obrashcheniya: 12.04.2025).
20. Instrukciya o poryadke vedeniya ekologicheskogo pasporta predpriyatiya : postanovleniem Ministerstva prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus', 07 iyun' 2013, № 25 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21327635> (data obrashcheniya: 16.04.2025).
21. Vetoshkin, A. G. Inzhenernaya zashchita atmosfery ot vrednyh vybrosov : ucheb. posobie / A. G. Vetoshkin. – 3-e izd. – M. : Infra-Inzheneriya, 2023. – 316 s.
22. Balabanov, V. I. Inzhenernaya zashchita okruzhayushchej sredy: ucheb. posobie / V. I. Balabanov, L. A. Zhuravleva, N. B. Martynova. – M. : FGBOU VO RGAU-MSKHA imeni K. A. Timiryazeva, 2022. – 233 s.
23. Klyushenkova, M. I. Zashchita okruzhayushchej sredy ot promyshlennykh gazovykh vybrosov: ucheb. posobie / M. I. Klyushenkova, A. V. Lukanin. – M. : INFA-M, 2021. – 142 s.
24. Inzhenernaya ekologiya i ochistka vybrosov promyshlennykh predpriyatij: uchebnoe posobie dlya studentov uchrezhdenij vysshego obrazovaniya po special'nostyam "Teplogazosnabzhenie, ventilyaciya i ohrana vozdukhnoy bassejna", "Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo", "Vodosnabzhenie, vodoootvedenie i ohrana vodnyh resursov" / B. M. Hrustalev, V. I. Telichenko, V. D. Sizov [i dr.]; pod obshch. red. B. M. Hrustalev, V. I. Telichenko. – M. : Izdatel'stvo ASV, 2016. – 556 s.
25. Inzhenernaya ekologiya: uchebnoe posobie dlya vuzov / I. S. Brakovich, I. M. Zolotareva, S. P. Kudas [i dr.]; pod red. B. M. Hrustaleva. – Minsk : Vyshejschaya shkola, 2020. – 222 s.
26. Lukanin, A. V. Inzhenernaya ekologiya: processy i apparaty ochistki gazovozdukhnykh vybrosov: ucheb. posobie / A. V. Lukanin. – M. : NIC INFA-M, 2024. – 523 s.
27. Ochistka i dezodoraciya gazovozdukhnykh vybrosov / V. A. Pronin, V. O. Mamchenko, O. V. Dolgovskaya, V. A. Cvetkov. – SPb. : Universitet ITMO, 2022. – 156 s.

Материал поступил 22.05.2025, одобрен 29.05.2025, принят к публикации 29.05.2025

УДК 504.062

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД В РЕГУЛИРОВАНИИ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

П. Н. Захарко

Начальник отдела нормирования воздействия на окружающую среду, РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», Минск, Беларусь, e-mail: polina.k.85@mail.ru

Реферат

В Республике Беларусь предприятия молочной промышленности занимают лидирующие позиции как по объемам производства молочной продукции, так и по объемам использования воды среди иных предприятий, производящих продукты питания. Последние десять лет на данных предприятиях активно осуществлялось техническое переоснащение, что позволило в полном объеме вовлечь в производственный процесс побочные продукты переработки молока и получить новые виды молочной продукции. В тоже время за счет внедрения новых технологий расширился перечень производственного оборудования, изменилась структура водопотребления и водоотведения. Увеличился расход сточных вод на тонну поступившего молока на предприятиях, осуществляющих производство сыров и переработку сыворотки. Диапазон увеличения нормативов водоотведения по отношению к водопотреблению составил от 10 до 30 %. На отдельных предприятиях внедрены системы повторного использования воды после санитарной обработки оборудования, пермеата после установок мембранной фильтрации сыворотки. По результатам проведенного анализа технологических процессов, статей расходов воды и образования сточных вод разработана методика расчета водопользования для предприятий по производству молочных продуктов (Методика). С учетом подходов, изложенных в Методике, проводится расчет индивидуальных технологических нормативов водопотребления и водоотведения на единицу перерабатываемого сырья или производимой продукции, определение диапазона отклонения фактического водопользования от нормативного, направлений организационно-технических мероприятий по оптимизации водопользования.

Проведен блок исследований по изучению качественного состава сточных вод как по отдельным производственным потокам, так и общего потока сточных вод в увязке с видами производимой молочной продукции. Сформированы диапазоны концентраций загрязняющих веществ в сточных водах при производстве сыра твердого (полутвердого), сыворотки концентрированной, масла, ЦМП, сухих молочных продуктов.

Предложен комплексный подход в регулировании водопользования на предприятиях молочной промышленности, реализованный через компьютерную программу. В статье использованы основные тезисы и выводы, приведенные в диссертационной работе П. Н. Захарко.

Ключевые слова: молочная промышленность, водопользование, качество сточных вод, прогнозирование, компьютерная программа.

INTEGRATED APPROACH TO WATER USE REGULATION IN DAIRY INDUSTRY ENTERPRISES

P. N. Zakharko

Abstract

In the Republic of Belarus, dairy industry enterprises occupy leading positions both in terms of dairy production volumes and water consumption volumes among other food manufacturing enterprises. Over the past ten years, these enterprises have been actively re-equipping, which has allowed them to fully involve by-products of milk processing in the production process and obtain new types of dairy products. At the same time, due to the introduction of new technologies, the list of production equipment has expanded, the structure of water consumption and water disposal has changed. Wastewater consumption per ton of incoming milk has increased at enterprises engaged in cheese production and whey processing. The range of increase in water disposal standards in relation to water consumption was from 10 to 30%. Some enterprises have introduced systems for the reuse of water after sanitization of equipment, permeate after whey membrane filtration units. Based on the results of the analysis of technological processes, water consumption items and wastewater formation, a Methodology for calculating water use for dairy production enterprises (Methodology) has been developed. Taking into account the approaches set out in the Methodology, the calculation of individual technological standards for water consumption and water disposal per unit of processed raw materials or manufactured products is carried out, the range of deviation of actual water use from the standard is determined, and the directions of organizational and technical measures to optimize water use are determined.

A block of studies was conducted to study the qualitative composition of wastewater for both individual production flows and the total wastewater flow in conjunction with the types of dairy products produced. Concentration ranges of pollutants in wastewater during the production of hard (semi-hard) cheese, concentrated whey, butter, CMP, and dry milk products were formed.

An integrated approach to regulating water use at dairy industry enterprises, implemented through a computer program, was proposed. The article uses the main theses and conclusions given in the dissertation work of P. N. Zakharko.

Keywords: dairy industry, water use, wastewater quality, forecasting, computer program.

Введение

Предприятия молочной промышленности достаточно водоемкие, практически на всех этапах производственных процессов требуется вода питьевого качества. При этом за счет специфики осуществляемых технологических процессов можно выделить общие направления геоэкологических проблем, сформировавшихся на данных предприятиях [1]:

- превышение дебита скважины при пиковом водопотреблении за счет водоемкости санитарной обработки оборудования [1];
- недостаточное развитие систем повторного водоснабжения за счет преимущественного использования питьевой воды в технологических процессах [1];

- увеличение объема водоотведения по отношению к водопотреблению за счет переработки побочного продукта (молочной сыворотки) [1];
- ухудшение работы очистных сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства за счет сброса сильнозагрязненных сточных вод [1];
- организация новых точечных источников воздействия на водные объекты в виде выпусков сточных вод [1].

В сложившихся условиях разнонаправленного воздействия на водные объекты необходимо внедрение на предприятиях комплексного подхода регулирования водопотребления и водоотведения, качественного состава сточных вод с целью оперативного реагирования на изменения в технологических процессах.

Подходы к регулированию водопользования

Регулировать водопотребление и водоотведение на предприятиях молочной промышленности возможно за счет нормирования объема воды и качественного состава сточных вод.

Научные исследования как в части снижения водопотребления и водоотведения, так и в части улучшения качественного состава сточных вод проводились еще в период существования СССР. Разрабатывались сборники укрупненных норм водопотребления и водоотведения для промышленности [2, 3], мероприятия по организации систем оборотного и повторного водоснабжения на предприятиях молочной промышленности [4, 5], снижению объемов использования свежей воды и сброса сточных вод [6, 7, 8, 9], переработке побочных продуктов с использованием мембранных технологий [10], очистке сточных вод предприятий молочной промышленности [11, 12].

Методические основы разработки нормативов водопользования, заложенные в советское время, были взяты в дальнейшем РУП «Институт мясо-молочной промышленности» (Беларусь) для разработки Инструкции по нормированию водопотребления и водоотведения в молочной промышленности (2007) [13], которая до настоящего времени не переработана с учетом внедренных новых технологий производства молочной продукции.

Также в Беларуси продолжались отдельные научные исследования по изучению качественного состава сточных вод и подбору технологий по очистке сточных вод предприятий молочной промышленности [14–18].

Однако ни в одной работе не рассмотрен комплексный подход к нормированию водопользования на предприятиях молочной промышленности: разработка методики нормирования водопользования, расчет индивидуальных технологических нормативов водопользования, проведение сравнительного анализа фактического и нормативного водопользования, изучение качественного состава сточных вод, ежедневное регулирование водопользования, качественного состава сточных вод через программный продукт, разработка мероприятий по оптимизации водопользования [1].

Сравнительный анализ водопользования подсекции СА «Производства продуктов питания, напитков и табачных изделий» и группы 105 «Производство молочных продуктов» [19], проведенный по данным государственной статистической отчетности 1-вода (Минприроды) за период 2018–2022 гг. [20], показал о постоянном увеличении объема добычи воды и сброса сточных вод предприятиями молочной промышленности (таблица 1).

Таблица 1 – Сводные данные водопользования подсекции СА и группы 105 за период 2018–2022 гг. [20]

Год	Добыча, тыс. м ³ /год			Изъятие, тыс. м ³ /год			Сброс сточных вод в водные объекты, тыс. м ³ /год		
	СА	105	%	СА	105	%	СА	105	%
2018	44800	22614	50,5	5700	327	5,7	7900	1799	22,8
2019	45000	23719	52,7	4400	343	7,8	8100	2486	30,7
2020	47100	24279	51,5	3600	318	8,8	7900	2524	32,9
2021	45060	23844	52,9	2955	210	7,1	8200	2997	36,5
2022	45930	25397	55,3	3688	309	8,3	8508	2952	34,7

Примечание:

1. СА – подсекции СА «Производства продуктов питания, напитков и табачных изделий».
2. Группа 105 «Производство молочных продуктов».
3. % – доля воды группы 105 к подсекции СА.

Анализ видов и ассортиментов выпускаемой молочной продукции на 73 предприятиях страны показал, что у 60 % предприятий в ассортименте молочной продукции присутствуют твердые, полутвердые и/или мягкие сыры с одновременной переработкой сыворотки (концентрирование и/или сушка) либо ее отгрузкой [3]. Также предприятия по производству сыров зачастую специализируются на производстве цельномолочной продукции, масла, казеина, молочных консервов, мороженого [3].

Учитывая, что на предприятиях по производству сыра наибольшее количество технологических процессов, повторяющихся на более узких производствах, задействовано от начала до завершения процесса наибольшее количество оборудования, дальнейшее детальное изучение на данных предприятиях водопотребления и водоотведения в увязке с видами производимой продукции, качественным составом сточных вод позволило в целом охарактеризовать водопользование в молочной промышленности [3].

По технологии производства сыры подразделяются на твердые (полутвердыми) сычужные, мягкие и рассольные, плавленные [20]. Сыры могут вырабатываться с использованием различных способов коагуляции (ферментной – с помощью молокосвертывающих ферментов, кислотной или термокислотной), с посолкой или без посолки, с созреванием (зрелые) или без созревания (свежие) [20].

На основании представленных предприятиями технологических схем (инструкций) составлена общая схема производства твердых (полутвердых) сыров, включающая входящее сырье, побочные продукты, дополнительные потоки в канализацию (рисунок 1).

Каждый этап технологической схемы включает несколько единиц оборудования, которое необходимо вымыть после каждого использования или в конце рабочего цикла:

- пост приемки молока – моется 2–3 раза в сутки;
- резервуары для сырья – после каждого опорожнения;
- сепараторы, бактофуги, пастеризаторы – через 4–6 часов непрерывной работы;

- сыроизготовители, где непосредственно формируется сырное зерно – смыв зерна после каждой варки сыра (4–10 раз в сутки), мойка сыроизготовителя – 2–3 раза в сутки;

- формы для сыра, пресса – 2–5 раз в сутки.

При этом циклы мойки по отдельному оборудованию могут отличаться: полный цикл (вода – щелочь – вода – кислота – дезинфекция – вода), неполный цикл (вода – щелочь – вода – дезинфекция – вода), сокращенный цикл (вода – щелочь – вода). Практика работы с предприятиями молочной промышленности показала, что наибольшее количество оборудования ежедневно моется по неполному циклу.

Кроме того, при производстве сыров образуются как дополнительные потоки в канализацию предприятия, так и побочные продукты. Дополнительные потоки формируются:

- при работе сепараторов (бактофуг), которые имеют гидросистему для выгрузки осадка из барабана и промывки приемника осадка;
- при концентрировании сыворотки на мембранных установках сбрасывается пермеат;
- при сгущении сыворотки на вакуум-выпарных установках перед ее сушкой сбрасывается испаренная влага.

Побочным продуктом является подсырная сыворотка, выгружаемая из сыроизготовителя в процессе формирования сырного зерна.

В целом молочная сыворотка в Республике Беларусь перерабатывается по двум схемам [22]:

- неполная переработка сыворотки – концентрирование сыворотки и дальнейшая ее отгрузка на иное предприятие [22];
- полная переработка сыворотки – концентрирование, сгущение и последующая сушка сыворотки [22].

Применяется несколько способов *концентрирования* (мембранной фильтрации) сыворотки: обратный осмос (ОО), нанофильтрация (НФ), ультрафильтрация (УФ) и микрофильтрация (МФ) [23]:

- МФ применяют для предварительной обработки сырья с целью снижения бактериальной обсемененности сыворотки и удаления жира [23];

- УФ применяют для получения белковых концентратов из сыворотки, которые затем используют при производстве молочных и других продуктов [23];
- НФ и ОО используют в основном для концентрирования сыворотки или ультрафильтрованных пермеатов [23].

В процессе концентрирования сыворотки на мембранной установке образуется концентрат (сыворотка концентрированная) с высоким содержанием белка и пермеат (раствор лактозы, минеральных солей и других низкомолекулярных соединений) (дополнительный поток) [21].

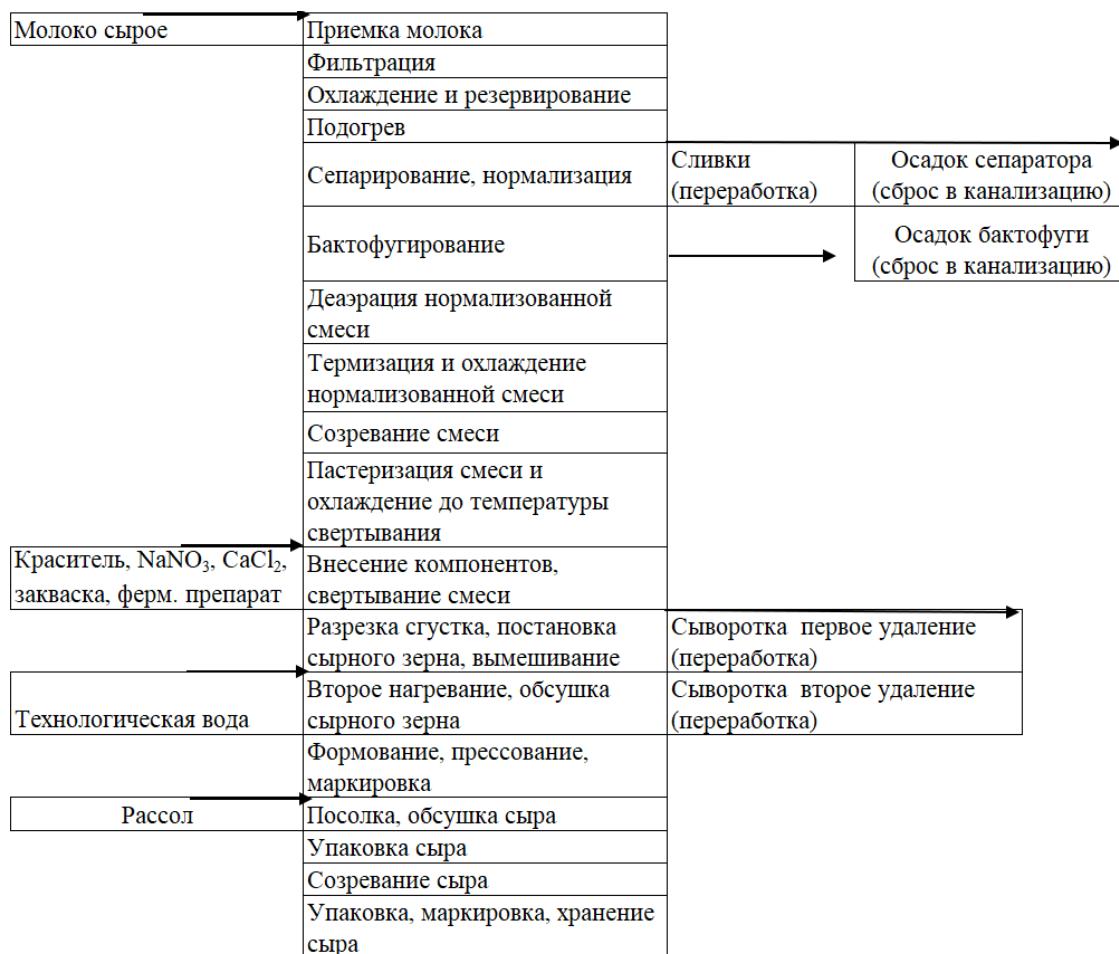


Рисунок 1 – Общая технологическая схема производства твердых (полутвердых) сыров

После концентрирования установка электродиализа используется только при необходимости получения предприятием сухой деминерализованной сыворотки.

В процессе деминерализации сыворотки на установке электродиализа, образуется обессоленная сыворотка (сыворотка деминерализованная) и концентрат солей (раствор минеральных солей), который отводится в сети канализации предприятия (дополнительный поток) [21].

При отсутствии электродиализа сыворотка концентрированная направляется для сгущения на вакуум-выпарную установку (ВВУ). При работе ВВУ образуется испаренная влага (выпар), отделяющаяся от капель сыворотки и конденсируемая в конденсаторе. Выпар загрязнен органическими веществами и его дальнейшее использование затруднено без предварительной очистки, поэтому в полном объеме отводится в сети канализации предприятия. После ВВУ сгущенная сыворотка направляется на сушильную установку [23].

За счет водоёмкости технологических процессов практически на всех этапах как основного, так и вспомогательного производства образуются производственные сточные воды.

Источники сточных вод основного производства

После наружной и внутренней мойки автомолцистерн, охлаждения оборудования по прямоточной системе, при выгрузке осадка из сепаратора (бактофуги), санитарной обработке технологического оборудования, сбросе отработанных моющих и дезинфицирующих растворов, промывке фильтров водоподготовки котельной [24].

По данным статьям образуется наиболее загрязненные сточные воды с высокими концентрациями органических веществ, сухого остатка, взвешенных веществ. Может увеличиваться объем сточных вод за счет переработки побочного продукта (сыворотки).

Источники сточных вод вспомогательного производства

Сброс дезинфицирующих растворов, промывных вод при мойке скважин, водоводов, резервуара чистой воды, при промывке фильтров станции обезжелезивания воды, при прямоточном охлаждении компрессоров (конденсаторов), от лаборатории и прачечной [24].

По данным статьям сточные воды в основном слабозагрязненные, высокие концентрации азота общего и фосфора общего, СПАВ (анион.), могут фиксироваться в сточных водах прачечной.

По результатам проведенного анализа технологических процессов, статей расходов воды и образования сточных вод, включая дополнительных потоков, на предприятиях, специализирующихся преимущественно на производстве сыров твердых (полутвердых), переработке сыворотки и производстве иной молочной продукции, разработана методика расчета водопользования для предприятий по производству молочных продуктов (далее – Методика), детализирующая статьи водопотребления и водоотведения, которые в дальнейшем используются для расчета индивидуальных технологических нормативов водопользования на единицу производимой продукции или перерабатываемого сырья [13].

В Методике обоснована необходимость изменения терминологии в части нормирования водопользования (термин «норматив»

предлагается заменить на термин «норма»¹, разработаны критерии по выбору двух подходов к разработке индивидуальных технологических норм водопользования, детализированы статьи водопотребления и водоотведения, а также уточнены отдельные параметры их расчета [13].

На основании разработанной Методики проведен расчет индивидуальных технологических норм водопотребления и водоотведения для тринадцати предприятий по производству сыров, из них пять осуществляют полную переработку сыворотки, восемь предприятий осуществляют отгрузку концентрированной сыворотки на иные предприятия.

Диапазон нормы водопотребления для предприятий, осуществляющих концентрирование сыворотки, составил от 1,18 до 3,9 м³/т, нормы водоотведения от 1,65 до 4,47 м³/т.

Наименьшие нормы водопотребления и водоотведения на предприятии, где на переработку помимо сырого молока поступает сырая сыворотка (доля сыворотки от общего объема поступившего сырья составляет 27 %). За счет небольших в целом по предприятию объемов водопотребления на производственные нужды, но в то же время значительных объемов переработки сыворотки, норма водопотребления уменьшается.

Наибольшие нормы водопотребления и водоотведения составили на предприятии, где большая часть оборудования моется два раза в сутки, а отдельные резервуары три раза в сутки.

Диапазон нормы водопотребления для предприятий, осуществляющих сушку сыворотки, от 2,30 до 5,84 м³/т, нормы водоотведения от 2,94 до 6,37 м³/т.

Наименьшие нормы водопотребления и водоотведения составили на предприятии, где поступают большие объемы переработки молока (в среднем 465 т в сутки) и в то же время не большой расход воды на производственные нужды (большая часть оборудования моется один раз в сутки, включая резервуары, большой возврат конденсата в котельную (60 %)).

Наибольшие нормы водопотребления и водоотведения на предприятии, где поступают небольшие объемы молока (в среднем 195 т в сутки), но в то же время большие расходы воды на санитарную обработку технологического оборудования, на нужды котельной за счет отсутствия системы возврата конденсата в котельную (100 % сброс конденсата в канализацию).

Наиболее водоемкими статьями расхода воды являются «санитарная обработка оборудования» (водопотребление 47–80 % от общего расхода воды на производственные нужды), «невозврат конденсата котельной, продувка котла, водоподготовка котловой воды» (водопотребление до 25 %), «обеспечение технологических параметров оборудования (прямоточное охлаждение, выгрузка осадка и др.)» (водопотребление до 15 %), «наружная и внутренняя мойка автомолцистерн» (водопотребление до 15 %).

Детализация водопользования на предприятиях по производству сыров и переработки сыворотки (концентрирование и/или сушка) позволила выделить диапазон увеличения водоотведения по отношению к водопотреблению, который составил от 10 до 30 % [24]. Процент увеличения зависит от ряда условий: суточного объема переработки молока, суточного объема поступления сторонней сыворотки на переработку, суточного объема производства иной молочной продукции, кроме сыров.

На предприятиях, не осуществляющих переработку сыворотки, норма водоотведения меньше водопотребления за счет отсутствия сброса дополнительных потоков [3]. Разница между нормой водопотребления и водоотведения будет зависеть от величины потерь воды на различных этапах технологических процессов [3].

На основании разработанных норм водопользования проведено сравнение нормативного водопотребления с фактическим. Согласно проведенному анализу статистических данных по тринадцати предприятиям, установлено, что отклонение нормативного водополь-

зования от фактического в диапазоне от 0 до 20 % является рациональным и переработка норм водопользования не требуется.

Также при сравнении в дальнейшем предприятием фактического водопользования с нормативным как в сутки, так и в месяц, диапазон отклонения данных до 20 % считается рациональным. При отклонении фактического водопользования более 20 % предприятию необходимо проработать соответствующие организационно-технические мероприятия для выяснения причин расхождения.

На всех этапах производства молочной продукции образуются производственные сточные воды, которые можно разделить на сточные воды, образующиеся непосредственно от производственных цехов (участков), и сточные воды вспомогательного производства [24].

Мониторинг сточных вод осуществлялся с применением автоматического пробоотборника, что позволило получить суточные пробы сточных вод по каждому изучаемому потоку. На рисунке 2 приведен автоматический пробоотборник и пример организации мониторинга сточных вод на канализационном колодце.



Рисунок 2 – Пример организации мониторинга сточных вод

¹ Далее по тексту статьи будет использоваться термин норма водопотребления и норма водоотведения.

Учитывая, что на большинстве предприятий по производству молочной продукции организовано несколько выпусков сточных вод от одного цеха (участка) в общесплавную сеть канализации, разработан алгоритм организации мониторинга сточных вод для получения наиболее полной информации о качественном составе сточных вод по потокам:

- сточные воды после наружной мойки автомолцистерн отбирать с учетом функционирования локальных очистных сооружений (при их наличии);
- сточные воды аппаратного участка отбирать с учетом мойки сепараторов (бактофуг) и выгрузки из них осадка;
- при наличии нескольких выпусков от сырцеха преимущественно отбирать поток, включающий мойку сепараторов (при наличии в сырцехе аппаратного участка), сыроизготовителей, сырных форм;
- при наличии нескольких выпусков от участка концентрирования сыворотки отбирать поток, включающий сброс пермеата.

Отбор проб сточных вод осуществлялся на двадцати одном предприятии как по отдельным этапам технологического процесса (внутренняя мойка автомолцистерн, аппаратный участок, пермеат от мембранных установок, котельная), так и на общем потоке цеха при производстве конкретного вида молочной продукции.

Диапазоны концентраций загрязняющих веществ в сточных водах получены при производстве следующих видов молочной продукции: сыр твердый (полутвердый), сыворотка концентрированная, масло, ЦМП, сухие молочные продукты [24].

По результатам отбора проб сточных вод по отдельным потокам можно спрогнозировать качество сточных вод в контрольном колодце.

В качестве примера использовано предприятие с суточным объемом переработки молока 140 т, годовым объемом производства сыров твердых (полутвердых) 2900 т, отгрузки сливок полуфабриката 980 т, отгрузки сыворотки молочной нанофильтрованной 8300 т.

Мониторинг сточных вод был организован на следующих потоках:

- участок наружной и внутренней мойки автомолцистерн;
- участок приемки молока и отдельный поток сырцеха (мойка сыроизготовителя);

- сырцех основной поток (без учета сыроизготовителя) и аппаратный участок;
- участок сгущения сыворотки.

Располагая нормативными объемами сточных вод по отдельным потокам, полученным при разработке индивидуальных технологических норм водопотребления и водоотведения, проведено распределение фактического объема водоотведения по потокам.

С учетом концентраций загрязняющих веществ и объемов сточных вод по отдельным потокам проведен расчет массы загрязняющих веществ. Результаты приведены в таблице 2.

Вспомогательное производство включало следующие потоки сточных вод: от лаборатории, промывки фильтров водоподготовки воды, прачечной, мойки РЧВ, прямооточного охлаждения конденсатора.

Лабораторные исследования проведены только для сточных вод от промывки фильтров водоподготовки воды. Качественный состав сточных вод от прачечной использован от предприятий-аналогов, качественный состав сточных вод от лаборатории, мойки РЧВ, охлаждения конденсатора принят на уровне качества питьевой воды, подаваемой в сеть предприятия.

Качественный состав хозяйственно-бытовых сточных вод рассчитан на основании требований СН 4.01.02-2019, таблица 10.1 [25].

Отдельно с 29.10 по 30.10 отбирался общий поток сточных вод от всего предприятия в контрольном колодце.

Располагая общей массой загрязняющих веществ от производственных сточных вод основного производства, производственных сточных вод вспомогательного производства, хозяйственно-бытовых сточных вод, спрогнозирована масса загрязняющих веществ в контрольном колодце. Сравнение расчетной массы в контрольном колодце с фактической показало, что 80 % значений попало в диапазон отклонения 0–20 % (таблица 3).

Наибольшее отклонение 26,8 % зафиксировано по взвешенным веществам, что может быть связано с поступлением незначительного объема поверхностных сточных вод в сети канализации предприятия в период отбора проб сточных вод.

Таблица 2 – Качественный состав сточных вод по потокам за период 29–30.10.2024 г. (основное производство)

Наименование вещества (показателя)	Масса наружная и внутренняя мойка автомолцистерн, кг/сут	Масса приемка, сырцех (сыроизготовитель), кг/сут	Масса сырцех (СР-мойка) и аппаратный участок, кг/сут	Масса участок сгущения сыворотки, кг/сут	Масса котельная, кг/сут ²
БПК ₅	48,74	859,50	239,59	376,72	0,10
ХПК	118,47	2292,00	621,06	1047,13	0,22
Сухой остаток	42,83	1770,00	291,80	1121,81	8,91
Взвешенные вещества	18,59	52,72	4,79	10,76	0,24
Фосфор общий	0,51	20,77	4,04	21,17	0,00
Аммоний-ион	0,04	1,50	0,84	1,57	0,01
Азот общий	3,26	46,99	25,86	23,46	0,25
СПАВ (анион)	0,10	0,57	0,48	0,88	0,00
Сульфат-ион	1,09	11,35	5,42	13,90	0,41
Хлорид-ион	3,48	207,70	39,11	88,75	0,42

Таблица 3 – Прогноз массы загрязняющих веществ в контрольном колодце

Наименование вещества (показателя)	Масса, основное производство, кг/сут	Масса, вспомогательное производство, кг/сут	Масса, хоз.-быт. сточные воды, кг/сут	Расчетная масса в КК, кг/сут	Фактич. масса в КК, кг/сут	Отклонение, %
БПК ₅	1524,66	1,49	12,42	1538,56	1721,89	10,6
ХПК	4078,88	3,87	24,84	4107,59	4785,99	14,2
Сухой остаток	3235,35	17,82	0,00	3253,17	3184,76	-2,1
Взвешенные вещества	87,10	3,35	13,46	103,91	142,04	26,8
Фосфор общий	46,49	0,29	0,41	47,20	43,11	-9,5
Аммоний-ион	3,97	0,03	2,07	6,06	4,90	-23,6
Азот общий	99,81	0,12	0,00	99,93	92,78	-7,7
СПАВ (анион)	2,03	0,06	0,00	2,09	2,37	11,9
Сульфат-ион	32,17	1,57	0,00	33,74	40,27	16,2
Хлорид-ион	339,45	1,16	1,86	342,48	337,39	-1,5

Примечание – КК – контрольный колодец.

² Для расчета использовалось качество предприятий-аналогов.

Таким образом, при правильной организации суточного мониторинга сточных вод по потокам можно спрогнозировать качественный состав сточных вод в контрольном колодце при производстве разных видов молочной продукции.

Проведение расчетов как в части водопотребления и водоотведения, так и качественного состава сточных вод требует обработки значительного объема данных.

Поэтому для автоматизации расчета индивидуальных технологических норм водопотребления и водоотведения, прогноза водопользования и качественного состава сточных вод разработана компьютерная программа. Компьютерная программа позволяет оптимизировать процедуру расчета водопользования для предприятий по производству молочных продуктов [13]. Созданы и программно реализованы алгоритмы, реализующие технологию регулирования водопользования на предприятиях по производству молочных продуктов [13].

В основу разработанного алгоритма положена следующая последовательность действий:

- формирование перечня перерабатываемого сырья производимой продукции;

- формирование статей водопользования;
- проведение расчёта водопотребления и водоотведения, безвозвратного водопотребления и потерь воды;
- обобщение статей водопользования;
- расчет индивидуальных технологических норм водопотребления и водоотведения на единицу перерабатываемого сырья или на единицу производимой продукции;
- прогноз водопользования с учетом фактических объемов поступления сырья, продукции;
- формирование информации о качественном составе сточных вод предприятия;
- прогноз качественного состава сточных вод в зависимости от режима водопользования.

Разработанная компьютерная программа дополнительно включает контроль исходных данных с учётом установленных математических зависимостей между показателями водопотребления, водоотведения, безвозвратного водопотребления и потерь воды.

Общий вид компьютерной программы приведен на рисунке 3.

Расчет водопользования на предприятиях по производству молочных продуктов

Организация: Цех по производству сыров г.п. Белынич

Главная Информационный справочник

Организация ▼ aisympm Выход

Исходные данные

Информация о предприятии
Исходное сырье
Производимая продукция
Наименование цехов (участков)

Группировка исходных данных

Расчетный расход сырья на продукцию
(заполняется при расчете ИТН водопользования на продукцию)
Выбор статей водопользования

Нормативное водопользование (расчет ИТН водопользования)

Расчет нормативного водопользования
Расчет ИТН водопользования на сырье
Расчет ИТН водопользования на продукцию

Анализ водопользования

Анализ водопользования (сырье)
Анализ водопользования (продукция)

Прогноз качественного состава сточных вод

Исходные данные
Информация о качественном составе сточных вод
Прогноз качественного состава сточных вод

© ЦНИИКИВР 2025

Рисунок 3 – Компьютерная программа по водопользованию

На основании суточного (месячного) анализа статистических данных по водопотреблению и водоотведению, качественному составу сточных вод, предприятие может оценить рациональность использования водных ресурсов при производстве разных видов молочной продукции. В программе приведен набор мероприятий по рациональному использованию водных ресурсов, снижению массы загрязняющих веществ, позволяющих предприятию сформировать направления по оптимизации водопользования на производстве [26].

Таким образом, предложенный комплексный подход в регулировании водопользования на предприятиях молочной промышленности, реализованный через компьютерную программу, позволяет предприятию оперативно реагировать на любые отклонения фактического водопользования от нормативного и оперативно принять соответствующие меры, направленные на рациональное водопользование.

Заключение

Проведенные научные исследования показывают, что даже на предприятиях, имеющих ряд водоёмких технологических процессов, требующих использование воды питьевого качества, можно вне-

дуть комплексный подход в регулировании водопользования. Эффективное управление водными ресурсами на предприятиях молочной промышленности неразрывно связано как с нормированием объема водопотребления и водоотведения, так и качественного состава сточных вод. Постоянный анализ режимов водопользования в увязке с объемами переработки сырья и производства продукции позволит в дальнейшем предприятиям молочной промышленности снизить антропогенную нагрузку на водные ресурсы.

Список цитированных источников

1. Захарко, П. Н. Геоэкологические проблемы, создаваемые молочной промышленностью / П. Н. Захарко, С. А. Дубенок // Современные проблемы природопользования и природообустройства : сборник тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, посвящённой 50-летию кафедры природообустройства, редкол.: А. А. Волчек [и др.] – Брест : БрГТУ, 2022. – С. 19.
2. Укрупненные нормы расхода воды и количества сточных вод на единицу продукции для различных отраслей промышленности. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т ВОДГЕО Госстроя СССР. – М. : Стройиздат, 1973. – 367 с.

3. Укрупненные нормы водопотребления и водоотведения для различных отраслей промышленности. Совет эконом. взаимопомощи. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т ВОДГЕО Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1978. – 590 с.
4. Межова, С. А. Применение оборотных и последовательно-повторных систем водоснабжения в проектах предприятий молочной промышленности / С. А. Межова, И. Р. Соломонов // Молочная промышленность. – 1977. – № 6. – С. 15–18.
5. Кондратавичус, В. И. Система оборотного и повторного использования воды на предприятиях молочной промышленности: обзорная информация ЦНИИТЭИ мясомолпром / В. И. Кондратавичус. – М.: Стройиздат, 1983. – 55 с.
6. Лисенкова, Л. Л. Использование конденсата соковых паров молока для оборотного водоснабжения / Л. Л. Лисенкова // Молочная промышленность. – 1974. – № 1. – С. 24–26.
7. Свинаярева, Г. А. Линия подготовки конденсата вакуум-выпарных установок к использованию в паровых котлах / Г. А. Свинаярева, Н. Г. Солодянкина // Молочная промышленность. – 1980. – № 7. – С. 30–34.
8. Магдалина, Г. И. Система механизированной мойки сушильных установок / Г. И. Магдалина // Молочная промышленность. – 1986. – № 4. – С. 7–8.
9. Рабилизиров, М. Н. Сбор и переработка смывных вод / М. Н. Рабилизиров, Л. Л. Лисенкова, И. Р. Давыдова // Молочная промышленность. – 1988. – № 4. – С. 11–13.
10. Конаныхин, А. В. О применении мембранной техники в молочной промышленности / А. В. Конаныхин, Э. Ф. Кравченко // Молочная промышленность. – 1987. – № 5. – С. 41–44.
11. Очистка сточных вод молочных предприятий / Х. А. Лооритс, Р. Р. Мунтер, Э. К. Сийрде, Л. Л. Лисенкова // Молочная промышленность. – 1975. – № 4. – С. 27–30.
12. Лисенкова, Л. Л. Характеристика сточных вод молочных предприятий и физико-химические методы их анализа ЦНИИТЭИ мясомолпром / Л. Л. Лисенкова. – М.: Стройиздат, 1984. – 32 с.
13. Захарко, П. Н. Методика расчета водопользования для предприятий по производству молочных продуктов с учетом перерабатываемого сырья и производимой продукции / П. Н. Захарко // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2021. – № 2. – С. 93–103.
14. Оптимизация комбинированных биоокислителей при очистке сточных вод молокоперерабатывающих предприятий. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/153596/165-173.pdf?sequence=1> (дата обращения: 16.06.2025).
15. Яромский, В. Н. Выбор методов и сооружений механической очистки сточных вод предприятий молочной промышленности / В. Н. Яромский, Т. И. Головач // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2001. – № 2. – С. 67–70.
16. О проблемах очистки сточных вод на предприятиях пищевой промышленности. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/153596/165-173.pdf?sequence=1> (дата обращения: 16.06.2025).
17. Яромский, В. Н. Безотходная технология очистки сточных вод предприятий молочной промышленности / В. Н. Яромский // Рациональное использование природных ресурсов: труды Междунар. конф. «Научные аспекты рационального использования природных ресурсов», Брест, 20–22 октября 1998 года / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский политехнический институт; редкол.: М. В. Голуб [и др.]. – Брест: Центр Трансфера Технологий (ЦТТ), 1998. – С. 121–125.
18. Полетаева, М. А. Пути решения проблемы очистки сточных вод молочного предприятия / М. А. Полетаева, О. С. Осадчая, Н. А. Рузаев // Ползуновский вестник. – 2013. – № 1. – С. 54–60.
19. Об утверждении, введении в действие общегосударственного классификатора Республики Беларусь: постановление Государственного комитета по стандартизации Респ. Беларусь, 5 дек. 2011 г. № 85: с изм. и доп. от 29 окт. 2021 г. № 99 // Бизнес-Инфо / ООО «Профессиональные правовые системы». – Минск, 2025.
20. Государственный водный кадастр: информационные ресурсы на сайте РУП «ЦНИИКИВР». – URL: <http://www.cricuwr.by/gvkinfo> (дата обращения: 16.06.2025).
21. Производство напитков, молока и молочной продукции: ИТС 45-2017. – Введ. 29.11.2017. – М.: Росстандарт, 2017. – 190 с.
22. Захарко, П. Н. Формирование водного баланса предприятия по производству сыров при использовании различных технологий переработки молочной сыворотки / П. Н. Захарко, С. А. Дубенок // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск: БНТУ, 2024. – С. 167–174.
23. Михайленко, И. Г. Мембранные технологии и переработка молочной сыворотки / И. Г. Михайленко. – URL: http://www.vniitti.ru/conf/conf2016/article/Mikhaylenko.I.G._BudrikV.G._statya.pdf?ysclid=ltu5gahh u286233320 (дата обращения: 16.06.2025).
24. Захарко, П. Н. Устойчивое водопользование на основе регулирования водопотребления, водоотведения, качества сточных вод на предприятиях по производству молочных продуктов / П. Н. Захарко // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2021. – № 2. – С. 93–103.
25. Канализация. Наружные сети и сооружения: Строительные нормы 4.01.02-2019: постановление Министерства архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 31 окт. 2019 г. № 59: с изм. и доп. от 27 марта 2024 г. № 20 // Бизнес-Инфо / ООО «Профессиональные правовые системы». – Минск, 2024.
26. Zakharko, P. Approaches to calculation of water use for enterprises of dairy industry / P. Zakharko // Actual environmental problems Proceedings of the IX International Scientific Conference of young scientists, graduates, master and PhD students, reviewers.: A. N. Batyn [et al.] – Minsk: ISEI of BSU, 2019. – P. 234–235.

References

1. Zaharko, P. N. Geoeekologicheskie problemy, sozdavaemye molochnoj promyshlennost'yu / P. N. Zaharko, S. A. Dubenok // Sovremennye problemy prirodoopol'zovaniya i prirodoobustrojstva: sbornik tez. dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodyh uchenykh, posvyashchyonnoj 50-letiyu kafedry prirodoobustrojstva, redkol.: A. A. Volchek [i dr.] – Brest: BrGTU, 2022. – S. 19.
2. Ukpurnennye normy raskhoda vody i kolichstva stochnykh vod na edinicu produkci dlya razlichnykh otraslej promyshlennosti. Vsesoyuzn. nauch.-issled. in-t VODGEO Gosstroya SSSR. – M.: Strojizdat, 1973. – 367 c.
3. Ukpurnennye normy vodopotrebleniya i vodootvedeniya dlya razlichnykh otraslej promyshlennosti. Sovet ekonom. vzaimopomoshchi. Vsesoyuzn. nauch.-issled. in-t VODGEO Gosstroya SSSR. – M.: Strojizdat, 1978. – 590 c.
4. Mezhoval, S. A. Primenenie oborotnykh i posledovatel'no-povtornykh sistem vodosnabzheniya v projektakh predpriyatij molochnoj promyshlennosti / S. A. Mezhoval, I. R. Solomonov // Molochnaya promyshlennost'. – 1977. – № 6. – S. 15–18.
5. Kondratavichyus, V. I. Sistema oborotnogo i povtornogo ispol'zovaniya vody na predpriyatiyah molochnoj promyshlennosti: obzornaya informatsiya CNIITEI myasomolprom / V. I. Kondratavichyus. – M.: Strojizdat, 1983. – 55 c.
6. Lisenkova, L. L. Ispol'zovanie kondensata sokovykh parov moloka dlya oborotnogo vodosnabzheniya / L. L. Lisenkova // Molochnaya promyshlennost'. – 1974. – № 1. – S. 24–26.
7. Svinareva, G. A. Liniya podgotovki kondensata vakuum-vyparnykh ustanovok k ispol'zovaniyu v parovykh kotlah / G. A. Svinareva, N. G. Solodyankina // Molochnaya promyshlennost'. – 1980. – № 7. – S. 30–34.
8. Magdalina, G. I. Sistema mekhanizirovannoy мойки sushil'nykh ustanovok / G. I. Magdalina // Molochnaya promyshlennost'. – 1986. – № 4. – S. 7–8.
9. Rabilizirov, M. N. Sbor i pererabotka smyvnykh vod / M. N. Rabilizirov, L. L. Lisenkova, I. R. Davydova // Molochnaya promyshlennost'. – 1988. – № 4. – S. 11–13.
10. Konanyhin, A. V. O primenenii membrannoy tekhniki v molochnoj promyshlennosti / A. V. Konanyhin, E. F. Kravchenko // Molochnaya promyshlennost'. – 1987. – № 5. – S. 41–44.

11. Ochistka stochnyh vod molochnyh predpriyatij / H. A. Loozits, R. R. Munter, E. K. Sijrde, L. L. Lisenkova // *Molochnaya promyshlennost'*. – 1975. – № 4. – S. 27–30.
12. Lisenkova, L. L. *Harakteristika stochnyh vod molochnyh predpriyatij i fiziko-himicheskie metody ih analiza* CNIITEI myasomolprom / L. L. Lisenkova. – M. : Strojizdat, 1984. – 32 c.
13. Zaharko, P. N. Metodika rascheta vodopol'zovaniya dlya predpriyatij po proizvodstvu molochnyh produktov s uchetom pererabatyvaemogo syr'ya i proizvodimoy produkci / P. N. Zaharko // *ZHurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya*. – 2021. – № 2. – С. 93–103.
14. Optimizaciya kombinirovannyh biookislitelej pri ochistke stochnyh vod molokopererabatyvayushchih predpriyatij. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/153596/165-173.pdf?sequence=1> (data obrashcheniya: 16.06.2025).
15. YAromskij, V. N. Vybory metodov i sooruzhenij mekhanicheskoy ochistki stochnyh vod predpriyatij molochnoj promyshlennosti / V. N. YAromskij, T. I. Golovach // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. – 2001. – № 2. – S. 67–70.
16. O problemah ochistki stochnyh vod na predpriyatiyah pishchevoj promyshlennosti. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/153596/165-173.pdf?sequence=1> (data obrashcheniya: 16.06.2025).
17. YAromskij, V. N. Bezothodnaya tekhnologiya ochistki stochnyh vod predpriyatij molochnoj promyshlennosti / V. N. YAromskij // *Racional'noe ispol'zovanie prirodnyh resursov : trudy Mezhdunar. konf. «Nauchnye aspekty racional'nogo ispol'zovaniya prirodnyh resursov»*, Brest, 20–22 oktyabrya 1998 goda / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij politekhnicheskij institut ; redkol.: M. V. Golub [i dr.]. – Brest : Centr Transfera Tekhnologij (CTT), 1998. – S. 121–125.
18. Poletaeva, M. A. Puti resheniya problemy ochistki stochnyh vod molochnogo predpriyatiya / M. A. Poletaeva, O. S. Osadchaya, N. A. Ruzaev // *Polzunovskij vestnik*. – 2013. – № 1. – S. 54–60.
19. Ob utverzhdenii, vvedenii v dejstvie obshchegosudarstvennogo klassifikatora Respubliki Belarus' : postanovlenie Gosudarstvennogo komiteta po standartizacii Resp. Belarus', 5 dek. 2011 g. № 85 : s izm. i dop. ot 29 okt. 2021 g. № 99 // *Biznes-Info / OOO «Professional'nye pravovye sistemy»*. – Minsk, 2025.
20. Gosudarstvennyj vodnyj kadastr : informacionnye resursy na sajte RUP «CNIIVIR». – URL: <http://www.cricuwr.by/gvkinfo> (data obrashcheniya: 16.06.2025).
21. Proizvodstvo napitkov, moloka i molochnoj produkci : ITS 45-2017. – Vved. 29.11.2017. – M. : Rosstandart, 2017. – 190 s.
22. Zaharko, P. N. Formirovanie vodnogo balansa predpriyatiya po proizvodstvu syrov pri ispol'zovanii razlichnyh tekhnologij pererabotki molochnoj syvorotki / P. N. Zaharko, S. A. Dubenok // *Innovacionnye tekhnologii v vodnom, kommunal'nom hozyajstve i vodnom transporte : materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. / redkol.: S. V. Haritonchik [i dr.].* – Minsk : BNTU, 2024. – S. 167–174.
23. Mihajlenko, I. G. Membrannye tekhnologii i pererabotka molochnoj syvorotki / I. G. Mihajlenko. – URL: http://www.vniitti.ru/conf/conf2016/article/MikhaylenkoI.G._BudrikV.G._statya.pdf?ysclid=ltu5gahhu286233320 (data obrashcheniya: 16.06.2025).
24. Zaharko, P. N. Ustojchivoe vodopol'zovanie na osnove regulirovaniya vodopotrebleniya, vodootvedeniya, kachestva stochnyh vod na predpriyatiyah po proizvodstvu molochnyh produktov / P. N. Zaharko // *ZHurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya*. – 2021. – № 2. – С. 93–103.
25. Kanalizaciya. Naruzhnye seti i sooruzheniya : Stroitel'nye normy 4.01.02-2019 : postanovlenie Ministerstva arhitektury i stroitel'stva Resp. Belarus', 31 okt. 2019 g. № 59 : s izm. i dop. ot 27 marta 2024 g. № 20 // *Biznes-Info / OOO «Professional'nye pravovye sistemy»*. – Minsk, 2024.
26. Zakharko, P. Approaches to calculation of water use for enterprises of dairy industry / P. Zakharko // *Actual environmental problems. Proceedings of the IX International Scientific Conference of young scientists, graduates, master and PhD students, reviewers.*: A. N. Batyn [et al.] – Minsk : ISEI of BSU, 2019. – P. 234–235.

Материал поступил 25.06.2025, одобрен 06.07.2025, принят к публикации 07.07.2025

УДК 332.334:553.04

ГРУППИРОВКА ЗЕМЕЛЬ ТЕРРИТОРИИ ГРОДНЕНСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ОТНОШЕНИЮ К ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ ОБЩЕРАСПРОСТРАНЕННЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

А. Н. Маевская¹, М. А. Богдасаров², Н. Н. Шешко³

¹ К. г.-м. н., доцент кафедры городского и регионального развития, УО «Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина», Брест, Беларусь, e-mail: maevskaya.anna@inbox.ru

² Член-корреспондент НАН Беларуси, д. г.-м. н., профессор, проректор по научной работе, профессор кафедры городского и регионального развития, УО «Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина», Брест, Беларусь, e-mail: bogdasarov73@mail.ru

³ К. т. н., доцент, начальник научно-исследовательской части, доцент кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: optimum@tut.by

Реферат

Практика показывает, что возможность добычи общераспространенных полезных ископаемых (ОПИ) во многом определяется правовым статусом земель, на которых они расположены. Это обуславливает необходимость дополнения традиционных методик оценки перспектив освоения месторождений таких ресурсов геоэкологическими критериями, связанными с учетом специфики землепользования в районе их разработки. Введение подобных критериев в оценочные схемы, как правило, способствует более точному обоснованию проектов по добыче строительного сырья и дает возможность предлагать конкретные рекомендации по рациональному использованию минерально-сырьевого потенциала регионов.

С учетом вышесказанного, в настоящей статье предложен подход к классификации земель территории Гродненской области по степени пригодности для открытой разработки месторождений строительного сырья. Авторами обосновано выделение шести групп земель: 1 – земли, наиболее пригодные для отвода под разработку ОПИ; 2 – земли, пригодные для отвода под разработку ОПИ; 3 – земли, отвод которых под разработку ОПИ допускается; 4 – земли, отвод которых под разработку ОПИ ограничивается; 5 – земли, отвод которых под разработку ОПИ крайне ограничивается; 6 – земли, отвод которых под разработку ОПИ запрещается. Для каждой из выделенных групп на основе метода анализа иерархий рассчитаны весовые коэффициенты. С использованием геоинформационных систем на основе проведенной классификации и рассчитанных весовых коэффициентов разработана цифровая растровая модель, которая наряду с геолого-промышленными параметрами будет использоваться при проведении комплексной оценки приемлемости освоения залежей ОПИ Гродненской области.

Результаты исследования могут быть полезны при планировании недропользования и оптимизации землепользования в регионе.

Ключевые слова: Гродненская область, общераспространенные полезные ископаемые, виды земель, приемлемость освоения, геоинформационное моделирование.

CLASSIFICATION OF LANDS IN THE GRODNO REGION BY SUITABILITY FOR DEVELOPMENT OF COMMON MINERALS

A. N. Maevskaya, M. A. Bogdasarov, N. N. Sheshko

Abstract

Practice demonstrates that the extraction potential of widespread mineral resources (WMR) is largely determined by the legal status of the lands where they are located. This necessitates the enhancement of traditional deposit assessment methodologies through the incorporation of geoecological criteria that consider land use specificities in mining areas. Integrating such criteria into evaluation frameworks typically enables more accurate justification of construction material extraction projects and facilitates concrete recommendations for sustainable utilization of regional mineral resource potential.

In this context, the present study proposes a land classification approach for the Grodno Region based on suitability for open-pit mining of construction materials. The authors have established a six-tier land classification system: (1) lands most suitable for WMR extraction allotment; (2) lands suitable for WMR extraction allotment; (3) lands where WMR extraction is permissible; (4) lands with restricted WMR extraction; (5) lands with severely restricted WMR extraction; and (6) lands where WMR extraction is prohibited. Weight coefficients for each category were calculated using the Analytic Hierarchy Process. Utilizing Geographic Information Systems (GIS), we developed a digital raster model incorporating this classification system and the calculated weight coefficients. This model, combined with geological and industrial parameters, will enable comprehensive assessment of WMR deposit development feasibility in the Grodno Region.

The research findings may significantly contribute to subsurface resource management planning and land use optimization in the region.

Keywords: Grodno Region, Common minerals, Land types, Development suitability, GIS modeling.

Введение

Значительное антропогенное воздействие на природные комплексы при открытой добыче ОПИ [1] ведет к необходимости дополнения оценочных схем перспектив освоения таких ресурсов дополнительными экологическими критериями. Это обусловлено тем, что классические методы оценки, которые базируются в основном на учете запасов, себестоимости добычи и т. п. критериях, а также геолого-промышленных параметров (мощность залежей, глубина их залегания, качество полезного ископаемого и др.) не учитывают экологические риски, приводящие к значительным экономическим издержкам.

Геоэкология

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-137-2-135-139>

В настоящее время в научной литературе встречается два основных подхода учета экологической составляющей при оценке разработки полезных ископаемых. Ниже подробнее рассмотрим каждый из них.

Экономический (стоимостный/затратный). В данном случае учет экологической составляющей производится через анализ затрат: величина платежей за природные ресурсы, экологические налоги, экономические выгоды от снижения антропогенной нагрузки. Так, к примеру в [2, 3] говорится о том, что определение экономической эффективности освоения месторождения ОПИ требует учета ряда

природоохранных затрат, к числу которых могут относиться: расходы по снятию плодородного слоя; расходы на рекультивацию земель; природоохранные затраты, направленные на проведение осушительных, противозерозионных мероприятий и др.

Территориально-экологический. При таком подходе к оценке ОПИ акцент делается на учете качественных характеристик, связанных с земельными ресурсами, поскольку считается, что именно земли подвержены наибольшему негативному воздействию при открытой разработке. В данном случае в научной литературе обосновано введение в оценочные схемы следующих критериев: природно-ландшафтного [4], природоохранного [5], экологического [4] и т. п. Некоторые исследователи обосновывают использование интегрального показателя, который базируется на учете нескольких факторов одновременно [6].

Таким образом, очевидна необходимость включения в схемы прогноза и оценки ОПИ экологических критериев.

Цель настоящей работы заключается в научно-обоснованной группировке земель территории Гродненской области по отношению к возможности разработки залежей ОПИ, которая наряду с геолого-промышленными параметрами будет включена в качестве критерия «Тип земель для разработки ОПИ» в общую схему прогноза и оценки перспективности освоения установленных в ходе моделирования залежей строительного сырья в данном регионе [7].

Стоит отметить, что критерий «Тип земель для разработки ОПИ» целенаправленно введен авторами данной работы для характеристики возможности использования минерально-сырьевых ресурсов недр, залегающих под площадями земель разных подтипов [8] с учетом рациональности отвода данных земель для целей открытой разработки полезных ископаемых. Этот критерий уже успешно апробирован применительно к территории Брестской области [7].

Результаты исследования и их обсуждение

Группировка земель территории Гродненской области по приемлемости к разработке залежей ОПИ заключалась в разделении земель региона с учетом:

- законодательных норм, действующих в Республике Беларусь и регулирующих вопросы разрешений/ограничений изъятия определенных видов земель с целью разработки полезных ископаемых. Такие нормы регламентируются следующими документами: Указом Президента Республики Беларусь «Об изъятии и предоставлении земельных участков; кодексы, составляющие основу экологического законодательства страны [9, 10, 11, 12]; законодательными актами, регулиющими особенности землепользования для различных категорий земель [13, 14, 15, 16, 17, 18]; проектом постановления Совета Министров Республики Беларусь «О порядке размещения, разработки, рекультивации и учета внутрихозяйственных карьеров» [10];

- подходов к группировке земель по приемлемости к открытой добычи, апробированных на практике для других регионов [4, 5, 6];

- подхода к группировке земель по степени антропогенного воздействия на природные ландшафты, используемого в работе Б. И. Кочурова [20].

Стоит отметить, что при проведении группировки земли рассматривались лишь как вскрышные породы, залегающие над поверхностью недр (именно недра являлись объектом оценки). Таким образом, при проведении классификации ключевое значение придавалось оценке возможности использования недр, залегающих под землями разных видов.

Процедура группировки земель включала три этапа, которые охарактеризованы ниже.

Этап 1. Структурирование подтипов земель территории Гродненской области. В рамках данного этапа разработана система кодов земельных ресурсов Гродненской области. Исходными данными для реализации этапа послужили материалы земельно-информационной системы исследуемого региона последнего года состояния местности. В результате все земли были объединены в шесть групп, и каждой группе присвоен соответствующий классификационный код от 1 до 6. Данная группировка послужит основой для цифровой обработки на этапе 3.

Ниже более подробно рассмотрим каждую из выделенных групп земель.

Группа 1 (код 1). Земли, наиболее пригодные для отвода под разработку ОПИ. Объединяет следующие подтипы земель базы данных земельно-информационной системы: прочие неиспользуемые земли, пески, лишенные растительности, овраги и промоины, валы, ямы, вымочки. Включение данных подтипов в группу наиболее приемлемых обусловлено тем, что данные территории характеризуются отсутствием плодородного почвенного слоя, не используются в сельскохозяйственной или лесной деятельности, а потому в соответствии с законодательством они наименее проблематично могут быть предоставлены землепользователям для добычи ОПИ путем перевода их в соответствующую категорию.

Группа 2 (код 2). Земли, пригодные для отвода под разработку ОПИ. Объединяет залежные земли, луговые земли, земли, не покрытые лесом, земли под ДКР. Специфика этих земель связана с их текущим хозяйственным статусом: сельскохозяйственные земли, временно не используемые под посевы, лесные территории без древесного покрова, а также площади с низкопродуктивными древесными насаждениями. Согласно с действующими правовыми нормами, на землях данной группы допускается размещение карьеров по добыче ОПИ.

Группа 3 (код 3). Земли, отвод которых под разработку ОПИ допускается. Отнесены пахотные земли, земли под теплицами, парниками, садами, ягодниками, плодовыми питомниками, лесные земли, земли под полевыми и лесными дорогами. Их изъятие возможно при определенных дополнительных условиях, а именно: осуществлении землепользователями рекультивации на ранее используемых для добычи земельных участках, в которых миновала надобность; при ведении ранее используемых для разработки ОПИ земель в надлежащее состояние для целей государственного органа, предоставившего их для эксплуатации.

Группа 4. Земли, отвод которых под разработку ОПИ ограничивается. Включены земли, нарушенные при разработке и добыче полезных ископаемых; земли, нарушенные при ведении строительных работ; земли, находящиеся в стадии восстановления плодородия; карьеры и иные объекты в стадии добычи полезных ископаемых; действующие стройплощадки и другие объекты в стадии строительства; земли, используемые для хранения отходов. Для использования таких подтипов земель, согласно законодательству, требуется специальное разрешение для использования.

Группа 5. Земли, отвод которых под разработку ОПИ крайне ограничивается. Отнесены земли под дорогами и транспортными коммуникациями, трубопроводами, площадями, улицами, проездами, парками, скверами, бульварами, иными озелененными территориями, курганами, кладбищами; земли, предоставленные гражданам для коллективного садоводства; усадебные земли; дворы (без разделения на производственную и жилую застройку; земли под открытыми складами, загонами, зданиями, силосными ямами. В границах таких земель на законодательном уровне вводится запрет на пользование недрами, связанный с добычей полезных ископаемых (если иное не установлено Президентом Республики Беларусь). Их изъятие может допускаться только в исключительных случаях в целях государственных нужд с возмещением убытка от изъятия владельцам.

Группа 6. Земли, отвод которых под разработку ОПИ запрещается. К данной группе были отнесены земли под водными объектами и болотами, использование которых для добычи полезных ископаемых невозможно в соответствии с действующими на законодательном уровне принципами их охраны и использования.

Этап 2. Назначение выделенным группам земель весовых коэффициентов. Для обеспечения возможности использования разработанной классификации в ходе комплексной оценки залежей ОПИ Гродненской области была проведена процедура расчета для каждой из выделенных групп земель весовых коэффициентов. С целью их расчета рассмотрены несколько, наиболее часто используемых методов, которые базируются на применении экспертных оценок: метод ранжирования [21, 22], метод попарного сопоставления [23], метод балльной оценки [22], метод анализа иерархий Т. Саати [24].

Принимая во внимание преимущества и недостатки всех указанных выше методов, итоговый выбор был основан на основе использования метода анализа иерархий Т. Саати (1993), что связано со следующими его достоинствами в сравнении с другими методами: высокая универсальность; наличие вербально-числовой шкалы, что позволяет в понятной и рациональной форме структурировать сравниваемые критерии в виде иерархии, и, как следствие, в ходе оценки сконцентрировать внимание на конкретной группе критериев; встроенный критерий качества оценки; возможность оценить важность каждого критерия [25, 26, 27].

Этап 3. Формирование растровой модели оценки пригодности земель для освоения залежей ОПИ. Разработанные в ходе реализации этапа 1 коды земель, а также рассчитанные в ходе этапа 2 весовые коэффициенты были использованы для создания растровой модели, отражающей степень приемлемости различных групп земель территории Гродненской области к освоению залежей строительного сырья (рисунок 1).

В качестве исходных данных для построения модели был использован набор цифровых векторных слоев земельно-информационной системы территории Гродненской области, представленных в формате персональной файловой базы геоданных ArcGIS в масштабе 1:10 000.

Для формирования представленной на рисунке 1 растровой модели, на *первом шаге*, было выполнено объединение подтипов земель базы данных земельно-информационной системы в группы и назначение им весовых коэффициентов. С этой целью в таблицу атрибутов слоя с землями были добавлены два числовых поля: «Группа_земель» и «Вес». Заполнение полей производилось автоматически на основе разработанной системы кодов скрипта VBA.

На *втором шаге* для систематизированного хранения классификационных описаний был создан домен кодированных значений, привязанный к базе геоданных «Земельный фонд Гродненской области» и заданы его свойства. Завершающим действием данного шага стала привязка созданного домена к атрибутивному полю «Группа земель».

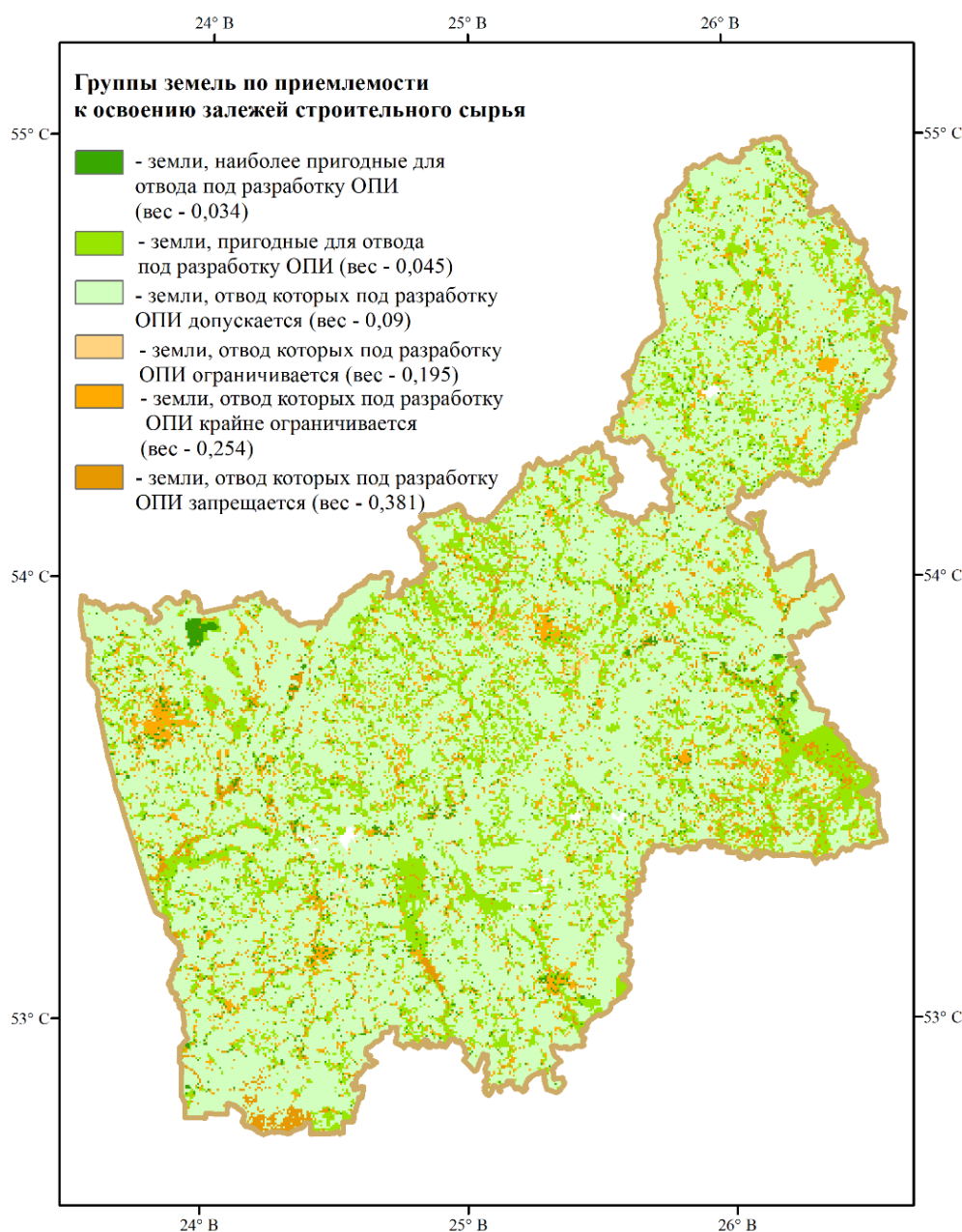


Рисунок 1 – Растровая модель, отражающая приемлемость различных групп земель Гродненской области к освоению залежей строительного сырья

На третьем шаге было выполнено преобразование ранжированного векторного слоя в растровое покрытие. В качестве значения при конвертации было использовано поле «Вес». Размер выходной ячейки задавался равным 5 м. Необходимость такой трансформации была обусловлена тем, что итоговая оценка залежей ОПИ Гродненской области будет проводится в ГИС-среде путем наложения слоев, которой лучше поддаются растровые модели.

Заключение

Таким образом, в ходе проведенного исследования предложен подход к группировке земель территории Гродненской области, базирующийся на учете правовых норм, регламентирующих вопросы разрешений/ограничений отчуждения тех или иных видов земель для целей разработки залежей, действующих в Республике Беларусь, а также подходов, применяемых к классификации земель по приемлемости к добыче, реализованных для других регионов. Он позволил выделить в пределах исследуемой территории 6 групп земель, отличающихся степенью возможности использования их для отработки. Сформированная в ходе исследования растровая модель послужит основой для обоснования рациональных схем вовлечения залежей нерудного сырья исследуемого региона в отработку. Полученные результаты могут представлять интерес для местных территориальных органов власти при разработке регионального плана действий по изучению, освоению, рациональному использованию залежей местных видов сырья области.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках выполнения задания «Разработка геолого-информационной модели кайнозойских отложений территории Брестской и Гродненской областей как основы для прогнозирования новых наиболее доступных месторождений минерального сырья» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг.

Список цитированных источников

1. Модельный кодекс о недрах и недропользовании для государств – участников СНГ. – URL: <https://iacis.ru/public/upload/files/1/140.pdf?ysclid=ldwtzunil168437426> (дата обращения: 11.08.2025).
2. Унукович, А. В. Геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых Беларуси / А. В. Унукович, Я. И. Аношко. – Минск : Беларуская навука, 2012. – 455 с.
3. Унукович, А. В. Геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых Беларуси : учеб.-метод. пособие / А. В. Унукович, Н. С. Петрова. – Минск : БГУ, 2016. – 40 с.
4. Лютягин, Д. В. Геолого-экономическое обоснование вовлечения в отработку месторождений общераспространенных полезных ископаемых : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Лютягин Дмитрий Владимирович ; Российский государственный геол.-развед. институт. – М., 2006. – 28 с.
5. Пешкова, Г. Ю. Экспресс-оценка привлекательности разработки месторождений глины на основе геолого-экономических критериев (на примере Ленинградской области) / Г. Ю. Пешкова // Корпоративное управление и инновационное развитие экономики Севера: вестн. науч.-исслед. центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского гос. ун-та. – 2016. – № 1. – С. 121–128.
6. Черемисина, Е. Н. Геоинформационные системы в природопользовании / Е. Н. Черемисина, А. А. Никитин // Геоинформатика. – 2006. – № 3. – С. 5–20.
7. Маевская, А. Н. Ранжирование земельного фонда административных районов Брестской области по приемлемости к освоению залежей строительного сырья / А. Н. Маевская, М. А. Богдасаров, Н. Н. Шешко // Природные ресурсы. – 2022. – № 2. – С. 45–56.
8. Земельно-информационная система Республики Беларусь. Порядок создания, ведения (эксплуатации и обновления) : ТКП 610-2017 (33520). – Введ. 18.07.17 (с изм. от 01.02.2022). – Минск : Госкомимущество, 2022. – 105 с.
9. Кодекс Республики Беларусь о земле : 23 июля 2008 г. № 425-3 : принят Палатой представителей 17 июля 2008 г. : одобр. Советом Респ. 28 июня 2008 г. : в ред. Закона Респ. Беларусь от 18 июля 2022 г. № 195-3 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 23.07.2025).
10. Кодекс Республики Беларусь о недрах : 10 июля 2008 г. № 406-3 : принят Палатой представителей 10 июля 2008 г. : одобр. Советом Респ. 20 июня 2008 г. : в ред. Закона Респ. Беларусь от 06.01.2021 г. № 84-3 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 23.07.2025).
11. Водный кодекс Республики Беларусь : 30 апр. 2014 г., № 149-3 : принят Палатой представителей 2 апр. 2014 г. : одобр. Советом Респ. 11 апр. 2014 г. : в ред. Закона Респ. Беларусь от 17 июля 2023 г. № 296-3 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 23.07.2025).
12. Лесной кодекс Республики Беларусь : 24 дек. 2015 г., № 332-3 : принят Палатой представителей 3 дек. 2015 г. : одобр. Советом Респ. 9 дек. 2015 г. : в ред. Закона Респ. Беларусь от 7 марта 2021 г. № 83 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 23.07.2025).
13. Об особо охраняемых природных территориях : Закон Респ. Беларусь, 15 нояб. 2018 г. № 150-3 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 23.07.2025).
14. Об автомобильных дорогах и дорожной деятельности : Закон Респ. Беларусь, 2 дек. 1994 г. № 3434-XII : в ред. Закона Респ. Беларусь от 5 янв. 2022 г. № 148-3 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 23.07.2025).
15. Об утверждении Ветеринарно-санитарных правил захоронения и уничтожения трупов животных, продуктов животного происхождения, не соответствующих требованиям ветеринарно-санитарных правил : постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Респ. Беларусь, 24 сент. 2012 г. № 758 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 23.07.2025).
16. Об утверждении Положения о порядке размещения объектов внутрихозяйственного строительства на землях сельскохозяйственного назначения : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 29 февраля 2000 г. № 260 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 23.07.2025).
17. Об охране и использовании болот (торфяников) : Закон Респ. Беларусь, 18 дек. 2019 г. № 272-3 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 23.07.2025).
18. О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС : Закон Респ. Беларусь, 26 мая 2012 г. № 385-3 : в ред. Закона Респ. Беларусь от 5 янв. 2022 г. № 148-3 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 23.07.2025).
19. О порядке размещения, разработки, рекультивации и учета внутрихозяйственных карьеров : проект пост. Совета Министров Респ. Беларусь, 18 мая 2021 г. // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 23.07.2025).
20. Кочуров, Б. И. Экодиагностика и сбалансированное развитие : учеб. пособие / Б. И. Кочуров. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 362 с.
21. Чикишев, Н. С. Использование PEST-анализа и метода Фишберна для оценки эффективности оказываемых государственных услуг в сфере таможенно-тарифного регулирования / Н. С. Чикишев, Е. С. Родионова // Управление экономическими системами: электрон. науч. журн. – 2018. – № 7 (113). – С. 42–43.
22. Логинов, К. К. Вычисление весовых коэффициентов в интегральном индексе экономической безопасности региона на примере Омской области / К. К. Логинов // Наука о человеке. Гуманитарные исследования. – 2020. – № 1 (39). – С. 186–194.
23. Спиридонов, С. Б. Анализ подходов к выбору весовых коэффициентов критериев методом парного сравнения критериев / С. Б. Спиридонов, И. Г. Булатова, В. М. Постников // Науковедение. – 2017. – № 6.
24. Осипов, А. Г. Теория и практика интегральной оценки пригодности земель природных ландшафтов для аграрного и рекреационного освоения : дис. ... д-ра геогр. наук : 25.00.26 / Осипов Алексей Георгиевич. – СПб., 2016. – 230 л.

25. Ямони, М. Оценка земель, основанная на природных факторах с целью расширения города методом анализа иерархий (МАИ) (на примере города Марвдашт, Иран) / М. Ямони, Б. Алимхаммади, С. Захро // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2013. – № 1 (110). – С. 272–279.
 26. Богомазова, И. В. Оценка привлекательности объектов сельского туризма региона на основе метода анализа иерархий / И. В. Богомазова // Современные проблемы сервиса и туризма. – 2011. – № 2. – С. 50–57.
 27. Скачкова, М. Е. Оценка уровня комфортности объектов озеленения урбанизированных территорий / М. Е. Скачкова, К. М. Копалина // Вестник СГУГиТ. – 2020. – № 2. – С. 244–258.
- References**
1. Model'nyj kodeks o nedrah i nedropol'zovanii dlya gosudarstv – uchastnikov SNG. – URL: <https://iacis.ru/public/upload/files/1/140.pdf?ysclid=ldwtzuniil168437426> (data obrashcheniya: 11.08.2025).
 2. Unukovich, A. V. Geologo-ekonomicheskaya ocenka mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh Belarusi / A. V. Unukovich, YA. I. Anoshko. – Minsk : Belaruskaya navuka, 2012. – 455 s.
 3. Unukovich, A. V. Geologo-ekonomicheskaya ocenka mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh Belarusi : ucheb.-metod. posobie / A. V. Unukovich, N. S. Petrova. – Minsk : BGU, 2016. – 40 s.
 4. Lyutyagin, D. V. Geologo-ekonomicheskoe obosnovanie вовлечения в отработку месторождений обшчераспространенных полезных ископаемых : avtoref. dis. ... kand. ekon. nauk : 08.00.05 / Lyutyagin Dmitriy Vladimirovich ; Rossijskij gosudarstvennyj geol.-razved. institut. – M., 2006. – 28 s.
 5. Peshkova, G. YU. Ekspress-ocenka privlekatel'nosti razrabotki mestorozhdenij gliny na osnove geologo-ekonomicheskikh kriteriev (na primere Leningradskoj oblasti) / G. YU. Peshkova // Korporativnoe upravlenie i innovacionnoe razvitie ekonomiki Severa: vestn. nauch.-issled. centra korporativnogo prava, upravleniya i venchurnogo investirovaniya Syktyvkarskogo gos. un-ta. – 2016. – № 1. – S. 121–128.
 6. CHeremisina, E. N. Geoinformacionnye sistemy v prirodoopol'zovanii / E. N. CHeremisina, A. A. Nikitin // Geoinformatika. – 2006. – № 3. – S. 5–20.
 7. Maevskaya, A. N. Ranzhирование zemel'nogo fonda administrativnykh rayonov Brestskoj oblasti po priemlemosti k osvoeniyu zalezhej stroitel'nogo syr'ya / A. N. Maevskaya, M. A. Bogdasarov, N. N. SSheshko // Prirodnye resursy. – 2022. – № 2. – S. 45–56.
 8. Zemel'no-informacionnaya sistema Respubliki Belarus'. Poryadok sozdaniya, vedeniya (ekspluatatsii i obnovleniya) : TKP 610-2017 (33520). – Vved. 18.07.17 (s izm. ot 01.02.2022). – Minsk : Goskomimushchestvo, 2022. – 105 s.
 9. Kodeks Respubliki Belarus' o zemle : 23 iyulya 2008 g. № 425-Z : prinyat Palatoj predstavitelej 17 iyulya 2008 g. : odobr. Sovetom Resp. 28 iyunya 2008 g. : v red. Zakona Resp. Belarus' ot 18 iyulya 2022 g. № 195-Z // ETALON : inform.-poiskovaya sistema (data obrashcheniya: 23.07.2025).
 10. Kodeks Respubliki Belarus' o nedrah : 10 iyulya 2008 g. № 406-Z : prinyat Palatoj predstavitelej 10 iyunya 2008 g. : odobr. Sovetom Resp. 20 iyunya 2008 g. : v red. Zakona Resp. Belarus' ot 06.01.2021 g. № 84-Z // ETALON : inform.-poiskovaya sistema (data obrashcheniya: 23.07.2025).
 11. Vodnyj kodeks Respubliki Belarus' : 30 apr. 2014 g., № 149-Z : prinyat Palatoj predstavitelej 2 apr. 2014 g. : odobr. Sovetom Resp. 11 apr. 2014 g. : v red. Zakona Resp. Belarus' ot 17 iyulya 2023 g. № 296-Z // ETALON : inform.-poiskovaya sistema (data obrashcheniya: 23.07.2025).
 12. Lesnoj kodeks Respubliki Belarus' : 24 dek. 2015 g., № 332-Z : prinyat Palatoj predstavitelej 3 dek. 2015 g. : odobr. Sovetom Resp. 9 dek. 2015 g. : v red. Zakona Resp. Belarus' ot 7 marta 2021 g. № 83 // ETALON : inform.-poiskovaya sistema (data obrashcheniya: 23.07.2025).
 13. Ob osobo ohranyaemykh prirodnym territoriyah : Zakon Resp. Belarus', 15 noyab. 2018 g. № 150-Z // ETALON : inform.-poiskovaya sistema (data obrashcheniya: 23.07.2025).
 14. Ob avtomobil'nykh dorogah i dorozhnoj deyatel'nosti : Zakon Resp. Belarus', 2 dek. 1994 g. № 3434-XII : v red. Zakona Resp. Belarus' ot 5 yanv. 2022 g. № 148-Z // ETALON : inform.-poiskovaya sistema (data obrashcheniya: 23.07.2025).
 15. Ob utverzhdenii Veterinarno-sanitarnykh pravil zahoroneniya i unichtozheniya trupov zhivotnykh, produktov zhivotnogo proiskhozhdeniya, ne sootvetstvuyushchih trebovaniyam veterinarno-sanitarnykh pravil : postanovlenie Ministerstva sel'skogo hozyajstva i prodovol'stviya Resp. Belarus', 24 sent. 2012 g. № 758 // ETALON : inform.-poiskovaya sistema (data obrashcheniya: 23.07.2025).
 16. Ob utverzhdenii Polozheniya o poryadke razmeshcheniya ob'ektov vnutrihozyajstvennogo stroitel'stva na zemlyakh sel'skohozyajstvennogo naznacheniya : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 29 fevralya 2000 g. № 260 // ETALON : inform.-poiskovaya sistema (data obrashcheniya: 23.07.2025).
 17. Ob ohrane i ispol'zovanii bolot (torfyanikov) : Zakon Resp. Belarus', 18 dek. 2019 g. № 272-Z // ETALON : inform.-poiskovaya sistema (data obrashcheniya: 23.07.2025).
 18. O pravovom rezhime territorij, podvergnutyyh radioaktivnomu zagryazneniyu v rezul'tate katastrofy na CHernobyl'skoj AES : Zakon Resp. Belarus', 26 maya 2012 g. № 385-Z : v red. Zakona Resp. Belarus' ot 5 yanv. 2022 g. № 148-Z // ETALON : inform.-poiskovaya sistema (data obrashcheniya: 23.07.2025).
 19. O poryadke razmeshcheniya, razrabotki, rekul'tivatsii i ucheta vnutrihozyajstvennykh kar'erov : proekt post. Soveta Ministrov Resp. Belarus', 18 maya 2021 g. // ETALON : inform.-poiskovaya sistema (data obrashcheniya: 23.07.2025).
 20. Kochurov, B. I. Ekodiagnostika i sbalansirovannoe razvitie : ucheb. posobie / B. I. Kochurov. – M. : INFRA-M, 2016. – 362 s.
 21. CHikishev, N. S. Ispol'zovanie PEST-analiza i metoda Fishberna dlya ocenki effektivnosti okazyvaemykh gosudarstvennykh uslug v sfere tamozhenno-tarifnogo regulirovaniya / N. S. CHikishev, E. S. Rodionova // Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektron. nauch. zhurn. – 2018. – № 7 (113). – S. 42–43.
 22. Loginov, K. K. Vychislenie vesovykh koeffitsientov v integral'nom indekse ekonomicheskoy bezopasnosti regiona na primere Omskoj oblasti / K. K. Loginov // Nauka o cheloveke. Gumanitarnye issledovaniya. – 2020. – № 1 (39). – S. 186–194.
 23. Spiridonov, S. B. Analiz podhodov k vyboru vesovykh koeffitsientov kriteriev metodom parnogo sravneniya kriteriev / S. B. Spiridonov, I. G. Bulatova, V. M. Postnikov // Naukovedenie. – 2017. – № 6.
 24. Osipov, A. G. Teoriya i praktika integral'noj ocenki prigodnosti zemel' prirodnym landshaftov dlya agrarnogo i rekreacionnogo osvoeniya : dis. ... d-ra geogr. nauk : 25.00.26 / Osipov Aleksej Georgievich. – SPb., 2016. – 230 l.
 25. YAmoni, M. Ocenka zemel', osnovannaya na prirodnym faktorah s cel'yu rasshireniya goroda metodom analiza ierarhij (MAI) (na primere goroda Marvdasht, Iran) / M. YAmoni, B. Alimuhammadi, S. Zahro // Vestnik Tadjikskogo nacional'nogo universiteta. Seriya estestvennykh nauk. – 2013. – № 1 (110). – S. 272–279.
 26. Bogomazova, I. V. Ocenka privlekatel'nosti ob'ektov sel'skogo turizma regiona na osnove metoda analiza ierarhij / I. V. Bogomazova // Sovremennye problemy servisa i turizma. – 2011. – № 2. – S. 50–57.
 27. Skachkova, M. E. Ocenka urovnya komfortnosti ob'ektov ozeleneniya urbanizirovannykh territorij / M. E. Skachkova, K. M. Kopalina // Vestnik SGUGiT. – 2020. – № 2. – S. 244–258.

Материал поступил 13.08.2025, одобрен 14.08.2025, принят к публикации 14.08.2025

РЕШЕНИЕ ОДНОЙ ИЗ ЗАДАЧ ГИДРОЛОГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕПЕННЫХ РЯДОВ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАПЛАСА

Л. П. Махнист¹, Т. И. Каримова², П. А. Меркушевич³, И. Ю. Сверба⁴¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры математики и информатики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: lpmakhnist@g.bstu.by² К. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры математики и информатики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ti@tut.by³ Студент 2-го курса специальности «Электронные системы и технологии» УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: 11mpa@mail.ru⁴ Студент 2-го курса специальности «Электронные системы и технологии» УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: sverbai10@gmail.com

Реферат

В работе рассматривается модель многолетних колебаний речного стока, полученная на основе стохастического дифференциального уравнения Орнштейна – Уленбека. Рассматриваемый процесс, который является однородным по времени марковским процессом диффузионного типа, с соответствующим коэффициентом сноса и диффузии, дает возможность оценить математическое ожидание распределения вероятностей изменения речного стока. Этот параметр является решением дифференциального уравнения второго порядка с краевыми условиями, полученными на основе уравнения Фоккера – Планка и обратного уравнения Колмогорова для переходной плотности вероятности.

В отличие от использования численного интегрирования этого дифференциального уравнения, в работе получено решение, представленное в виде степенного ряда. Для этого в работе используются различные подходы к решению дифференциального уравнения. Это и метод степенных рядов, который используется для нахождения решений дифференциальных уравнений в виде бесконечных степенных рядов, которые разлагаются по степеням переменной. Это и разложение функции в ряд Маклорена, который используется для нахождения решений дифференциальных уравнений.

В работе также используется преобразование Лапласа, которое, как правило, применяется лишь для решения линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Это дало возможность получить дифференциальное уравнение для функции изображения решения исходного дифференциального уравнения. Полученное дифференциальное уравнение для функции изображения было решено методом степенных рядов с получением соответствующих рекуррентных соотношений для членов степенного ряда и формул для их вычисления. Также использовалось обратное преобразование Лапласа для преобразования функции изображения в функцию оригинала, которая и является решением соответствующего дифференциального уравнения.

Предлагаемая методика может быть использована для решения более широкого круга задач стохастической гидрологии.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, ряд Маклорена, преобразование Лапласа, задачи гидрологии, модель колебаний речного стока.

SOLUTION OF ONE OF THE PROBLEMS OF HYDROLOGY USING POWER SERIES AND LAPLACE TRANSFORMATION

L. P. Makhnist, T. I. Karymava, P. A. Merkushevich, I. Yu. Sverba

Abstract

The paper considers a model of long-term fluctuations in river runoff obtained on the basis of the Ornstein – Uhlenbeck stochastic differential equation. The process under consideration, which is a homogeneous in time Markov process of diffusion type, with the corresponding coefficient of drift and diffusion, makes it possible to estimate the mathematical expectation of the probability distribution of changes in river runoff. This parameter is a solution of a second-order differential equation with boundary conditions obtained on the basis of the Fokker – Planck equation and the inverse Kolmogorov equation for the transition probability density.

Unlike using numerical integration of this differential equation, the paper obtains a solution presented in the form of a power series. For this purpose, the paper uses various approaches to solving a differential equation. This is the power series method, which is used to find solutions to differential equations in the form of infinite power series that are expanded in powers of the variable. This is the expansion of a function in a Maclaurin series, which is used to find solutions to differential equations.

The work also uses the Laplace transform, which is usually used only for solving linear differential equations with constant coefficients. This made it possible to obtain a differential equation for the image function of the solution of the original differential equation. The resulting differential equation for the image function was solved by the power series method to obtain the corresponding recurrence relations for the terms of the power series and formulas for calculating them. The inverse Laplace transform was also used to transform the image function into the original function, which is the solution to the corresponding differential equation.

The proposed technique can be used to solve a wider range of stochastic hydrology problems.

Keywords: differential equations, Maclaurin series, Laplace transform, hydrology problems, river flow oscillation model.

Введение

Рассмотрим дифференциальное уравнение для описания колебаний речного стока, используемое в стохастической гидрологии (например, в [1]):

$$\frac{d^2\theta_1}{d\zeta^2} - \zeta \frac{d\theta_1}{d\zeta} = -1, \quad \frac{d\theta_1}{d\zeta} \Big|_{\zeta=+\infty} = 0, \quad \theta_1(\zeta) \Big|_{\zeta=\zeta_*} = 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) при решении некоторых прикладных задач (например, в [1] и [2]) интегрировалось различными методами, например в [3]. В работах [4], [5] исследовалась сходимость решения этого уравнения, а в работе [6] исследовалось его асимптотическое поведение. Более сложные модели, представимые системой дифференциальных уравнений аналогичного типа, рассматривались в работах [7–10]. Общий подход к построению таких моделей рассмотрен в [11]. В работах [12], [13] и [14] для решения

уравнения (1) использовалась система компьютерной алгебры, а работе [15] рассматривались некоторые подходы к решению этого уравнения с использованием степенных рядов.

В данной статье получено решение уравнения (1) с использованием степенных рядов и преобразования Лапласа.

Использование степенных рядов для решения одной из задач гидрологии

Приведем решение этого уравнения, используя степенные ряды.

Введем обозначение $\frac{d\theta_1}{d\xi} = f_1(\xi)$. Тогда, учитывая, что

$\frac{d^2\theta_1}{d\xi^2} = \frac{df_1}{d\xi}$, приходим к линейному дифференциальному урав-

нению первого порядка $\frac{df_1}{d\xi} - \xi f_1 = -1$, с условием $f_1(\xi)|_{\xi=+\infty} = 0$.

Это уравнение вида $f_1'(\xi) - p(\xi)f_1(\xi) = q(\xi)$, которое можно решить, например, путём умножения на интегрирующий множитель: $e^{\int p(\xi)d\xi} = e^{-\int \xi d\xi} = e^{-\frac{\xi^2}{2}}$.

Тогда уравнение запишется как

$$e^{-\frac{\xi^2}{2}} \cdot f_1'(\xi) - \xi e^{-\frac{\xi^2}{2}} \cdot f_1(\xi) = -e^{-\frac{\xi^2}{2}}.$$

Заметим, что $f_1(0) = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$.

Учитывая, что $f_1'(\xi) = -1 + \xi f_1(\xi)$, получим, что $f_1'(0) = -1$.

Далее решение дифференциального уравнения $\frac{df_1}{d\xi} - \xi f_1 = -1$ будем отыскивать в виде степенного ряда

$f_1(\xi) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \xi^n$, учитывая, что $f_1(\xi)|_{\xi=\infty} = 0$. Тогда

$f_1'(\xi) = \sum_{n=1}^{\infty} n c_n \xi^{n-1}$. Подставляя $f_1'(\xi)$ и $f_1(\xi)$ в уравнение

$$\frac{df_1}{d\xi} - \xi f_1 = -1, \text{ получим } \sum_{n=1}^{\infty} n c_n \xi^{n-1} - \sum_{n=0}^{\infty} c_n \xi^{n+1} = -1.$$

Введя замены $n-1 = k$ и $n+1 = m$ в первой и второй сумме, соответственно, получим уравнение

$$\sum_{k=0}^{\infty} (k+1) c_{k+1} \xi^k - \sum_{m=1}^{\infty} c_{m-1} \xi^m = -1 \text{ или, полагая } k = n \text{ и}$$

В силу того, что левая часть последнего уравнения является

производной произведения двух функций $\left(e^{-\frac{\xi^2}{2}} f_1(\xi) \right)' = -e^{-\frac{\xi^2}{2}}$,

$$\text{получим } f_1(\xi) = \left(C - \int_{-\infty}^{\xi} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right) e^{\frac{\xi^2}{2}}.$$

Заметим, что для функции Лапласа $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$

выполняется: $\lim_{x \rightarrow +\infty} \Phi(x) = -\lim_{x \rightarrow -\infty} \Phi(x) = 0,5$ (например,

$$\text{в [16]). Поэтому } \int_0^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}}.$$

Тогда, учитывая начальное условие $f_1(\xi)|_{\xi=+\infty} = 0$, имеем

$$f_1(\xi) = \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} - \int_{-\infty}^{\xi} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right) e^{\frac{\xi^2}{2}} \text{ или}$$

$$f_1(\xi) = \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} - \int_0^{\xi} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right) e^{\frac{\xi^2}{2}}.$$

Действительно, используя правило Лопиталя нахождения пределов функций, раскрывающее неопределённости вида $\frac{0}{0}$, получим

$$\lim_{\xi \rightarrow +\infty} f_1(\xi) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\sqrt{\frac{\pi}{2}} - \int_0^{\xi} e^{-t^2/2} dt}{e^{-\xi^2/2}} = \lim_{\xi \rightarrow +\infty} \frac{\left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} - \int_0^{\xi} e^{-t^2/2} dt \right)'}{\left(e^{-\xi^2/2} \right)'} = \lim_{\xi \rightarrow +\infty} \frac{-e^{-\xi^2/2}}{-\xi e^{-\xi^2/2}} = 0.$$

$m = n$ в первой и второй сумме, соответственно, получим уравне-

ние $c_1 + \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) \xi^n - \sum_{n=1}^{\infty} c_{n-1} \xi^n = -1$ или уравнение

$$c_1 + \sum_{n=1}^{\infty} ((n+1)c_{n+1} - c_{n-1}) \xi^n = -1 \text{ для любого } \xi.$$

Следовательно, $(n+1)c_{n+1} - c_{n-1} = 0$ или $c_{n+1} = \frac{c_{n-1}}{n+1}$,

если n - натуральное число ($n \in \mathbb{N}$), и $c_1 = -1$.

При $n = 2k-1$ - нечетное число ($k \in \mathbb{N}$), получим

$$c_{2k} = \frac{c_{2k-2}}{2k} = \frac{c_0}{(2k)!!}, \text{ где } (2k)!! = 2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot (2k) \text{ - двойной}$$

факториал четного числа $2k$.

При $n = 2k$ - четное число ($k \in \mathbb{N}$), получим

$$c_{2k+1} = \frac{c_{2k-1}}{2k+1} = \frac{c_1}{(2k+1)!!},$$

где $(2k+1)!! = 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2k+1)$ - двойной факториал нечетного числа $2k+1$.

Следовательно,
$$f_1(\xi) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \xi^n = c_0 + c_1 \xi + \sum_{n=2}^{\infty} c_n \xi^n = c_0 + c_1 \xi + \sum_{k=1}^{\infty} c_{2k} \xi^{2k} + \sum_{k=1}^{\infty} c_{2k+1} \xi^{2k+1} =$$

$$= c_0 + c_1 \xi + c_0 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\xi^{2k}}{(2k)!!} + c_1 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\xi^{2k+1}}{(2k+1)!!} = c_0 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\xi^{2k}}{(2k)!!} + c_1 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\xi^{2k+1}}{(2k+1)!!}, \text{ полагая, что } 0!! = 1.$$

Так как $c_0 = f_1(0) = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$ и $c_1 = -1$, то

$$f_1(\xi) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\xi^{2k}}{(2k)!!} - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\xi^{2k+1}}{(2k+1)!!}.$$

Найдем решение дифференциального уравнения $\frac{df_1}{d\xi} - \xi f_1 = -1$, разложив функцию $f_1(\xi)$ в ряд Маклорена.

Так как $f_1'(\xi) = -1 + \xi f_1(\xi)$, то $f_1''(\xi) = f_1(\xi) + \xi f_1'(\xi)$,
 $f_1'''(\xi) = 2f_1'(\xi) + \xi f_1''(\xi)$, $f_1^{(4)}(\xi) = 3f_1''(\xi) + \xi f_1'''(\xi)$
 и т. д.

Следовательно, используя метод математической индукции, получим рекуррентное соотношение $f_1^{(n)}(\xi) = (n-1)f_1^{(n-2)}(\xi) + \xi f_1^{(n-1)}(\xi)$, где $f_1^{(n)}(\xi)$ – производная функции $f_1(\xi)$ n -го порядка, где $n \in \mathbb{N}$ и $n \geq 2$, и $f_1^{(0)}(\xi) = f_1(\xi)$.

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{f_1^{(n)}(0)}{n!} \xi^n = \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{f_1^{(2k)}(0)}{(2k)!} \xi^{2k} + \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{f_1^{(2k+1)}(0)}{(2k+1)!} \xi^{2k+1} = f_1(0) \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\xi^{2k}}{(2k)!!} + f_1'(0) \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\xi^{2k+1}}{(2k+1)!!}.$$

Учитывая, что $f_1(0) = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$ и $f_1'(0) = -1$, получим

$$f_1(\xi) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\xi^{2k}}{(2k)!!} - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\xi^{2k+1}}{(2k+1)!!}.$$

Теперь найдем решение дифференциального уравнения, используя преобразование Лапласа. Заметим, что можно доказать существование преобразования Лапласа функции $f_1(\xi)$.

Используя линейность преобразования Лапласа, найдем преобразование Лапласа функции $f_1'(\xi) - \xi f_1(\xi)$ – левой части дифференциального уравнения $f_1'(\xi) - \xi f_1(\xi) = -1$:

$$L\{f_1'(\xi) - \xi f_1(\xi)\} = L\{f_1'(\xi)\} + L\{-\xi f_1(\xi)\} = pF(p) - f_1(0) + F'(p).$$

С другой стороны, преобразование Лапласа правой части дифференциального уравнения $f_1'(\xi) - \xi f_1(\xi) = -1$ определяется соотношением:

$$L\{-1\} = \int_0^{+\infty} e^{-p\xi} (-1) d\xi = \frac{1}{p} \int_0^{+\infty} de^{-p\xi} = \frac{1}{p} \left(e^{-p\xi} \Big|_0^{+\infty} \right) = \frac{1}{p} \left(\lim_{\xi \rightarrow +\infty} e^{-p\xi} - 1 \right) = -\frac{1}{p}.$$

При $n = 2k$ – четное число ($k \in \mathbb{N}$), получим $f_1^{(2k)}(0) = (2k-1)f_1^{(2k-2)}(0) = (2k-1)!! f_1(0)$, где $(2k-1)!! = 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2k-1)$ – двойной факториал нечетного числа $2k-1$.

При $n = 2k+1$ – нечетное число ($k \in \mathbb{N}$), получим $f_1^{(2k+1)}(0) = (2k)f_1^{(2k-1)}(0) = (2k)!! f_1'(0)$,

где $(2k)!! = 2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot (2k)$ – двойной факториал четного числа $2k$.

Следовательно,
$$\frac{f_1^{(2k)}(0)}{(2k)!} = \frac{(2k-1)!! f_1(0)}{(2k)!} = \frac{f_1(0)}{(2k)!!}$$

и
$$\frac{f_1^{(2k+1)}(0)}{(2k+1)!} = \frac{(2k)!! f_1'(0)}{(2k+1)!} = \frac{f_1'(0)}{(2k+1)!!}, \text{ где } k \in \mathbb{N}.$$

Тогда ряд Маклорена для функции $f_1(\xi)$ можно записать в виде:

Так как $L\{f_1(\xi)\} = F(p) = \int_0^{+\infty} e^{-p\xi} f_1(\xi) d\xi$ – преобразование Лапласа функции $f_1(\xi)$, то $F'(p) = - \int_0^{+\infty} e^{-p\xi} \xi f_1(\xi) d\xi = L\{-\xi f_1(\xi)\}$ – преобразование Лапласа функции $-\xi f_1(\xi)$.

Заметим, что для преобразования Лапласа $f_1'(\xi)$ – производной функции $f_1(\xi)$ выполняется (например, в [17–20]):

$$L\{f_1'(\xi)\} = \int_0^{+\infty} e^{-p\xi} f_1'(\xi) d\xi = \int_0^{+\infty} e^{-p\xi} df_1(\xi) = e^{-p\xi} f_1(\xi) \Big|_0^{+\infty} - \int_0^{+\infty} f_1(\xi) de^{-p\xi} =$$

$$= \lim_{\xi \rightarrow +\infty} e^{-p\xi} f_1(\xi) - f_1(0) + p \int_0^{+\infty} e^{-p\xi} f_1(\xi) d\xi = pF(p) - f_1(0).$$

Тогда получим уравнение $pF(p) - f_1(0) + F'(p) = -\frac{1}{p}$

или $F'(p) + pF(p) = f_1(0) - \frac{1}{p}$ – линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка.

Решение дифференциального уравнения

$F'(p) + pF(p) = f_1(0) - \frac{1}{p}$ будем отыскивать в виде степен-

ного ряда $F(p) = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_n}{p^n}$, учитывая, что $F(p)|_{p=+\infty} = 0$.

Тогда $F'(p) = -\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{na_n}{p^{n+1}}$.

Подставляя $F'(p)$ и $F(p) = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_n}{p^n}$ в уравнение

$$F'(p) + pF(p) = f_1(0) - \frac{1}{p},$$

получим $-\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{na_n}{p^{n+1}} + p \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_n}{p^n} = f_1(0) - \frac{1}{p}$

или $-\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{na_n}{p^{n+1}} + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_n}{p^{n-1}} = f_1(0) - \frac{1}{p}$.

Заметим, что $a_1 = f_1(0) = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$ и $\frac{a_2}{p} = -\frac{1}{p}$, т. е.

$$a_2 = -1.$$

Следовательно, $F(p) = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{a_n}{p^n} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{p} - \frac{1}{p^2} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(2k-1)!!}{p^{2k+1}} - \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(2k)!!}{p^{2k+2}}$

или $F(p) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{p} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(2k-1)!!}{p^{2k+1}} - \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{(2k)!!}{p^{2k+2}}$.

Введя замены $k = n+1$ и $m = n-1$ в первой и второй сумме, соответственно, получим уравнение

$-\sum_{k=2}^{+\infty} \frac{(k-1)a_{k-1}}{p^k} + \sum_{m=0}^{+\infty} \frac{a_{m+1}}{p^m} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} - \frac{1}{p}$ или, полагая $k = n$ и $m = n$ в первой и второй сумме, соответственно, получим уравнение

$-\sum_{n=2}^{+\infty} \frac{(n-1)a_{n-1}}{p^n} + \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{a_{n+1}}{p^n} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} - \frac{1}{p}$ или уравнение

$a_1 + \frac{a_2}{p} + \sum_{n=2}^{+\infty} \frac{a_{n+1} - (n-1)a_{n-1}}{p^n} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} - \frac{1}{p}$ для любого p .

Следовательно, $a_{n+1} - (n-1)a_{n-1} = 0$ или

$a_{n+1} = (n-1)a_{n-1}$, если n – натуральное число, большее или

равное 2, и $a_1 = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$, $a_2 = -1$.

При $n = 2k$ – четное число ($k \in \mathbb{N}$), получим

$$a_{2k+1} = (2k-1)a_{2k-1} = (2k-1)!!a_1 = (2k-1)!!\sqrt{\frac{\pi}{2}},$$

где $(2k-1)!! = 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2k-1)$ – двойной факториал нечетного числа $2k-1$.

При $n = 2k+1$ – нечетное число ($k \in \mathbb{N}$), получим

$$a_{2k+2} = (2k)a_{2k} = (2k)!!a_2 = -(2k)!!,$$

где $(2k)!! = 2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot (2k)$ – двойной факториал четного числа $2k$.

Так как

$$L\{\xi^n\} = \int_0^{+\infty} e^{-p\xi} \xi^n d\xi = -\frac{1}{p} \int_0^{+\infty} \xi^n de^{-p\xi} = -\frac{1}{p} \left(\xi^n e^{-p\xi} \Big|_0^{+\infty} - \int_0^{+\infty} e^{-p\xi} d\xi \right) =$$

$$= -\frac{1}{p} \left(\xi^n e^{-p\xi} \Big|_0^{+\infty} - n \int_0^{+\infty} e^{-p\xi} \xi^{n-1} d\xi \right) = \frac{n}{p} \int_0^{+\infty} e^{-p\xi} \xi^{n-1} d\xi = \frac{n}{p} L\{\xi^{n-1}\}$$

$$\text{и } L\{1\} = \int_0^{+\infty} e^{-p\xi} d\xi = -\frac{1}{p} \int_0^{+\infty} de^{-p\xi} = -\frac{1}{p} \left(e^{-p\xi} \Big|_0^{+\infty} \right) = -\frac{1}{p} \left(\lim_{\xi \rightarrow +\infty} e^{-p\xi} - 1 \right) = \frac{1}{p},$$

то $L\{\xi^n\} = \frac{n!}{p^n} L\{1\} = \frac{n!}{p^{n+1}}$, если n – натуральное число.

Следовательно, для обратного преобразования Лапласа L^{-1}

выполняется соотношение $L^{-1}\left\{\frac{n!}{p^{n+1}}\right\} = \xi^n$ или

$$L^{-1}\left\{\frac{1}{p^{n+1}}\right\} = \frac{\xi^n}{n!}, \text{ где } n - \text{целое неотрицательное число.}$$

Тогда, используя линейность обратного преобразования Лапласа, получим

$$\begin{aligned}
f_1(\xi) &= L^{-1} F(p) = L^{-1} \left\{ \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{p} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(2k-1)!!}{p^{2k+1}} - \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{(2k)!!}{p^{2k+2}} \right\} = \\
&= \sqrt{\frac{\pi}{2}} L^{-1} \left\{ \frac{1}{p} \right\} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{+\infty} (2k-1)!! L^{-1} \left\{ \frac{1}{p^{2k+1}} \right\} - \sum_{k=0}^{+\infty} (2k)!! L^{-1} \left\{ \frac{1}{p^{2k+2}} \right\} = \\
&= \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot 1 + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{+\infty} (2k-1)!! \frac{\xi^{2k}}{(2k)!} - \sum_{k=0}^{+\infty} (2k)!! \frac{\xi^{2k+1}}{(2k+1)!} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{\xi^{2k}}{(2k)!!} - \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\xi^{2k+1}}{(2k+1)!!} = \\
&= \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\xi^{2k}}{(2k)!!} - \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\xi^{2k+1}}{(2k+1)!!}.
\end{aligned}$$

Так как $\frac{d\theta_1}{d\xi} = f_1(\xi)$, то $\theta_1(\xi) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\xi^{2k+2}}{(2k)!!(2k+1)} - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\xi^{2k+2}}{(2k+1)!!(2k+2)} + C$.

Учитывая начальное условие $\theta_1(\xi)|_{\xi=\xi_*} = 0$, получаем, что

$$\theta_1(\xi) = S_1(\xi) - S_1(\xi_*),$$

где

$$S_1(\xi) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\xi^{2k+2}}{(2k)!!(2k+1)} - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\xi^{2k+2}}{(2k+1)!!(2k+2)}$$

или

$$S_1(\xi) = \sum_{n=1}^{+\infty} \left(\frac{\pi}{2} \right)^{\left\{ \frac{n}{2} \right\}} \frac{(-1)^{n-1} \xi^n}{(n-1)!! n},$$

где $\left\{ t \right\}$ – дробная часть числа t .

Заключение

В работе использовалось преобразование Лапласа для решения дифференциального уравнения (1), которое, как правило, применяется только для решения линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Предлагаемая методика решения уравнения (1) может быть использована для решения более широкого круга задач стохастической гидрологии, которые описываются дифференциальными уравнениями аналогичного вида (например, в [4] и [5]).

Список цитированных источников

1. Найденов, В. И. Нелинейные модели колебаний речного стока / В. И. Найденов, В. И. Швейкина // Водные ресурсы. – 2002. – Т. 29, № 1. – С. 62–67.
2. Волчек, А. А. Сравнительная оценка марковских и нелинейных моделей годового стока рек Беларуси / А. А. Волчек, С. И. Парфомук // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Физика, математика, информатика. – 2006. – № 5. – С. 56–60.
3. Волчек, А. А. О решении одной стохастической модели многолетних колебаний речного стока / А. А. Волчек, И. И. Гладкий, Л. П. Махнист // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Физика, математика, информатика. – 2008. – № 5. – С. 84–87.
4. Гетман, В. А. Сходимость и свойства решения одного стохастического уравнения / В. А. Гетман, И. И. Гладкий, С. В. Ефимик // Современные проблемы математики и вычислительной техники : материалы VI Респ. науч. конф. молодых ученых и студентов, Брест, 26–28 нояб. 2009 г. : в 2 ч. / Брест. гос. техн. ун-т ; под ред. В. С. Рубанова [и др.]. – Брест, 2009. – Ч. 2. – С. 121–126.
5. Волчек, А. А. О сходимости решения одной малопараметрической модели многолетних колебаний речного стока / А. А. Волчек, Л. П. Махнист, В. С. Рубанов // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Физика, математика, информатика. – 2009. – № 5. – С. 2–5.
6. Волчек, А. А. Об асимптотическом поведении параметра одного из распределений вероятностей речного стока / А. А. Волчек, Л. П. Махнист, В. С. Рубанов // Проблемы водоснабжения, водоотведения и энергосбережения в западном регионе Республики Беларусь : сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 22–23 апр. 2010 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. В. Басов [и др.]. – Брест, 2010. – С. 45–49.
7. Волчек, А. А. О решении системы дифференциальных уравнений, одной из моделей многолетних колебаний речного стока / А. А. Волчек, Л. П. Махнист, В. С. Рубанов // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Физика. – 2010. – № 1. – С. 68–77.
8. Волчек, А. А. О решении системы дифференциальных уравнений, одной из задач стохастической гидрологии / А. А. Волчек, Л. П. Махнист, В. С. Рубанов // Международная математическая конференция «Пятые Богдановские чтения по обыкновенным дифференциальным уравнениям» : тез. докл. междунар. науч. конф., Минск, 7–10 дек. 2010 г. / Ин-т математики НАН Беларуси ; редкол.: С. Г. Красовский, А. А. Леваков, С. А. Мазаник. – Минск, 2010. – С. 105.
9. Волчек, А. А. О параметрах распределения вероятностей диффузионной модели стохастической гидрологии / А. А. Волчек, И. И. Гладкий, Л. П. Махнист // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Физика, математика, информатика. – 2010. – № 5. – С. 48–53.
10. Волчек, А. А. О моментах распределения вероятностей модели диффузионного типа в практике гидрологии / А. А. Волчек, И. И. Гладкий, Л. П. Махнист // Математика и ее приложения : межвуз. сб. науч. тр. / Ассоциация математиков вузов северо-запада ; под ред. Д. П. Голоскокова, А. Р. Шкадовой. – СПб, 2011. – Вып. 3. – С. 139–148.
11. Махнист, Л. П. Моменты распределения вероятностей модели гидрологии / Л. П. Махнист, А. А. Волчек, 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 : БрГУ, 2021. – С. 93–95.
12. Махнист, Л. П. Применение систем компьютерной алгебры для решения 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.
13. 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.

14. 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. 17–19.
15. Меркушевич, П. А. Использование рядов для моделирования одной задачи гидрологии / П. А. Меркушевич, И. Ю. Сверба, Л. П. Махнист // Инновационные технологии обучения физико-математическим дисциплинам : сб. науч. тр. / Мозыр. гос. пед. ун-т им. И. П. Шамякина ; В. В. Давыдовская (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2025. – С. 259–261.
16. Корн, Г. А. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. А. Корн, Т. М. Корн. – М. : Наука, 1984. – 832 с.
17. Гладкий, И. И. Элементы теории функций комплексного переменного и операционного исчисления : методические указания по дисциплине "Высшая математика" для студентов технических специальностей / И. И. Гладкий, М. П. Сидоревич, Т. А. Тузик. – Брест : Брест. гос. техн. ун-т, 2000. – 52 с.
18. Гладкий, И. И. Ряды. Теория функции комплексной переменной. Операционное исчисление / И. И. Гладкий, И. В. Лизунова, Т. А. Тузик. – Брест : Брест. гос. техн. ун-т, 2011. – 39 с.
19. Differential equations. Multiple integrals. Infinite sequences and series : учебно-методическая разработка на английском языке по дисциплине "Математика" / Брест. гос. техн. ун-т ; сост. И. И. Гладкий, А. В. Дворниченко, Н. А. Дерачиц [и др.]. – Брест : Брест. гос. техн. ун-т, 2014. – 74 с.
20. Elements of theory of analytic functions of one complex variable : учебно-методическая разработка на английском языке по дисциплине "Математика" / Брест. гос. техн. ун-т ; сост. И. И. Гладкий, А. В. Дворниченко, Т. И. Каримова [и др.]. – Брест : Брест. гос. техн. ун-т, 2015. – 49 с.
8. Volchek, A. A. O reshenii sistemy differentsial'nykh uravnenij, odnoj iz zadach stohasticheskoy gidrologii / A. A. Volchek, L. P. Mahnist, V. S. Rubanov // Mezhdunarodnaya matematicheskaya konferenciya «Pyatye Bogdanovskie chteniya po obyknovennym differentsial'nykh uravneniyam» : tez. dokl. mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 7–10 dek. 2010 g. / In-t matematiki NAN Belarusi ; redkol.: S. G. Krasovskij, A. A. Levakov, S. A. Mazanik. – Minsk, 2010. – S. 105.
9. Volchek, A. A. O parametrah raspredeleniya veroyatnostej diffuzionnoj modeli stohasticheskoy gidrologii / A. A. Volchek, I. I. Gladkij, L. P. Mahnist // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fizika, matematika, informatika. – 2010. – № 5. – S. 48–53.
10. Volchek, A. A. O momentah raspredeleniya veroyatnostej modeli diffuzionnogo tipa v praktike gidrologii / A. A. Volchek, I. I. Gladkij, L. P. Mahnist // Matematika i ee prilozheniya : mezhvuz. sb. nauch. tr. / Associaciya matematikov vuzov severo-zapada ; pod red. D. P. Goloskokova, A. R. SHkadovoj. – SPb, 2011. – Vyp. 3. – S. 139–148.
11. Mahnist, L. P. Momenty raspredeleniya veroyatnostej modeli gidrologii / L. P. Mahnist, A. A. Volchek, I. I. Gladkij // Matematicheskie i fizicheskie metody issledovanij: nauchnyj i metodicheskij aspekty : sb. materialov Rесп. nauch.-prakt. konf., Brest, 22–23 apr. 2021 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. N. N. Sendera. – Brest : BrGU, 2021. – S. 93–95.
12. Mahnist, L. P. Primenenie sistem komp'yuternoj algebry dlya resheniya modeli stohasticheskoy gidrologii / L. P. Mahnist, E. N. Zashchuk, I. I. Gladkij // Matematicheskie i fizicheskie metody issledovanij: nauchnyj i metodicheskij aspekty : sb. materialov Rесп. 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.
13. Mahnist, L. P. Ispolzovanie 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.
14. 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 Rесп. 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. 17–19.
15. Merkushevich, P. A. Ispolzovanie ryadov dlya modelirovaniya odnoj zadachi gidrologii / P. A. Merkushevich, I. YU. Sverba, L. P. Mahnist // Innovacionnye tekhnologii obucheniya fiziko-matematicheskimi disciplinam : sb. nauch. tr. / Mозыр. gos. ped. un-t im. I. P. SHamyakina ; V. V. Davydovskaya (otv. red.) [i dr.]. – Mозыр', 2025. – S. 259–261.
16. Korn, G. A. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov / G. A. Korn, T. M. Korn. – M. : Nauka, 1984. – 832 s.
17. Gladkij, I. I. Elementy teorii funkciy kompleksnogo peremennogo i operacionnogo ischisleniya : metodicheskie ukazaniya po discipline "Vysshaya matematika" dlya studentov tekhnicheskikh special'nostej / I. I. Gladkij, M. P. Sidorevich, T. A. Tuzik. – Brest : Brest. gos. tekhn. un-t, 2000. – 52 s.
18. Gladkij, I. I. Ryady. Teoriya funkciy kompleksnoj peremennoj. Operacionnoe ischislenie / I. I. Gladkij, I. V. Lizunova, T. A. Tuzik. – Brest : Brest. gos. tekhn. un-t, 2011. – 39 s.
19. Differential equations. Multiple integrals. Infinite sequences and series : uchebno-metodicheskaya razrabotka na anglijskom yazyke po discipline "Matematika" / Brest. gos. tekhn. un-t ; sost. I. I. Gladkij, A. V. Dvornichenko, N. A. Derachic [i dr.]. – Brest : Brest. gos. tekhn. un-t, 2014. – 74 s.
20. Elements of theory of analytic functions of one complex variable : uchebno-metodicheskaya razrabotka na anglijskom yazyke po discipline "Matematika" / Brest. gos. tekhn. un-t ; sost. I. I. Gladkij, A. V. Dvornichenko, T. I. Karimova [i dr.]. – Brest : Brest. gos. tekhn. un-t, 2015. – 49 s.

References

1. Najdenov, V. I. Nelinejnye modeli kolebanij rechnogo stoka / V. I. Najdenov, V. I. SHvejina // Vodnye resursy. – 2002. – T. 29, № 1. – S. 62–67.
2. Volchek, A. A. Sravnitel'naya ocenka markovskih i nelinejnykh modelej godovogo stoka rek Belarusi / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fizika, matematika, informatika. – 2006. – № 5. – S. 56–60.
3. Volchek, A. A. O reshenii odnoj stohasticheskoy modeli mnogoletnih kolebanij rechnogo stoka / A. A. Volchek, I. I. Gladkij, L. P. Mahnist // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fizika, matematika, informatika. – 2008. – № 5. – S. 84–87.
4. Getman, V. A. Skhodimost' i svoystva resheniya odnogo stohasticheskogo uravneniya / V. A. Getman, I. I. Gladkij, S. V. Efimik // Sovremennye problemy matematiki i vychislitel'noj tekhniki : materialy VI Rесп. nauch. konf. molodykh uchennykh i studentov, Brest, 26/28 noyab. 2009 g. : v 2 ch. / Brest. gos. tekhn. un-t ; pod red. V. S. Rubanova [i dr.]. – Brest, 2009. – CH. 2. – S. 121–126.
5. Volchek, A. A. O skhodimosti resheniya odnoj maloparametricheskoy modeli mnogoletnih kolebanij rechnogo stoka / A. A. Volchek, L. P. Mahnist, V. S. Rubanov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fizika, matematika, informatika. – 2009. – № 5. – S. 2–5.
6. Volchek, A. A. Ob asimptoticheskom povedenii parametra odnogo iz raspredelenij veroyatnostej rechnogo stoka / A. A. Volchek, L. P. Mahnist, V. S. Rubanov // Problemy vodosnabzheniya, vodoootvedeniya i energosberezheniya v zapadnom regione Respubliki Belarus' : sb. materialov Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Brest, 22–23 apr. 2010 g. / Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: S. V. Basov [i dr.]. – Brest, 2010. – S. 45–49.
7. Volchek, A. A. O reshenii sistemy differentsial'nykh uravnenij, odnoj iz modelej mnogoletnih kolebanij rechnogo stoka / A. A. Volchek, L. P. Mahnist, V. S. Rubanov // Vestnik Brestskogo universiteta. Seriya 4, Matematika. Fizika. – 2010. – № 1. – S. 68–77.
8. Volchek, A. A. O reshenii sistemy differentsial'nykh uravnenij, odnoj iz zadach stohasticheskoy gidrologii / A. A. Volchek, L. P. Mahnist, V. S. Rubanov // Mezhdunarodnaya matematicheskaya konferenciya «Pyatye Bogdanovskie chteniya po obyknovennym differentsial'nykh uravneniyam» : tez. dokl. mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 7–10 dek. 2010 g. / In-t matematiki NAN Belarusi ; redkol.: S. G. Krasovskij, A. A. Levakov, S. A. Mazanik. – Minsk, 2010. – S. 105.
9. Volchek, A. A. O parametrah raspredeleniya veroyatnostej diffuzionnoj modeli stohasticheskoy gidrologii / A. A. Volchek, I. I. Gladkij, L. P. Mahnist // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fizika, matematika, informatika. – 2010. – № 5. – S. 48–53.
10. Volchek, A. A. O momentah raspredeleniya veroyatnostej modeli diffuzionnogo tipa v praktike gidrologii / A. A. Volchek, I. I. Gladkij, L. P. Mahnist // Matematika i ee prilozheniya : mezhvuz. sb. nauch. tr. / Associaciya matematikov vuzov severo-zapada ; pod red. D. P. Goloskokova, A. R. SHkadovoj. – SPb, 2011. – Vyp. 3. – S. 139–148.
11. Mahnist, L. P. Momenty raspredeleniya veroyatnostej modeli gidrologii / L. P. Mahnist, A. A. Volchek, I. I. Gladkij // Matematicheskie i fizicheskie metody issledovanij: nauchnyj i metodicheskij aspekty : sb. materialov Rесп. nauch.-prakt. konf., Brest, 22–23 apr. 2021 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. N. N. Sendera. – Brest : BrGU, 2021. – S. 93–95.
12. Mahnist, L. P. Primenenie sistem komp'yuternoj algebry dlya resheniya modeli stohasticheskoy gidrologii / L. P. Mahnist, E. N. Zashchuk, I. I. Gladkij // Matematicheskie i fizicheskie metody issledovanij: nauchnyj i metodicheskij aspekty : sb. materialov Rесп. 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.
13. Mahnist, L. P. Ispolzovanie 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.
14. 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 Rесп. 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. 17–19.
15. Merkushevich, P. A. Ispolzovanie ryadov dlya modelirovaniya odnoj zadachi gidrologii / P. A. Merkushevich, I. YU. Sverba, L. P. Mahnist // Innovacionnye tekhnologii obucheniya fiziko-matematicheskimi disciplinam : sb. nauch. tr. / Mозыр. gos. ped. un-t im. I. P. SHamyakina ; V. V. Davydovskaya (otv. red.) [i dr.]. – Mозыр', 2025. – S. 259–261.
16. Korn, G. A. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov / G. A. Korn, T. M. Korn. – M. : Nauka, 1984. – 832 s.
17. Gladkij, I. I. Elementy teorii funkciy kompleksnogo peremennogo i operacionnogo ischisleniya : metodicheskie ukazaniya po discipline "Vysshaya matematika" dlya studentov tekhnicheskikh special'nostej / I. I. Gladkij, M. P. Sidorevich, T. A. Tuzik. – Brest : Brest. gos. tekhn. un-t, 2000. – 52 s.
18. Gladkij, I. I. Ryady. Teoriya funkciy kompleksnoj peremennoj. Operacionnoe ischislenie / I. I. Gladkij, I. V. Lizunova, T. A. Tuzik. – Brest : Brest. gos. tekhn. un-t, 2011. – 39 s.
19. Differential equations. Multiple integrals. Infinite sequences and series : uchebno-metodicheskaya razrabotka na anglijskom yazyke po discipline "Matematika" / Brest. gos. tekhn. un-t ; sost. I. I. Gladkij, A. V. Dvornichenko, N. A. Derachic [i dr.]. – Brest : Brest. gos. tekhn. un-t, 2014. – 74 s.
20. Elements of theory of analytic functions of one complex variable : uchebno-metodicheskaya razrabotka na anglijskom yazyke po discipline "Matematika" / Brest. gos. tekhn. un-t ; sost. I. I. Gladkij, A. V. Dvornichenko, T. I. Karimova [i dr.]. – Brest : Brest. gos. tekhn. un-t, 2015. – 49 s.

Материал поступил 29.08.2025, одобрен 29.08.2025,
принят к публикации 29.08.2025

УДК 655.557:655.7

РАЗРАБОТКА РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРЕДПРИЯТИЯ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ПРИМЕРЕ ПИНСКОГО ФИЛИАЛА ОАО «САВУШКИН ПРОДУКТ»

Е. А. Урецкий¹, И. В. Николенко², В. В. Мороз³

¹ Компетентный внештатный представитель Корпорации Hoffland Environmental Inc. (USA), инженер-эколог, РУП «Белорусский государственный проектный институт», Витебск, Беларусь, e-mail: euretsky@yandex.by

² Д. т. н., профессор, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и санитарной техники, институт «Академия строительства и архитектуры» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, e-mail: energia-09@mail.ru

³ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vovavall@mail.ru

Реферат

Проведено обследование образующих сточные воды производств и существующей станции нейтрализации отработанных технологических растворов Пинского филиала ОАО «Савушкин продукт». По результатам обследований разработаны мероприятия по совершенствованию образующих сточные воды производств по направлению уменьшения потребления воды на технологические нужды и выноса токсичных ингредиентов со сточными водами, а также подобрано рекомендованное оборудование для эффективной очистки сточных вод. Подготовлено техническое задание для проектирования современных очистных сооружений обработки сточных вод молочного производства. Совместно с фирмой HYDROMATIC GmbH (Германия) разработана технология очистки сточных вод этого предприятия с высокоэффективным аппаратным оформлением. Данная компания предлагает предприятию проверенное и успешно функционирующее во многих странах мира сочетание способов физико-химической и биологической очистки производственных сточных вод, в котором используется современное высокоэффективное технологическое оборудование, материалы, а также передовые технологии в области физико-химической очистки, биологической очистки, доочистки сточных вод и системы автоматического контроля, позволяющие получать необходимое качество очищенной воды с минимальными эксплуатационными затратами.

В работе проведены исследования состава сточных вод производства молочной продукции с целью совершенствования использования в направлении уменьшения потребления питьевой воды на технологические нужды и выноса токсичных составляющих со сточными водами. При проведении исследований была осуществлена проверка полученных выводов, использованных для разработки технологий очистки различных видов сточных вод, внедрения высокоэффективного технологического оборудования и использования полученного при биологической обработке сточных вод биогаза для мини ТЭЦ.

Ключевые слова: молочные продукты, химические аппараты, фильтры, реагенты, осветлитель, осадок, биогаз.

DEVELOPMENT OF A RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY FOR WASTEWATER TREATMENT OF A DAIRY PRODUCTS ENTERPRISE, ON THE EXAMPLE OF THE PINSK BRANCH OF SAVUSHKIN PRODUCT JSC

E. A. Urecky, I. V. Nikolenko, V. V. Moroz

Abstract

An inspection of wastewater-generating industries and the existing neutralization station for waste process solutions of the Pinsk branch of JSC Savushkin Product was conducted. Based on the inspection results, measures were developed to improve wastewater-generating industries in the direction of reducing water consumption for process needs and removing toxic ingredients with wastewater, and recommended equipment for effective wastewater treatment was selected. A technical assignment was prepared for the design of modern treatment facilities for dairy wastewater treatment. Together with HYDROMATIC GmbH (Germany), a wastewater treatment technology for this enterprise with highly effective hardware was developed. This company offers the enterprise a proven and successfully operating in many countries of the world combination of methods of physical-chemical and biological purification of industrial wastewater, which uses modern highly efficient technological equipment, materials, as well as advanced technologies in the field of physical-chemical purification, biological purification, additional purification of wastewater and automatic control systems, allowing to obtain the required quality of purified water with minimal operating costs. The work conducted studies of the composition of wastewater from the production of dairy products in order to improve the use in the direction of reducing the consumption of drinking water for technological needs and the removal of toxic components with wastewater. During the research, the obtained conclusions were verified, used to develop technologies for cleaning various types of wastewater, the introduction of highly efficient technological equipment and the use of biogas obtained during biological treatment of wastewater for mini-CHPs.

Keywords: dairy products, chemical apparatus, filters, reagents, clarifier, sediment, biogas.

Введение

Сточные воды предприятий молочной промышленности относятся к категории высококонцентрированных по органическим загрязнениям [1–5, 7]. Обычно предприятия располагаются на территории населенных пунктов, и сточные воды этих предприятий принимаются канализационными сетями системы водоотведения города (населенного пункта) в соответствии с п. 5.2 [22].

Состав и концентрация загрязнений в сточных водах такого рода предприятий зависят от особенностей технологического процесса производства и ассортимента выпускаемой продукции [6, 8–10].

Сточные воды, как правило, содержат большое количество органических загрязнений – белки, жиры, углеводы, а также загрязне-

ния от мытья тары оборудования и пола. Это обусловлено потерями и отходами сырья при производстве белковых продуктов (сыра, творога и др.). Концентрация загрязняющих веществ в сточных водах предприятий молочной промышленности в данном случае в пять раз и более превышает допустимые значения.

В соответствии с существующими нормативами сточные воды перед выпуском в городскую систему водоотведения должны быть подвергнуты локальной (предварительной) очистке на территории предприятия.

Как правило, очистка сточных вод этих производств сводится к снижению концентрации взвешенных веществ и жиров. Этим достигается защита канализационных сетей от засорений и возможность извлечения из сточных вод для утилизации содержащихся

в них ценных веществ, например, жиров, белковых веществ, а также загрязнений, затрудняющих последующую биологическую очистку общего объема сточных вод предприятия и населенного пункта [14].

Острая необходимость в строительстве локальных очистных сооружений связана и с тем, что в настоящее время продвижение продукции на рынки дальнего зарубежья возможно только при выпуске продукции с благополучной экологической ситуацией на предприятии, эти требования оговаривают ИСО 9001 и ИСО 1401.

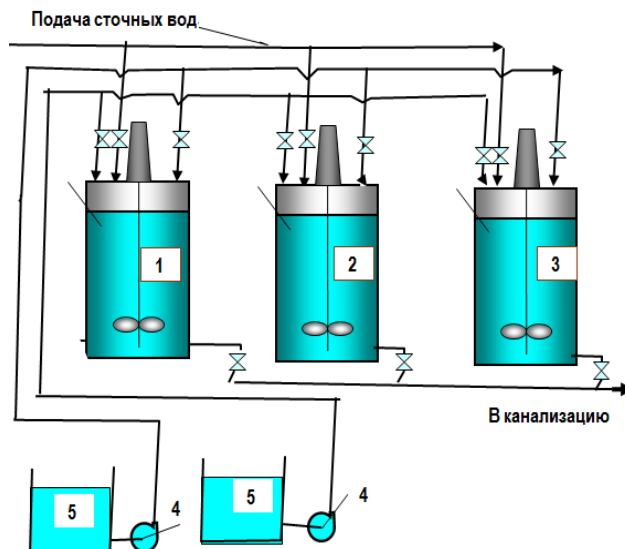
Разработка технологии очистки сточных вод производств молочных продуктов

Общее водопотребление на ОАО «Савушкин продукт» в г. Пинске за последние годы составило 267840 м³/год. Объединенный хозяйственно-питьевой и производственный водопровод предприятия присоединен к городскому водопроводу.

Наружные сети водопровода включают систему трубопроводов и установку для обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением. Установка для обеззараживания воды смонтирована в помещении главного производственного корпуса. На отдельных участках системы водоснабжения эксплуатируются локальные установки – фильтры для обезжелезивания воды, установленные в производственном цехе, фильтры натрий-катионитового умягчения воды.

Оборотные системы водоснабжения на предприятии предназначены для водяного охлаждения оборудования, для охлаждения компрессоров, охлаждения оборудования сушильного цеха. Обратная система включает в свой состав две градирни и насосную станцию. Подпитка системы осуществляется из хозяйственно-питьевого водопровода. Вода из градирни в случае её ремонта сбрасывается в систему дождевой канализации предприятия.

На предприятии существует отдельная система канализации, состоящая из сетей дождевой канализации, хозяйственно-бытовой и производственной канализации. Локальных очистных сооружений промышленных сточных вод на предприятии нет. Имеет место только станция нейтрализации отработанных щелочных и кислотных моечных растворов перед сбросом их в городскую хозяйственно-бытовую канализацию, приведенная на рисунке 1.



- 1 – емкость для нейтрализации V = 6 м³; 2 – емкость для нейтрализации V = 6 м³; 3 – емкость для нейтрализации V = 10 м³;
4 – насосы для дозирования концентрированных реагентов;
5 – емкость для концентрированных реагентов

Рисунок 1 – Упрощенная схема станции нейтрализации концентрированных отработанных растворов, оборудования и технологических трубопроводов

В процессе обследования производств, образующих сточные воды, проведенного совместно с химико-технологической лабораторией предприятия, установлено, что на предприятии имеет место превышение показателей загрязняющих веществ на выпусках в городскую хозяйственно-бытовую канализацию установленных для г. Пинска (таблица 1).

Таблица 1 – Средние значения состава сточных вод Пинского филиала ОАО «Савушкин продукт» и ПДК для сброса сточных вод на выпуск в городскую хозяйственно-бытовую канализацию для г. Пинска

Наименование показателей	Ед. изм.	Результаты исследований				ПДК, установленные для сброса сточных вод в х/б канализацию для г. Пинска
		1	2	3	4	
Взвешенные вещества	мг/дм ³		151			до 500
БПК ₅	мгО ₂ /дм ³	860	550	800	390	до 400
pH		7,6	7,5	11,9	9,7	6,5-8,5
ХПК	мгО ₂ /дм ³			1638		до 1000
Жиры	мг/дм ³			49		до 50
Сухой остаток	мг/дм ³	1666	999	3428	999	до 1000
Хлориды	мг/дм ³		99			до 300
Сульфаты	мг/дм ³		66			до 100
Фосфаты	мг/дм ³	11,5	6,1	47,2	8,9	до 4,5
Азот аммонийный	мг N/дм ³		4,7			до 35
СПАВ (анион.)	мг/дм ³		0,7			до 2
Железо	мг/дм ³		2,3			до 3
Нефтепродукты	мг/дм ³		1,0			до 1,0

По данным таблицы 1, необходимо осуществить очистку производственных сточных вод для последующего сброса в городскую канализационную сеть до действующих в настоящее время в г. Пинске нормативных показателей [23].

В случае пересмотра действующих в настоящее время в г. Пинске ПДК, требования к очистке сточных вод на выпуске в городскую хозяйственно-бытовую канализацию могут быть изменены. Наименование участков и объёмы сбросов сточных вод основного производства приведены на рисунке 2.

В результате проведенных исследований сформировано техническое задание к плану мероприятий по очистке производственных сточных вод филиала ОАО «Савушкин продукт» в г. Пинске:

1. Для принятия экологически безопасных и технико-экономических обоснованных решений по совершенствованию системы водоотведения и очистки производственных сточных вод филиала ОАО «Савушкин продукт» необходимо руководствоваться действующими нормативными документами, установленными конкретно для г. Пинска.

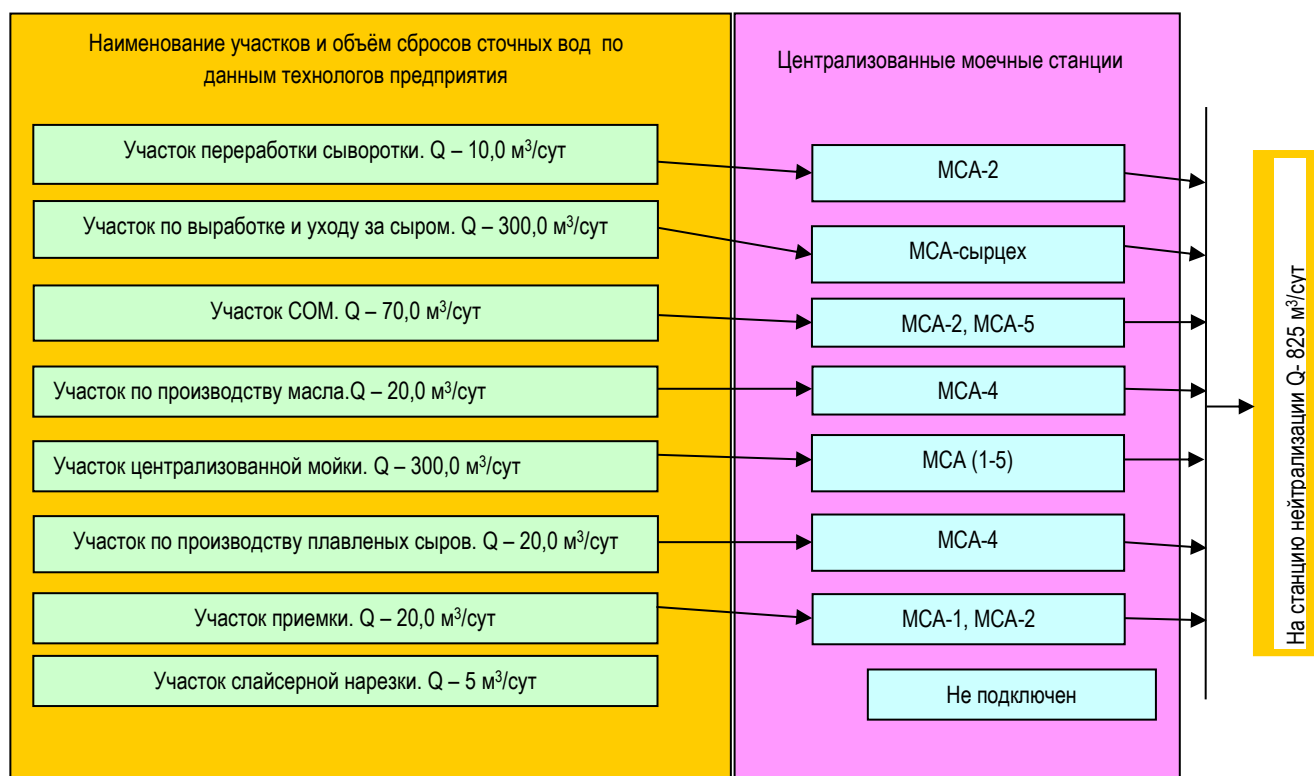


Рисунок 2 – Наименование участков и объёмы сбросов сточных вод основного производства

2. Годовое количество производственных сточных вод, формирующихся на предприятии и сбрасываемых в городскую канализацию, по данным энергетической и экологической служб определено равным:

- суммарному расходу производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод: 267840 м³/год; при этом в месяц максимальный расход составляет 26207 м³/мес и-минимальный – 21421 м³/мес;
- в т. ч. расходу производственных сточных вод основного производства, подлежащих очистке на локальных очистных сооружениях, по данным технологов – $Q_{\text{сут}} = 825 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Работа основного производства осуществляется в три смены. Средний расход воды в одну смену $Q_{\text{смену}} = 275 \text{ м}^3/\text{сут}$;

- сточные воды хозяйственно-бытовые и вспомогательного производства – 72082 м³/год.

3. В качестве расчетной для определения производительности локальных очистных сооружений должна быть принята величина расхода, отвечающая максимальному часовому притоку производственных сточных вод с коэффициентом неравномерности в соответствии с требованиями [22].

4. Для уточнения технологических параметров очистных сооружений в процессе рабочего проектирования на предприятии необходима организация постоянного учета объёмов водопотребления, объёмов сброса сточных вод и их состава. По основным показателям качества сбрасываемых сточных вод необходим периодический отбор проб для накопления статистических данных.

5. Эффективность локальных очистных сооружений необходимо принять с учетом допустимых концентраций, в соответствии с условиями приёма производственных сточных вод в городскую хозяйственно-бытовую канализацию г. Пинска.

6. Проектом необходимо предусмотреть автоматизацию работы очистных сооружений, необходимую для стабильного поддержания на определенном уровне основных технологических параметров, величины pH, дозы реагентов и расходов сточных вод.

Необходимо предусмотреть возможность местного (ручного) и дистанционного управления насосными агрегатами, их автоматическое включение или отключение при достижении соответствующего уровня воды в месте забора, автоматическое включение резервного агрегата при аварийном отключении основного.

Компания HYDROMATIC GmbH может предложить предприятию проверенное и успешно функционирующее во многих странах мира сочетание способов физико-химической и биологической очистки производственных сточных вод, в котором используется современное высокоэффективное технологическое оборудование, материалы, а также передовые технологии в области физико-химической очистки, биологической очистки, доочистки сточных вод и системы автоматического контроля, позволяющие не только получать качество очищенной воды на уровне ПДК, но и добиваться этих результатов с минимальными эксплуатационными затратами [12, 17].

Совместно со специалистами фирмы HYDROMATIC GmbH было подготовлено технико-коммерческое предложение на выполнение проектных, строительно-монтажных, пусконаладочных работ, а также обучение обслуживающего и ремонтного персонала очистных сооружений производственных сточных вод.

Проектируемые очистные сооружения, как показала практика успешного внедрения подобных технических решений фирмы HYDROMATIC GmbH в ближнем и дальнем зарубежье, должны обеспечить гарантированную очистку сточных вод по всем показателям, при этом обеспечивая высокую стабильность их концентрации в очищенной воде, независимо от возмущающих негативных факторов.

В соответствии с заданием, на проектируемые очистные сооружения поступают производственные сточные воды и кислая сыровотка. Общая производительность очистных сооружений составляет 1350 м³/сут.

К очистным сооружениям, с точки зрения инженерного подхода, предъявляются высокие требования, а также и к применяемым материалам технологического оборудования. Технологическое емкостное оборудование изготавливается из стали, марки не ниже AISI 304 (стандарт Германии). Технологические трубопроводы из стали этой же марки, либо высокомолекулярного полиэтилена.

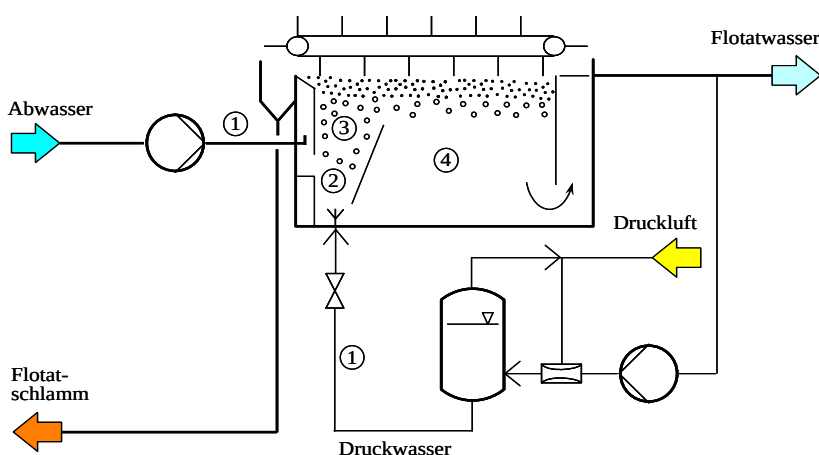
Механическая очистка

Сточные воды от производственных цехов и административно-бытового корпуса поступают на существующую КНС, откуда насосами подаются на барабанную решетку Rotomat (рисунок 3). Барабанное сито Rotomat с прозорами 1,0 мм предназначено для задержания твердых отходов, взвешенных веществ размерами более 1,0 мм.

Механически очищенные сточные воды поступают в резервуар – усреднитель. В резервуаре-усреднителе сточные воды усредняются по расходу и концентрации. Усредненные сточные воды равномерно подаются погружными насосами на физико-химическую очистку.



Рисунок 3 – Барабанная решётка механической очистки с интегрированным прессом марки Rotomat



Abwasser – сточная вода; Flotwasser – вода после флотации; Flotat-schlamm – флотационный шлам; Druckluft – сжатый воздух; Druckwasser – вода, насыщенная воздухом; 1 – насос; 2 – смесь сжатого воздуха и сточной жидкости; 3 – флотационная камера, 4 – слой очищенной воды

Рисунок 4 – Схема напорной флотации с насыщением оборотной воды воздухом

Сточные воды, очищенные на флотаторе, химический состав которых близок к хозяйственно-бытовым сточным водам [1, 2], направляются на ступень биологической очистки.

Биологическая очистка

Блок биологической очистки представлен следующими сооружениями: денитрификатор, аэротенк-нитрификатор двухступенчатый, вторичный отстойник.

В денитрификаторе происходит удаление нитратов, так же сюда вводится коагулянт (сернистый алюминий) для реагентного удаления фосфора до норм ПДК. Узел приготовления и дозирования раствора реагентов представляет собой растворный бак, оборудованный пропеллерной мешалкой, насосом-дозатором и системой автоматики. Узел компактно располагается рядом с денитрификатором.

Кроме того, в основе биологической очистки сточных вод лежит SB-технология [13], которая позволяет получить ряд преимуществ перед «классической» технологией очистки активным илом:

- очистка сточных вод без использования активного ила;

Физико-химическая очистка

Физико-химическая очистка сточных вод включает в себя специализированное технологическое оборудование и оборудование по приготовлению, дозированию реагентов (флокулянт, коагулянт, известковое молоко) с целью повышения эффективности очистки сточных вод. В задачи реагентного хозяйства входит корректирование pH, приготовление рабочих растворов вводимых реагентов, подача реагента в очищаемые сточные воды [19, 20].

В флотационной установке, показанной на рисунке 4, осуществляется:

- глубокое насыщение чистой или сточной воды воздухом;
- формирование оптимального спектра воздушных пузырьков;
- отложение газовых пузырьков на твердых частицах.

Форму и размеры флотатора принимают с учетом необходимости удаления из воды гидрофобных загрязнений: масел, нефтепродуктов, некоторых эмульгированных жидкостей, полимеров.

Кроме этого, флотатор и флотацию в целом предлагается применить для удаления взвешенных веществ, в том числе в тонкодисперсном состоянии ПАВ, и ряда других загрязнений. Образующаяся пена механически удаляется в шламособорник и откуда насосом перекачивается в шламонакопитель. В обобщенной форме достоинства предлагаемого высокоэффективного способа очистки сводятся к следующему:

- низкие инвестиционные и эксплуатационные затраты;
- малая потребная производственная площадь;
- отсутствие проблем с плавающим шламом;
- активное отделение шлама в условиях переменной производственной ситуации;
- высокая концентрация шлама;
- отсутствие потребности в дополнительном загущении шлама.



- стабильная очистка при пониженных температурах сточных вод (до +4 °C);
- стабильная окислительная мощность по нагрузке;
- сохранение окислительной способности при отсутствии электропитания в течение 24 часов;
- идеальный вариант для объектов с межсезонными перерывами в работе.

Суть SB-технологии заключается в уникальном по своим свойствам SB-бионositeле. При относительно малых размерах отдельно взятого SB-бионositeля он имеет значительно развитую поверхность. Так, удельная поверхность 1 м³ SB-бионositeля составляет от 700 до 800 м², на поверхности которого расселяются микроорганизмы. SB-бионositeль свободно плавает в объеме аэротенка, создавая единый взвешенно-вихревой объем. Плотность его равна плотности воды, поэтому он не оседает на дно аэротенка при отключении подачи воздуха. Эта особенность позволяет существенно расширить рамки технологических режимов очистки сточных вод.

Одним из существенных преимуществ SB-бионосителя является постоянная толщина биопленки, образующейся на его поверхности, при этом созданы условия крайне низкого образования избыточной (отработанной) биопленки – до 4 грамм по сухому веществу на 1 м³ очищенной воды.

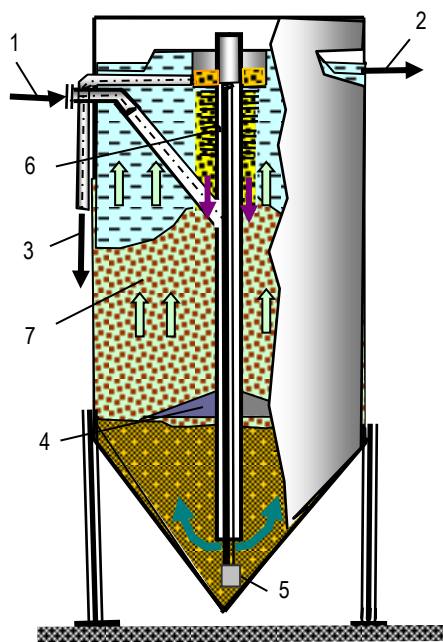
Количество SB-бионосителя рассчитывается исходя из максимальной концентрации загрязнений поступающих сточных вод. Процесс очистки контролируется системой автоматики посредством измерения основных химических показателей на входе и выходе очистных сооружений. Тем самым обеспечивается стабильная очистка сточной воды при изменении концентраций загрязнений или расхода сточных вод.

SB-бионоситель постоянно находится в каждой отдельной технологической емкости: денитрификаторе, азротенке-нитрификаторе первой и второй ступени. При этом исключена возможность его перемещения вместе с потоком сточных вод благодаря специальным устройствам – сеткам. Согласно утверждению специалистов фирмы HYDROMATIC GmbH, в результате этого можно добиться высокой качественной характеристики биопленки, характерной для каждой ступени очистки в каждой технологической емкости.

Дифференцирование видового состава микроорганизмов биопленки позволяет достигать максимально высокого качества очистки сточных вод при минимальных затратах сохранения концентраций микроорганизмов, характерных для каждой ступени биологической очистки. Отработанная биопленка оседает во вторичном отстойнике, откуда насосом перекачивается в шламонакопитель. Биологически очищенная сточная вода самотеком поступает на песчаный самопромывающийся фильтр.

Доочистка сточных вод

Биологически очищенная сточная вода проходит доочистку на самопромывающемся фильтре песчаном динамическом ДСТ, который показан на рисунке 5.



1 – подвод воды на фильтрацию; 2 – отвод отфильтрованной воды; 3 – отвод промывной воды; 4 – распределитель; 5 – основание насоса-эрлифта; 6 – промыватель песка; 7 – фильтрующий слой

Рисунок 5 – Фильтр песчаный динамический марки ДСТ

Динамический песчаный фильтр представляет собой емкость цилиндрической формы с коническим основанием. В центре фильтра располагается осевой трубопровод подачи воды на фильтрацию, внутри которого установлен эрлифт с пескопромывателем. Эрлифт соединен с трубопроводом отвода промывной воды. В качестве фильтрующей загрузки используется песок.

Биологически очищенная вода поступает сверху по подводящему трубопроводу и направляется вниз по осевому трубопроводу на кольцевой конический распределитель и далее под псевдо-сжиженный слой песчаной загрузки. Фильтрация воды осуществляется снизу вверх и далее отфильтрованная вода через перелив по отводящему трубопроводу поступает на блок обеззараживания.

Одновременно с фильтрацией воды из конической части фильтра эрлифтом грязный песок откачивается на промыватель песка, где происходит очищение песка от загрязнений. От промывателя песок отводится обратно в фильтр, а промывная вода направляется в шламонакопитель. Объем промывной воды не превышает 8 % от производительности фильтра.

Песчаный фильтр имеет очень низкое гидравлическое сопротивление (достаточно величины избыточного напора перед ним – 1 м), что является существенным показателем его экономичности.

Фильтр работает в автоматическом режиме, не требуя постоянного вмешательства обслуживающего персонала. Замену внутренних конструктивных частей фильтра (эрлифта) вследствие естественного износа требуется производить один раз в течение 8–10 лет. Отключение и вывод из работы фильтра при выполнении операции по замене эрлифта не требуется.

Обеззараживание

Обеззараживание является последней ступенью очистки сточных вод. Обеззараживание очищенной воды осуществляется на бактерицидной установке с ультрафиолетовым излучением. Ультрафиолетовое облучение, в отличие от окислительных технологий, не изменяет химического состава воды, не влияет на вкус и запах воды, а действует только на бактериальную флору и бактериальные споры. Бактерицидное облучение действует почти мгновенно и, следовательно, вода, прошедшая через установку, может сразу же поступать непосредственно в систему оборотного водоснабжения или в водоем. Эффект обеззараживания основан на воздействии ультрафиолетовых лучей с длиной волны от 200 до 300 нм на белковые коллоиды и ферменты протоплазмы белковых клеток.

УФ-установки обеспечивают 100 % обеззараживание сточных вод. Предусматриваются два рабочих, одна резервная УФ-установки. Вода поступает на УФ-установки под остаточным давлением после динамического песчаного фильтра. Установки оборудованы системой автоматики, позволяющей контролировать следующие параметры: интенсивность излучения, контроль работы каждой УФ-лампы, защиту от «сухой» работы и от перегрева.

Обработка осадка

Образующийся в результате очистки сточных вод осадок, отработанная пена от флотатора, а также стабилизированный осадок от биогазовой установки подаются в шламонакопитель, откуда уплотненный шлам подвергается обезвоживанию в камерном фильтр-прессе типа KF.

Шламонакопитель оборудован мешалкой, насосами и датчиком уровня. В шламонакопителе происходит предварительное уплотнение биопленки за счёт ее осаждения при неработающем смесителе. Отстоявшаяся осветленная вода периодически отводится из верхней зоны резервуара в голову ЛОС, а загущенный шлам накапливается в его нижней части. Резервный объем шламонакопителя рассчитывают с учетом того, чтобы накапливающийся за одну неделю объем шлама обезвоживался фильтр-прессом примерно в течение от 6 до 8 часов, т. е. за одну рабочую смену. Перед откачиванием шлама он подвергается интенсивному перемешиванию пропеллерным смесителем.

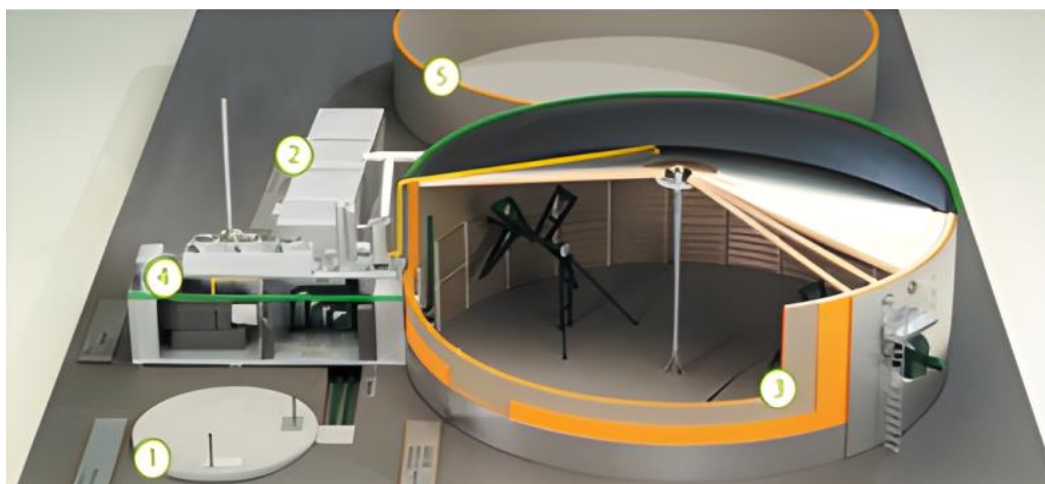
Откачивание загущенного шлама в пресс из шламонакопителя осуществляется мембранным насосом (Тарflo). Во всасывающем трубопроводе насоса установлен расходомер (GEMU) и статический смеситель для подмешивания флокулянта в поток шлама. Подготовка коагулирующего раствора происходит в полимерной станции. Дозирование подготовленного в полимерной станции раствора обеспечивает насос-дозатор.

Концепция построения биогазовой установки предусматривает замкнутый безотходный производственный цикл. В её состав входит биореактор (ферментер), газонакопитель, усреднитель, газгольдер

и факел для сжигания избыточного биогаза [13]. Усреднитель имеет насос для перекачки жидких органических отходов в биореактор станции, мешалку для гомогенизации отходов. Установки оборудования комплектуются биогазовым турбинным генератором. Мини ТЭЦ состоит из двух газопоршневых установок, работающих параллельно. Во время проведения профилактических работ второй двигатель обеспечивает необходимую мощность для производства достаточного количества тепла и электроэнергии. Это повышает надёжность и независимость работы системы.

Биогазовая установка, показанная на рисунке 6, состоит из накопителя-усреднителя, блока гидролиза, реактора производства биогаза, электрогазового генератора с автоматикой, установленного в контейнере, накопителя переработанного шлама, факела для сжигания избыточного биогаза, газгольдера.

Дополнительная обработка биомассы не предусмотрена. Вопрос о переработке дополнительной биомассы технически может быть решен в ходе выполнения проектных работ. Это связано с тем, что необходима дополнительная информация о применяемой биомассе.



1 – накопитель-усреднитель, 2 – блок гидролиза, 3 – реактор производства биогаза, 4 – электрогазовый генератор, 5 – накопитель шлама
Рисунок 6 – Биогазовая установка

Камерный фильтр-пресс со станцией приготовления полимера (рисунок 7) предназначены для обезвоживания осадка с образованием кека. Камерный фильтр-пресс имеет большую фильтрующую поверхность, которая позволяет быстро и эффективно разделять фильтрат и кек, обеспечивая обезвоживание кека на 65–70 % [1, 2, 13].



Рисунок 7 – Камерный фильтр-пресс со станцией приготовления полимера

Автоматизация, управление и технологический контроль процесса очистки выполняются приборами, установленными в шкафу управления технологическим оборудованием фирмы «Siemens – Hydromatic». Управление осуществляется по средствам системы SPS и системы визуализации через персональный компьютер [21].

Заключение

1. Проведенные детальные исследования состава сточных вод производств молочной продукции позволят усовершенствовать стокообразующее производство предприятия в направлении уменьшения потребления питьевой воды на технологические нужды и выноса токсичных ингредиентов со сточными водами.

2. На основании этих исследований и обследования образующих сточные воды производств подготовлено авторами статьи совместно с фирмой HYDROMATIC GmbH техническое задание для проектирования эффективных современных очистных сооружений обработки сточных вод молочного производства.

Список цитированных источников

1. Degremont. Технический справочник по обработке воды : в 2 т. : пер. с фр. / Л. Андриамирадо [и др.] ; редкол.: М. И. Алексеев [и др.]. – 2-е изд. – СПб. : Новый журнал, 2007. – Т. 2. – 1696 с.
2. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы : пер. с англ. / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван. – М. : Мир, 2004. – 480 с.
3. Дятлова, Т. В. Очистка сточных вод молокозаводов / Т. В. Дятлова, С. Г. Певнев, Т. Г. Федоровская. – СПб. : Водоснабжение и санитарная техника, 2008. – 201 с.
4. Сухарев, Ю. И. Очистка сточных вод предприятий молочной промышленности: обзорная информации / Ю. И. Сухарев. – Челябинск : Южно-Урал. гос. ун-т, 1998. – 44 с.
5. Мачигин, В. С. Очистка сточных вод предприятий масло-жировой промышленности / В. С. Мачигин, Л. П. Щербаков // Масло-жировая промышленность. – 1992. – № 1. – С. 30.
6. Литманова, Н. Л. Совершенствование технологии локальной очистки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.04 / Литманова Наталья Леонидовна. – Санкт-Петербург, 2007. – 17 с.
7. Надысев, В. С. Очистка сточных вод масло-жировой промышленности / В. С. Надысев. – М. : Пищевая промышленность, 1976. – 183 с.
8. Биологическая очистка сточных вод предприятий молочной промышленности в мембранном биореакторе (часть 1) / С. В. Степанов, О. С. Солкина, К. М. Морозова [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – № 12. – С. 28–34.
9. Исследование биологической очистки сточных вод молокозаводов на модельном стоке / С. В. Степанов, О. С. Солкина, К. М. Морозова [и др.] // Технологии очистки воды "Техновод-2016": материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. – 2016. – С. 210–215.

10. Новый справочник химика и технолога : Процессы и аппараты химических технологий / Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Барабаш [и др.] ; под общ. ред. Р. Ш. Абиева. – СПб. : НПО Профессионал, 2004. – 837 с.
11. Лурье, Ю. Ю. Справочник по аналитической химии / Ю. Ю. Лурье. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1989. – 448 с.
12. 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.
13. Голубева, Л. В. Проектирование предприятий молочной отрасли с основами промышленного строительства: учеб. пособие / Л. В. Голубева. – СПб. : ГИОРД, 2010. – 288 с.
14. Очистка сточных вод предприятий мясной и молочной промышленности / С. М. Шифрин, Г. В. Иванов, Б. Г. Мишук, Ю. А. Фефанов. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 272 с.
15. Каца, В. М. Вода и сточные воды в пищевой промышленности / В. М. Каца. – М. : Издательство «Пищевая промышленность», 1992. – 384 с.
16. Сточные воды предприятий мясной и молочной промышленности / Н. М. Марлевич [и др.]. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 2003. – 272 с.
17. Comprehensive Review of Water Management and Wastewater Treatment in Food Processing Industries in the Framework of Water-Food-Environment Nexus / H. Asgharnejad, E. Khorshidi Nazloo, M. Madani Larijani [et al.] // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2021. – Vol. 20. – P. 4779–4815. – DOI: 10.1111/1541-4337.12782.
18. Горбатова, К. К. Биохимия молока и молочных продуктов: учеб. / К. К. Горбатова, П. И. Гунькова ; под общ. ред. К. К. Горбатовой. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб. : ГИОРД, 2010. – 336 с.
19. Данилович, Д. А. Современные решения по очистке сточных вод / Д. А. Данилович, А. А. Максимова // Молочная промышленность. – 2011. – № 8. – С. 73–77.
20. Емельянов, В. В. Биохимия: учеб. пособие / В. В. Емельянов, Н. Е. Максимова, Н. Н. Мочульская. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 132 с.
21. Космин, А. С. Автоматизация водоочистных сооружений / А. С. Космин // Молочная промышленность. – 2014. – № 2. – С. 54–55.
22. Канализация. Наружные сети и сооружения : Строительные нормы 4.01.02-2019 : постановление Министерства архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 31 окт. 2019 г. № 59 : с изм. и доп. от 27 марта 2024 г. № 20 // Бизнес-Инфо / ООО «Профессиональные правовые системы». – Минск, 2024.
23. Правила пользования централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации) в населенных пунктах : утверждено постановлением Совета Министров Республики Беларусь 30.09.2016 № 788. – Минск : Экономэнерго, 2016. – 27 с.
6. Litmanova, N. L. Sovershenstvovanie tekhnologii lokal'noj ochistki stochnyh vod molokopererabatyvayushchih predpriyatij: avtoref. diss. kand. tekhn. nauk: 05.23.04 / Litmanova Nataliya Leonidovna. – Sankt-Peterburg, 2007. – 17 s.
7. Nadysev, V. S. Ochistka stochnyh vod maslo-zhirovoy promyshlennosti / V. S. Nadysev. – M. : Pishchevaya promyshlennost', 1976. – 183 s.
8. Biologicheskaya ochistka stochnyh vod predpriyatij molochnoj promyshlennosti v membrannom bioreaktore (chast' 1) / S. V. Stepanov, O. S. Solkina, K. M. Morozova [i dr.] // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – 2016. – № 12. – S. 28–34.
9. Issledovanie biologicheskoy ochistki stochnyh vod molokozavodov na model'nom stoke / S. V. Stepanov, O. S. Solkina, K. M. Morozova [i dr.] // Tekhnologii ochistki vody "Tekhnovod-2016": materialy IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – 2016. – S. 210–215.
10. Novyj spravochnik himika i tekhnologa : Processy i apparaty himicheskikh tekhnologij / G. M. Ostrovskij, R. SH. Abiev, V. M. Barabash [i dr.] ; pod obshch. red. R. SH. Abieva. – SPb. : NPO Professional, 2004. – 837 s.
11. Lu'e, YU. YU. Spravochnik po analiticheskoy himii / YU. YU. Lu'e. – 6-e izd., pererab. i dop. – M. : Himiya, 1989. – 448 s.
12. 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.
13. Golubeva, L. V. Proektirovanie predpriyatij molochnoj otrasli s osnovami promstroitel'stva: ucheb. posobie / L. V. Golubeva. – SPb. : GIORД, 2010. – 288 s.
14. Ochistka stochnyh vod predpriyatij myasnoj i molochnoj promyshlennosti / S. M. SHifrin, G. V. Ivanov, B. G. Mishukov, YU. A. Feofanov. – M. : Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1981. – 272 s.
15. Kaca, V. M. Voda i stochnye vody v pishchevoj promyshlennosti / V. M. Kaca. – M. : Izdatel'stvo «Pishchevaya promyshlennost'», 1992. – 384 s.
16. Stochnye vody predpriyatij myasnoj i molochnoj pro-myshlennosti / N. M. Marlevich [i dr.]. – M. : Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 2003. – 272 s.
17. Comprehensive Review of Water Management and Wastewater Treatment in Food Processing Industries in the Framework of Water-Food-Environment Nexus / H. Asgharnejad, E. Khorshidi Nazloo, M. Madani Larijani [et al.] // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2021. – Vol. 20. – P. 4779–4815. – DOI: 10.1111/1541-4337.12782.
18. Gorbatova, K. K. Biohimiya moloka i molochnyh produktov: ucheb. / K. K. Gorbatova, P. I. Gun'kova ; pod obshch. red. K. K. Gorbatovoj. – 4-e izd., pererab. i dop. – SPb. : GIORД, 2010. – 336 s.
19. Danilovich, D. A. Sovremennye resheniya po ochistke stochnyh vod / D. A. Danilovich, A. A. Maksimova // Molochnaya promyshlennost'. – 2011. – № 8. – S. 73–77.
20. Emel'yanov, V. V. Biohimiya: ucheb. posobie / V. V. Emel'yanov, N. E. Maksimova, N. N. Mochul'skaya. – Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2016. – 132 s.
21. Kosmin, A. S. Avtomatizaciya vodoochistnyh sooruzhenij / A. S. Kosmin // Molochnaya promyshlennost'. – 2014. – № 2. – S. 54–55.
22. Kanalizaciya. Naruzhnye seti i sooruzheniya : Stroitel'nye normy 4.01.02-2019 : postanovlenie Ministerstva arhitektury i stroitel'stva Resp. Belarus', 31 okt. 2019 g. № 59 : s izm. i dop. ot 27 marta 2024 g. № 20 // Biznes-Info / ООО «Professional'nye pravovye sistemy». – Minsk, 2024.
23. Pravila pol'zovaniya centralizovannymi sistemami vodosnabzheniya, vodootvedeniya (kanalizacii) v naselennyh punktah : utverzhdeno postanovleniem Soveta Ministrov Res-publiki Belarus' 30.09.2016 № 788. – Minsk : Ekonomenergo, 2016. – 27 s.

References

1. Degremont. Tekhnicheskij spravochnik po obrabotke vody : v 2 t. : per. s fr. / L. Andriamirado [i dr.] ; redkol.: M. I. Alekseev [i dr.]. – 2-e izd. – SPb. : Novyj zhurnal, 2007. – T. 2. – 1696 s.
2. Ochistka stochnyh vod. Biologicheskie i himicheskije pro-cessy : per. s angl. / M. Hence, P. Armoes, J. Lya-Kur-YAnsen, E. Arvan. – M. : Mir, 2004. – 480 s.
3. Dyatlova, T. V. Ochistka stochnyh vod molokozavodov / T. V. Dyatlova, S. G. Pevnev, T. G. Fedorovskaya. – SPb. : Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika, 2008. – 201 s.
4. Suharev, YU. I. Ochistka stochnyh vod predpriyatij molochnoj promyshlennosti: obzornaya informacii / YU. I. Suharev. – Chelyabinsk : YUzhno-Ural. gos. un-t, 1998. – 44 s.
5. Machigin, V. S. Ochistka stochnyh vod predpriyatij maslo-zhirovoy promyshlennosti / V. S. Machigin, L. P. SHCHerbakov // Maslo-zhirovaya promyshlennost'. – 1992. – № 1. – S. 30.

Материал поступил 18.05.2025, одобрен 09.07.2025, принят к публикации 10.07.2025

УДК 711.14+332.142.6

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЙМЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В АПК

А. Г. Чепик¹, Ю. А. Мажайский², Ю. В. Доронкин³

¹ Д. э. н., профессор кафедры экономики и финансов, Московский университет имени С. Ю. Витте, Рязанский филиал, Рязань, Россия, e-mail: a-chepik@mail.ru

² Д. с-х. н., профессор кафедры бухгалтерского учета, анализа и экономики ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева», Рязань, Россия, e-mail: director@mntc.pro

³ К. с-х. н., доцент кафедры общественного питания и технологии переработки с/х продукции, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева», Рязань, Россия, e-mail: yury.doronkin@yandex.ru

Реферат

В статье рассматриваются современное экологическое состояние и характер использования пойменных земель в центре России, а также в Рязанской Мещере и на Белорусском Полесье. Изложено научное видение более целесообразного территориального использования заливных лугов в растениеводстве, кормопроизводстве, животноводстве, птицеводстве (разведение водоплавающей птицы), в охотничьем, заповедном, рыбном хозяйстве, в пчеловодстве, в заготовках дикоросов, в экологическом туризме и дизайне, в создании эталонных экологических участков и т. д. Мониторинг состояния элементов экологических систем и пути приведения их в соответствие с научно-обоснованными нормами и нормативами по предельным дозам концентрации (ПДК) загрязняющих окружающую среду веществ. Применительно к луговодству рассмотрена возможность производства сена на естественных и улучшенных пойменных сенокосах с использованием современных технологий. Их спецификой является сохранение и воспроизводство сложившихся экологически устойчивых травостоев. Приведена методика расчета сравнительной эколого-экономической эффективности производства сена. Изложены перспективы использования пойменных территорий в различных сферах деятельности с соблюдений требований и норм экологической безопасности. Расчеты произведены с возможностью использования данных технологий в сельскохозяйственных предприятиях различных по размерам и организационно-правовым формам хозяйствования. Источниками финансирования предлагаемых мероприятий по усовершенствованию пойменного луговодства могут быть собственные средства предприятия, меры государственной поддержки, а также государственно-частное партнерство. Проведенное исследование показало, что наиболее рациональным способом использования пойменных земель в современных условиях является лугопастбищное хозяйство, которое максимально соответствует природным особенностям данных территорий. Более того, соблюдаются экономические интересы не только сельскохозяйственных производителей, но и многих смежных отраслей хозяйствования.

Ключевые слова: пойменные земли, экологическая система, природные и улучшенные сенокосы, эффективность хозяйствования, технология производства сена, сравнительная экономическая оценка.

ECOLOGICAL STATUS OF FLOODPLAIN LANDS AND THEIR USE IN AGRICULTURE

A. G. Chepik, Y. A. Mazhayskij, Y. V. Doronkin

Abstract

The article examines the current ecological state and nature of the use of floodplain lands in the Center of Russia, as well as in the Ryazan Meshchera and the Belarusian Polesie. The scientific vision of a more appropriate territorial use of flood meadows in crop production, forage production, animal husbandry, poultry farming (breeding of waterfowl), hunting, conservation, fisheries, beekeeping, harvesting of wild plants, ecological tourism and design, creation of reference ecological sites, etc. is outlined. Monitoring of the state of the elements of ecological systems and ways to bring them in line with scientifically sound norms and regulations for maximum concentration doses (MPC) of environmental pollutants. With regard to meadow farming, the possibility of producing hay on natural and improved floodplain hayfields using modern technologies has been considered. Their specificity is the preservation and reproduction of established ecologically sustainable herb stands. A method for calculating the comparative ecological and economic efficiency of hay production is presented. The prospects for the use of floodplain territories in various fields of activity are outlined, taking into account the requirements and norms of environmental safety. The calculations were made with the calculation of the possibility of using these technologies in agricultural enterprises of various sizes and organizational and legal forms of management. The sources of financing for the proposed measures to improve floodplain meadow farming can be the company's own funds, government support measures, as well as public-private partnerships. The conducted research has shown that the most rational way to use floodplain lands in modern conditions is grassland farming, which maximally corresponds to the natural features of these territories. Moreover, the economic interests of not only agricultural producers, but also many related economic sectors are respected.

Keywords: floodplain lands, ecological system, natural and improved hayfields, management efficiency, hay production technology, comparative economic assessment.

Основные положения

Изучается состояние и использование пойменных земель на различных территориях России и Беларуси, рассмотрена нормативно-правовая база для регулирования окружающей среды, на примере пойменных территорий Рязанской области исследуется целесообразность проведения экологического мониторинга и на его основе рассматриваются возможности сохранения, воспроизводства и улучшения заливных лугов, в частности для производства сена по современным технологиям, изложены особенности производства сена полевой сушки методом прессования в валки и тюки. Проведена сравнительная оценка производства, даны научные рекомендации по использованию пойменных земель на перспективу.

Введение

Понижения суши, непосредственно примыкающие к руслам рек, получили названия пойменных земель, а та часть территории, которая регулярно заливалась водой, – заливными лугами. Из-за того, что внешние воды имеют в половодье достаточно сильное течение, произрастание древесной растительности здесь ограничено. Однако на возвышенных участках встречаются дубовые рощи, ольховые и ивовые леса. Весной потоки паводковых вод насыщены аллювиальными частицами, семенами растений, различными видами химических веществ общей массой 600–1000 тонн на один гектар. Поэтому в разные годы размер аллювиальных отложений составляет от нескольких сантиметров до полуметра и более.

По своему плодородию пойменные земли вполне сопоставимы с черноземами, но в силу существенных различий в их рельефе и в принадлежности расположения в прирусловой, притеррасной и приматериковой части, они значительно отличаются своими физическими свойствами [2, с. 55].

Долины рек со своим более мягким и более влажным климатом стали самыми престижными местами для размещения человеческих агломераций. Пойменные земли имеют огромное значение не только в хозяйственной деятельности человека, но и в регулировании климата, воздушных, водных, почвенных условий существования экологических систем. Известно, что природопользование как общая система взаимоотношений человека с природой связано с особенностями процесса его трудовой деятельности и складывается в соответствии с характером географических, исторических и социальных условий [3, с. 18]. Мировые площади пойменных земель за последние двести лет сократились вдвое, а это в свою очередь привело к радикальному изменению характера их глобального использования.

Методы исследования: диалектический, историко-логический, монографический, экономико-статистические, сравнения, анализа и синтеза.

Результаты и обсуждение

1. Пойменные земли в системе хозяйственных отношений.

В аграрно-промышленной сфере... « попытка увеличить производство сельскохозяйственной продукции путем интенсификации не привела к желаемым результатам, так как прирост единицы продукции сопровождался значительными затратами и даже потерями ресурсов. К примеру, за всю историю «покорения» природы выведено из строя 1,3–1,5 млрд га пашни, то есть почти столько, сколько ее используется в настоящее время» [4, с. 5]. По мнению многих видных ученых, интенсификация ограничено применима на пойменных землях ввиду их высокой экологической значимости для воспроизводства территориальных экологических систем.

Россия обладает наибольшими в мире площадями пойменных земель. Главным образом это заливные луга, которые являются лучшими сенокосами и пастбищами. «В России, примерно до 1861 года, почти единственным источником кормодобывания являлись природные угодья» [7, с. 8]. Русские ученые П. С. Паллас, И. И. Лепахин (1767–1773 гг.), И. И. Комов, А. Г. Болотов, В. А. Левшин (1796), Д. М. Полторацкий, И. И. Самарин, Г. И. Энгельман, А. В. Советов (1819–1821), позднее П. А. Костычев, И. А. Стебут, В. Р. Вильямс, А. М. Дмитриев, В. Н. Сукачев, И. В. Ларин (1931), Н. Г. Андреев и другие видные ученые изучали проблемы луговодства.

По инвентаризации 1932–1933 гг. «... в СССР было 36 млн га пойменных лугов, в том числе под сенокосами – 19,8 млн га и пастбищами – 16,2 млн га. По данным Всесоюзного НИИ кормов, сейчас пойменных лугов около 30 млн га. Преимущественно они сосредоточены в РСФСР» (1975 г.) [7, с. 334]. В годы социалистического строительства (период с 1960 по 1990 гг.) ежегодное сокращение пойменных лугов составляло 2,0 %. Аналогичная тенденция имела место быть в трансформации всех пойменных земель под гидроэлектростанции (ГЭС), объекты жилищного строительства, дороги, средства коммуникации и инфраструктуры. Особенно существенные изменения в пойменном землеустройстве были связаны с проведением массовой мелиорации. Осушение привело к обмелению и изменению русел рек, к заметному вырождению пойменной флоры и фауны. В настоящее время эти процессы приняли новые, не менее опасные формы. В результате проводимой в России аграрной реформ (1991–2015 гг.) пойменные территории на значительных площадях оказались в заброшенном состоянии и с переходом к капиталистической системе хозяйствования были приватизированы и перешли в частные руки в особо привлекательных ареалах. Их выбытие и трансформация местами ускорились до уровня приблизительно 3,0 % ежегодно. Существенно изменился водный режим равнинных рек. Весенние паводки стали менее продолжительны, менее полноводны с существенными отклонениями от обычных климатических показателей. Последствий проведения современной аграрной реформы свидетельствуют, что из общего количества сельскохозяйственных земель России (222,0 млн га) выбыло из оборота или заросло лесом 80,0 млн га [8, с. 10]. Экологическая оценка последствий

хозяйственной деятельности показала, что «... примерно на 15,0 % российской территории, где проживает 60,0 % населения, качество окружающей среды неудовлетворительное», а «... главные реки России – Волга, Дон, Кубань, Северная Двина, Печора, Урал, Обь, Енисей и Амур считаются загрязненными, причем некоторые из их притоков – Ока, Кама, Северный Донец, Томь, Иртыш, Тобол, Миасс, Исеть и Тура классифицируются как очень грязные, а некоторые их участки отнесены к категории чрезвычайно загрязненных» [9, с. 7–8].

Современная экологическая и агроэкологическая наука, основываясь на действии объективных законов, констатирует необходимость принятия и реализации системы природоохранных мер на пойменных землях как на государственном, так и на межгосударственном уровне. Известно, что проекты, связанные с сохранением и воспроизводством экосистем, нередко воплощаются в жизнь путем совместных усилий заинтересованных государств, их союзов (ЕАЭС, БРИКС, ЕС и т. д.). В сфере международного природопользования сегодня осуществляется переход к экцентрической парадигме хозяйствования с максимальным сохранением существующего мироздания. Это предполагает принятие международных экологических стандартов, норм и нормативов на сравнительно продолжительный период времени (70–150 лет) с тем, чтобы обеспечить экологическую безопасность как минимум для одного-двух будущих поколений людей.

В России совершенствуется экологическая нормативно-правовая база. В ее состав входят федеральные и региональные законы, указы Президента, постановления Правительства Российской Федерации. Наиболее заметными являются следующие: Федеральный Закон от 23.11.1995 № 174 – ФЗ «Об экологической экспертизе», Федеральный Закон от 09.01.1996 № 3 – ФЗ «О радиационной безопасности населения», Федеральный Закон от 24.06.1988 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», Федеральный Закон от 04.05.1999 № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха», Федеральный Закон от 10.01.2002 № 7 – ФЗ «Об охране окружающей среды» и некоторые другие.

В систему органов государственного управления в области охраны окружающей среды входят: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды), Федеральная служба по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор), Федеральное агентство водных ресурсов (Росводресурс), Федеральное агентство лесного хозяйства (Рослесхоз), Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра), Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) и целый ряд других организаций на федеральном и региональном уровне.

2. Структура сельскохозяйственных угодий и их эколого-экономическая оценка. Повышение эффективности использования пойменных земель является одной из основных задач современного хозяйствования и в первую очередь в отраслях АПК. Базовой сферой АПК является сельское хозяйство, в состав которого входит более 60 основных, дополнительных и вспомогательных отраслей. Обеспеченность земельными ресурсами является основополагающим условием для развития сельского хозяйства. Размеры и структура использования пойменных земель в Центральной России и в Беларуси представлены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что более 85,0 % пойменных территорий занято природными кормовыми угодьями. Распашка пойм представляет собой процесс с повышенными рисками в силу того, что имеется угроза смыва верхнего слоя почвы во время весеннего паводка, а также ведет к нарушению естественных процессов воспроизводства пойменных ландшафтов. Вместе с тем пойменное земледелие имеет сравнительно более высокую эффективность в виду естественного плодородия аллювиальных почв и их влагообеспеченности, позволяющей выращивать чувствительные к влаге культуры.

Во многом схожие процессы в использовании пойменных земель характерны для Республики Беларусь. Из общей площади растительного покрова республики 20194,0 тыс. га (97,3 % всей территории) луга составляют 3289,7 тыс. га или 16,3 %, причем около 98,0 % из них приходится на внепойменные территории, что во многом объясняется проведением на площади 1642,0 тыс. га лугов или 16,3 % мелиорации. Вместе с тем, по данным РУП «Институт мелиорации» (А. Мееровского д. с.-х. н.), в Беларуси имеется 200,0 тыс. га пойменных земель, преобладающая часть которых расположена

в Брестской и Гомельской областях. Урожайность сена на этих лугах составляет от 23–25 до 34–36 ц/га и местами выше. В научных работах известного ученого А. Мееровского отмечается, что проведение массовой мелиорации существенно изменило структуру землепользования в некоторых регионах республики [13, 14, 15, 16], при этом

доля пойменных земель уменьшилась, и часть их начала использоваться в интенсивном земледелии. В настоящее время учеными Беларуси рекомендуется больше производить лугового сенокоса и сенажа, что объясняется дождливой погодой во время массового производства сена естественной сушки.

Таблица 1 – Структура сельскохозяйственных угодий в поймах рек (данные Главного управления землепользования и землеустройства МСХ РСФСР на 01.11.1966 г.)

Регион	Общая площадь тыс. га	Сельскохозяйственных угодий тыс. га	В том числе						
			Сенокосы		Пастбища		Пашни		Прочие
			тыс. га	%	тыс. га	%	тыс. га	%	
Центральный район	1287,3	1025,3	709,3	69,2	194,3	18,9	118,9	11,6	2,8
Области Центрального района									
Московская	109,8	72,2	30,3	41,6	11,3	15,6	30,3	42,0	0,3
Рязанская	302,0	240,3	156,7	65,2	64,8	27,0	18,5	7,7	0,3
Владимирская	127,1	93,6	73,8	78,6	13,9	13,8	5,9	6,3	0,1
Тульская	38,4	37,9	21,2	55,9	3,9	10,3	12,7	33,4	0,1
Орловская	65,2	62,8	29,1	46,3	10,5	16,7	22,7	36,1	0,5
В целом по РСФСР	29154,9	12295,2	7448,5	60,6	2753,8	22,4	1951,7	16,0	141,2

Во многом схожие процессы в использовании пойменных земель характерны для Республики Беларусь. Из общей площади растительного покрова республики 20194,0 тыс. га (97,3 % всей территории) луга составляют 3289,7 тыс. га или 16,3 %, причем около 98,0 % из них приходится на внепойменные территории, что во многом объясняется проведением на площади 1642,0 тыс. га лугов или 16,3 % мелиорации. Вместе с тем, по данным РУП «Институт мелиорации» (А. Мееровского д. с.-х. н.), в Беларуси имеется 200,0 тыс. га пойменных земель, преобладающая часть которых расположена в Брестской и Гомельской областях. Урожайность сена на этих лугах составляет от 23–25 до 34–36 ц/га и местами выше. В научных работах известного ученого А. Мееровского отмечается, что проведение массовой мелиорации существенно изменило структуру землепользования в некоторых регионах республики [13, 14, 15, 16], при этом доля пойменных земель уменьшилась и часть их начала использоваться в интенсивном земледелии. В настоящее время учеными Беларуси рекомендуется больше производить лугового сенокоса и сенажа, что объясняется дождливой погодой во время массового производства сена естественной сушки.

Существенное выбытие пойменных территорий было связано со строительством водохранилищ, объектов туризма и экологического дизайна. Вовлечение пойменных земель Беларуси в хозяйственный оборот, по сравнению с Российскими преобразованиями, имеют более упорядоченный характер с большей эффективностью в АПК республики.

Современные представления об эффективности предусматривают рассмотрение ее четырех взаимосвязанных видов: производственно-технологическую эффективность, экономическую, социальную и экологическую эффективность. В рыночных условиях хозяйствования, когда получение максимума прибыли является первостепенной задачей, другие виды эффективности имеют подчиненное значение, что не может соответствовать складывающейся в отрасли экологической обстановке. Укрупнение производства, его интенсификация и концентрация сопровождается созданием более производительных технологий, более дорогостоящих и с большим техногенным воздействием на окружающую среду. Повышение производственно-технологической эффективности все в большей мере зависит от состояния естественных условий хозяйствования.

В условиях рыночных отношений производственно-технологическая эффективность характеризуется соблюдением внутрипроизводственных требований к использованию факторов производства и к достижению конечного результата, обусловленного технологической схемой (картой) производства. Она не включает издержки, связанные с продвижением товара, с выполнением обязательств предприятия перед государством и т. д.

В отличие от производственно-технологической эффективности экономическая эффективность выступает как разность между полу-

ченной предприятием прибылью и совокупными издержками всех видов. Рыночным критерием экономической эффективности является прибыль, ее иногда называют чистой прибылью и т. д.

Социальная эффективность непосредственно зависит от качественного состояния трудовых ресурсов и их расширенного воспроизводства. В настоящее время не только повышение благосостояния работника, его номинальная и реальная заработная плата обеспечивают привлекательность сельского труда. Одним из основных критериев оценки условий труда является его, так называемая, экологичность, под которой подразумевается соответствие условий труда научно-обоснованным требованиям. Это отсутствие опасных для здоровья человека предельных доз концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе, воде, почве и многие другие виды загрязнений (электромагнитное, радиационное, вибрационное, звуковое, световое и т. д.).

Социальная эффективность измеряется благосостоянием работника, его номинальной и реальной заработной платой, снижением уровня заболеваемости работников, уменьшением количества рабочих дней, пропущенных по больничным листам. В критерии социальной эффективности входят не только условия труда работника, но и доступ к инфраструктурным благам (дом культуры, прачечная, сотовая связь, Интернет, такси, библиотека, стадион, музей, театр и т. д.), а также наличие в шаговой доступности реки, озера, леса, объектов ландшафтного дизайна. В конечном итоге социальная эффективность влияет на увеличение периода трудоспособности и продолжительности жизни человека. И здесь прослеживается прямая зависимость от состояния окружающей среды. В известной мере проблема состоит в том, что результаты социальной эффективности пока бывают менее заметны и требуют большего лага времени для ее комплексной оценки.

Однако практика показывает, что элементы социальной эффективности становятся решающими, например, у механизаторов наличие в комбайне или тракторе кондиционера, сотовой связи и зарядного устройства, у работников животноводческих комплексов дополнительных, комфортных условий для отдыха во время технологических перерывов и т. д.

Экологическая эффективность как самостоятельная научная категория возникла сравнительно недавно. В России приблизительно на рубеже XX и XXI вв. Крайняя необходимость ее определения объясняется необратимыми изменениями в состоянии абсолютно значимых экологических систем на всех континентах Земли. Применительно к сельскому хозяйству человечество столкнулось с дефицитом питьевой воды, недостатком продовольствия, особенно соответствующего экологическим стандартам. Как следствие, остро обострилась проблема состояния земельных угодий, воздушного бассейна и многие другие аспекты, которые в недалеком прошлом преодолевались как бы сами собой за счет компенсационных возможно-

стей Земли. Сегодня без планомерных, постоянных и устойчивых природоохранных мер невозможно вернуть утраченную способность окружающей среды быть продуктивной и безопасной для человека, для его флоры и фауны.

Главная суть экологической эффективности заключается в том, что человек восстанавливает, воспроизводит, улучшает основные элементы экологических систем, задействованных в его хозяйственной деятельности. В результате у него появляется возможность получать материальные и духовные блага, необходимые для его жизни в значительно большем объеме и с более высоким уровнем экологической чистоты. Необходимость определения эколого-экономической эффективности связана с денежной оценкой мероприятий, проводимых для поддержания нормативного состояния всей экологической среды, в которой осуществляется хозяйственная деятельность. Можно выделить и охарактеризовать три стадии взаимодействия человека и окружающей его экологической среды.

Во-первых, на стадии, когда компенсационные возможности Земли полностью восстанавливали и воспроизводили окружающую среду, человек получал прирост экономической эффективности производства за счет целевого использования экосистем или их отдельных элементов, стремясь к получению максимальной прибыли при жестком контроле над затратами или их умышленной минимизации. В результате такого непропорционального отношения к окружающей среде естественный потенциал экосистем снижается и приводит к их частичному или полному исчезновению. Сегодня эта стадия взаимоотношений природы и человека исчерпала свои возможности на большинстве территорий с высокой техногенной нагрузкой на экосистемы.

На второй стадии проблемы определения экологической эффективности стали главным условием возможности расширения производства, увеличения количества вовлекаемых в его развитие ресурсов, а главное, создания условий для поддержания параметров окружающей среды, благоприятных для человека. Экологическую эффективность стали определять с помощью трех основных подходов: нормативно-технического, социального и рыночного – традиционного для современной экономики [10, с. 23–37].

Информационной базой для определения экологической эффективности является организация проведения регулярного мониторинга на производственных территориях субъектов хозяйствования и входящих в их состав важнейших элементов экосистем: воды, воздуха, почвы и т. д. в части определения предельных доз концентрации (ПДК) экологически опасных веществ. Экологическая эффективность в данном случае выступает как система натуральных показателей, данных, полученных в результате измерений качественного состояния различных сред, сравнение этих показателей с нормативными значениями. В случае их превышения разрабатывается проект природоохранных мероприятий, обосновываются источники и размеры инвестиций, необходимых для проведения восстановительных и предупреждающих ухудшение обстановки работ, их исполнители. Разрабатывается график сроков достижения намеченных результатов исходя из принятой технологии работ, стабильный на весь плановый период времени. Продолжительность планового периода определяется экологическими факторами и характером их влияния на данную экологическую систему. Нередко случается, когда результаты хозяйственной деятельности распространяются далеко за пределы отдельных пойменных экосистем и имеют глобальный характер.

В современных условиях перспективной формой отношений человека и окружающей среды является создания искусственных экологических систем. Такие эксперименты успешно проводятся при осуществлении космических полетов, экспедиций, преобразованиях, связанных с экологическим дизайном и т. д. Основу таких проектов составляют сведения о природных экосистемах. Однако большинство экспериментально созданных экологических систем не являются полностью саморегулируемыми и требуют постоянного вмешательства человека. К числу подобных мероприятий можно отнести частичную мелиорацию пойменных территорий, их химизацию и ряд других не всегда достаточно научно проработанных и внедренных в производство мер.

Одной из форм использования пойменных земель является производство травянистых кормов: зеленой массы луговых трав, в местах, где травостой не имеет в своем составе ядовитых и опасных для животных трав. Сено естественной сушки, которое может быть рассыпным, прессованным в тюки или закатанным в валки различной массы (от 50 до 350 и более кг).

По наличию пойменных земель в Центральной России выделяется Рязанская область (300 тыс. га). В пойме реки Оки и ее притоков – Прони и Мокши имеются обширные территории природных кормовых угодий.

Нашими исследованиями установлено, что один гектар заливного луга может круглогодично обеспечить кормами корову с телят. В Советский период в Рязанской области насчитывалось около одного миллиона голов крупного рогатого скота (КРС). В настоящее время поголовье КРС в четыре раза меньше и сконцентрировано оно главным образом на мега фермах и крупных комплексах, что противоречит его естественному воспроизводству и по своим затратам намного дороже. Меньше поголовье коров держат индивидуальные предприниматели и работники личных подсобных хозяйств, тем самым уменьшив до статистического минимума использования потенциальных ресурсов травянистых кормов заливных лугов.

3. Эколого-экономическая эффективность производства сена с природных и улучшенных пойменных лугов.

Нам удалось исследовать особенности производства сена кормодобывающими отрядами на Окских лугах Рыбновского и Рязанского районов Рязанской области, входящих в Приокскую природно-экономическую зону. Были изучены два варианта проведения технологических работ – без существенного улучшения лугов и с проведением агротехнических работ и созданием окультуренных сенокосных угодий.

В первом варианте по существу технология сводилась к однократному скашиванию луговых трав, их полевой сушке, закатыванию в тюки и транспортировке к месту хранения. Ежегодно эти сенокосы использовались исключительно благодаря их естественной продуктивности.

Во втором варианте на пойменных лугах проводилась система мероприятий, направленных на улучшение естественного травостоя, начиная с весенней уборки паводкового мусора, ликвидации закокшенности и закустаренности сенокоса, организации весеннего боронования, а также осуществления подсева травосмеси с малой подачей семян и одновременной подкормкой минеральными удобрениями. Например, в травосмесь входили 35 % рейграса, 25 % клевера, 20 % овсяницы луговой и 10 % тимopheевки. Из расчета сплошного подсева при норме высева 4–6 кг травосмеси на гектар. Одновременно вносились азотные, фосфорные и калийные ($N_{60}P_{60}K_{60}$ кг) комплексные удобрения. При этом учитывалась степень сохранения естественного травостоя, с тем чтобы минимально воздействовать на его природный состав.

В течение календарного года на окультуренных пойменных лугах сенокос проводился дважды по мере созревания травостоя. Сравнительная экономическая оценка использования естественного и окультуренного сенокоса представлена в следующей таблице 2.

Данные таблицы 2 свидетельствуют о более высокой эколого-экономической эффективности производства сена на окультуренных сенокосах. Меры по восстановлению природных травостоев в сочетании с повышением плодородия почвы за счет проведения агротехнических приемов по уходу за лугами и внесению научно обоснованных норм удобрений способствуют их улучшению. Особенно это важно при двухукосном ведении луговодства, т. к. в зиму сенокосные угодья идут с выровненным травостоем. Этот агротехнический прием полностью окупается в первый год использования культурного сенокоса и в последующие 3–5 лет имеет средний уровень рентабельности не ниже 64,0 %. Затем проводится очередной комплекс мероприятий по улучшению травостоя. И это далеко не все резервы пойменного луговодства. В совхозе «Красная пойма» Луговского района Московской области, граничащим с Рыбновским районом Рязанской области, «... в пойме реки Оки с естественных сенокосов получали по 45–60 ц/га сена, а в бригаде по кормопроизводству отделения «Маяк» этого же совхоза в 1971 году урожай сена составил 80 ц/га» [1, с. 89].

Таблица 2 – Сравнительная оценка производства сена на естественных и улучшенных сенокосах в пойме реки Оки на территории Рыбновского района Рязанской области (расчетный вариант), руб/га

Показатели	Без улучшения сенокоса	Окультуренный сенокос	Примечания
1. Весенние уборки наносного мусора с боронованием	–	300	проводится ежегодно после паводка
2. Подсев травосмеси с внесением комплексных удобрений в т. ч. стоимость: – удобрений ($N_{60}P_{60}K_{60}$); – семян	– – –	13000 11200 1800	осуществляется по технологической карте с учетом ожидаемой урожайности зеленой массы и сена
3. Кошение: 1-й укос; 2-й укос	3900 –	3900 3900	май-июнь, август-сентябрь
4. Ворошение валков: 1-й укос; 2-й укос	400 –	400 360	по мере высыхания трав
5. Прессование сена в тюки (валки) при урожайности: 15,0 ц/га; 1-й укос – 46,0 ц/га; 2-й укос (отава) – урожайность 12,0 ц/га	1600 – –	– 2400 1500	в соответствии с принятой технологией
6. Транспортировка сена (до 5 км)	300	720	
7. Заработная плата вспомогательных работников	100	140	
8. Накладные расходы	1400	2300	
9. Всего затрат	7700	28960	
10. Цена реализации сена за 1,0 ц/руб.	900	900	товарность сена 96,0 %
11. Рентабельность, %	36,0	В среднем за 3 года сенокоса 64,0	

Примечание: Источник – разработано авторами.

Заключение

Таким образом, исторически сложилось, что пойменные земли являются наиболее ценными не только в хозяйственном, но и в природосберегающем значении, так как оказывают регулирующее влияние на формирование и воспроизводство экологических систем прирусловой, притеррасной, приматериковой части речных долин, а также на прилегающих территориях. Так, Окские пойменные земли являются основой Рязанской Мещеры, ее пространственного базиса.

Многолетние данные свидетельствуют о большом значении пойменных земель в сельском хозяйстве, в частности, в кормопроизводстве, в скотоводстве, рыбоводстве, пчеловодстве, разведении водоплавающей птицы, в охотничьем хозяйстве, в заготовке дикоросов, в различных направлениях туризма и активного отдыха населения. Современное значение пойменных земель сложно переоценить. Однако их значение в экологической безопасности целых регионов остается недостаточным.

Применительно к Приокской природно-экономической зоне Рязанской области – территории высокопродуктивного молочно-мясного скотоводства, кормопроизводства и овощеводства – можно констатировать, что хозяйственное и экологическое внимание к пойменным землям требует существенного улучшения. Об этом свидетельствуют исследования эколого-экономической эффективности коренного и поверхностного улучшения сенокосов. Расчеты показали, что пойменные луга обеспечивают более высокую урожайность сена, имеют более богатый набор трав в природном травостое, а по затратам в 1,5–2 раза меньше, чем производство сена на пашне. Важно отметить, при этом пахотные земли могут быть использованы для производства продовольственных культур.

Повышение эколого-экономической эффективности пойменных земель призвано комплексно осуществлять мероприятия по ведению сельского хозяйства и его экологической безопасности. Есть полные основания говорить о том, что пойменное ведение хозяйства в сочетании с природоохранной деятельностью имеют обоснованное и более благоприятное с экологической точки зрения будущее.

Для современных условий хозяйствования чрезвычайно важное значение имеет подготовка специалистов по профилю «экологическая и эколого-экономическая эффективность». В ученом мире давно обсуждается вопрос внедрения в образовательную сферу необходимых знаний по экологической эффективности как самостоятель-

ной категории. Наступило время, когда инструментами, регулирующим взаимодействие человека и окружающей среды, должны стать долгосрочные нормы и нормативы, обеспечивающие экологическую безопасность.

Список цитированных источников

1. Пойменные луга СССР / под ред. Н. Г. Андреева, А. П. Мовсисянца. – М. : Колос, 1973. – 472 с.
2. Научно-обоснованные системы земледелия Рязанской области на 1981–1985 гг. – Рязань, 1982. – 190 с.
3. Резолюция Первой Астраханской конференции по природопользованию. – Л.-Астрахань, 1968. – 107 с.
4. Система ведения полевого земледелия в индивидуальных и фермерских хозяйствах Рязанской и Тульской областей. – Рязань : ГНУ ВНИМС, 2003. – С. 5.
5. Маринченко, А. В. Экология : учеб. пособие / А. В. Маринченко. – 5-е изд. – М. : ИТК «Дашков и К*», 2012. – 328 с.
6. Вейник, А. И. Термодинамика реальных процессов / А. И. Вейник. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 621 с.
7. Луговое хозяйство и пастбищное хозяйство. – Л. : Колос, 1975. – 528 с.
8. Марковский, А. В. Рубки ухода на землях сельскохозяйственного назначения / А. В. Марковский, А. В. Родионов // Устойчивое лесопользование. – 2020. – № 3. – С. 10–12.
9. Оценка воздействия на окружающую среду : учебное пособие / под редакцией В. Н. Питулько. – 2-е изд. – М. : Издательский центр «Академия», 2016. – 400 с.
10. Усенко, Л. Н. Экологическая эффективность и методы ее оценки в АПК / Л. Н. Усенко, А. Г. Чепик // Учет и статистика. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 23–37.
11. Мееровский, А. С. Система лугового кормопроизводства для молочно-товарных ферм и комплексов / А. С. Мееровский, Р. Т. Пастушок, А. Л. Бирюкович // Инновационные технологии в мелиорации : опыт, стратегия, приоритеты : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 110-летию Института мелиорации и 110-летию со дня рождения академика С. Г. Скоропанова, Минск, 05–06 ноября 2020 года / Национальная академия наук Беларуси, Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию, Институт мелиорации. – Минск : Беларуская навука, 2021. – С. 205–208.

12. Технологический регламент по производству зеленого корма и сырья для заготовки кормов на улучшенных сенокосах / А. С. Мееровский, Р. Т. Пастушок, А. Л. Бирюкович, О. С. Михайлова // Мелиорация. – 2021. – № 1 (95). – С. 31–37.
13. Мееровский, А. С. Луговое кормопроизводство Беларуси / А. С. Мееровский, Р. Т. Пастушок, В. Н. Филиппов // Мелиорация. – 2020. – № 3(93). – С. 78–87.
14. Мееровский, А. С. Перспективы лугового кормопроизводства в Республике Беларусь / А. С. Мееровский, А. Л. Бирюкович, Р. Т. Пастушок // Стратегия и приоритеты развития земледелия и селекции полевых культур в Беларуси : Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 90-летию со дня основания РУП "Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию", Жодино, 05–06 июля 2017 года. – Жодино : ИВЦ Минфина, 2017. – С. 183–187.
15. Мееровский, А. С. Естественные луга и их использование / А. С. Мееровский // Современные ресурсосберегающие технологии производства растениеводческой продукции в Беларуси : Сборник научных материалов. – 3-е изд., доп. и перераб. – Минск : ИВЦ Минфина, 2017. – С. 446–452.
16. Мееровский, А. С. Как эффективно использовать луговые земли? / А. С. Мееровский, А. Бирюкович // Белорусское сельское хозяйство. – 2016. – № 4. – С. 44–46.
17. Медоуз, Д. Х. Пределы роста: 30 лет спустя / Д. Х. Медоуз, Д. Л. Медоуз, И. Рандес. – М. : Издательство «Лаборатория знаний», 2015. – 236 с.
18. Эффективность сельскохозяйственного производства (методические рекомендации). Коллективная монография / редкол.: И. Г. Ушачев, И. С. Санду, В. А. Свободин. – М. : Всероссийский научно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства, 2005. – 156 с.
19. Югай, А. М. Методические положения стимулирования рационального использования сельскохозяйственных земель / А. М. Югай. – Тула : ГрифК, 2009. – 152 с.
20. Савченко, Е. С. Концептуальная модель гармоничной экономики России: проблемы и суждения / Е. С. Савченко // АПК: экономика, управление. – 2022. – № 5. – С. 3–6. – DOI: 10.33305/225-3.
9. Ocenka vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu : uchebnoe posobie / pod redakciej V. N. Pitul'ko. – 2-e izd. – M. : Izdatel'skij centr «Akademiya», 2016. – 400 s.
10. Usenko, L. N. Ekologicheskaya effektivnost' i metody ee ocenki v APK / L. N. Usenko, A. G. Chepik // Uchet i statistika. – 2024. – T. 21, № 2. – S. 23–37.
11. Meerovskij, A. S. Sistema lugovogo kormoproizvodstva dlya molochno-tovarnyh ferm i kompleksov / A. S. Meerovskij, R. T. Pastushok, A. L. Biryukovich // Innovacionnye tekhnologii v melioracii : opyt, strategiya, priority : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoj 110-letiyu Instituta melioracii i 110-letiyu so dnya rozhdeniya akademika S. G. Skoropanov, Minsk, 05–06 noyabrya 2020 goda / Nacional'naya akademiya nauk Belarusi, Nauchno-prakticheskij centr NAN Belarusi po zemledeliyu, Institut melioracii. – Minsk : Belaruskaya navuka, 2021. – S. 205–208.
12. Tekhnologicheskij reglament po proizvodstvu zelenogo korma i syr'ya dlya zagotovki kormov na uluchshennyh senokosah / A. S. Meerovskij, R. T. Pastushok, A. L. Biryukovich, O. S. Mihajlova // Melioraciya. – 2021. – № 1 (95). – S. 31–37.
13. Meerovskij, A. S. Lugovoe kormoproizvodstvo Belarusi / A. S. Meerovskij, R. T. Pastushok, V. N. Filippov // Melioraciya. – 2020. – № 3(93). – S. 78–87.
14. Meerovskij, A. S. Perspektivy lugovogo kormoproizvodstva v respublike Belarus' / A. S. Meerovskij, A. L. Biryukovich, R. T. Pastushok // Strategiya i priority razvitiya zemledeliya i selekcii polevyh kul'tur v Belarusi : Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoj 90-letiyu so dnya osnovaniya RUP "Nauchno-prakticheskij centr NAN Belarusi po zemledeliyu", Zhodino, 05–06 iyulya 2017 goda. – Zhodino : IVC Minfina, 2017. – S. 183–187.
15. Meerovskij, A. S. Estestvennye luga i ih ispol'zovanie / A. S. Meerovskij // Sovremennye resursosberegayushchie tekhnologii proizvodstva rastenievodcheskoj produkcii v Belarusi : Sbornik nauchnyh materialov. – 3-e izd., dop. i pererab. – Minsk : IVC Minfina, 2017. – S. 446–452.
16. Meerovskij, A. S. Kak effektivno ispol'zovat' lugovye zemli? / A. S. Meerovskij, A. Biryukovich // Belorusskoe sel'skoe hozyajstvo. – 2016. – № 4. – S. 44–46.
17. Medouz, D. H. Predely rosta: 30 let spustya / D. H. Medouz, D. L. Medouz, I. Randes. – M. : Izdatel'stvo «Laboratoriya znaniy», 2015. – 236 s.
18. Effektivnost' sel'skohozyajstvennogo proizvodstva (metodicheskie rekomendacii). Kollektivnaya monografiya / redkol.: I. G. Ushachev, I. S. Sandu, V. A. Svobodin. – M. : Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut ekonomiki sel'skogo hozyajstva, 2005. – 156 s.
19. YUgay, A. M. Metodicheskie polozheniya stimulirovaniya racional'nogo ispol'zovaniya sel'skohozyajstvennyh zemel' / A. M. YUgay. – Tula : GriffK, 2009. – 152 s.
20. Savchenko, E. S. Konceptual'naya model' garmonichnoj ekonomiki Rossii: problemy i suzhdeniya / E. S. Savchenko // APK: ekonomika, upravlenie. – 2022. – № 5. – S. 3–6. – DOI: 10.33305/225-3.

References

1. Pojmennye luga SSSR / pod red. N. G. Andreeva, A. P. Movsisyanca. – M. : Kolos, 1973. – 472 s.
2. Nauchno-obosnovannye sistemy zemledeliya Ryazanskoj oblasti na 1981–1985 gg. – Ryazan', 1982. – 190 s.
3. Rezolyuciya Pervoj Astrahanskoj konferencii po prirodopol'zovaniyu. – L.-Astrahan', 1968. – 107 s.
4. Sistema vedeniya polevogo zemledeliya v individual'nyh i fermerskih hozyajstvah Ryazanskoj i Tul'skoj oblastej. – Ryazan' : GNU VNIMS, 2003. – S. 5.
5. Marinchenko, A. V. Ekologiya : ucheb. posobie / A. V. Marinchenko. – 5-e izd. – M. : ITK «Dashkov i K*», 2012. – 328 s.
6. Vejniki, A. I. Termodinamika real'nyh processov / A. I. Vejniki. – Minsk : Navuka i tekhnika, 1991. – 621 s.
7. Lugovodstvo i pastbishchnoe hozyajstvo. – L. : Kolos, 1975. – 528 s.
8. Markovskij, A. V. Rubki uhoda na zemlyah sel'skohozyajstvennogo naznacheniya / A. V. Markovskij, A. V. Rodionov // Ustojchivoe lesopol'zovanie. – 2020. – № 3. – S. 10–12.

Материал поступил 05.05.2025, одобрен 31.05.2025, принят к публикации 09.07.2025

ЭКОНОМИКА

UDC 338.45

**ANALYSIS OF DEVELOPMENT AND GROWTH OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY
TO PROMOTE IMPROVEMENT OF QUALITY AND EFFICIENCY OF THE NATIONAL
ECONOMY OF THE REPUBLIC OF BELARUS BASED ON THE VAR MODEL**

Yue Taishan

PhD Student at the Department of Analytical Economics and Econometrics of Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: 623921863@qq.com

Abstract

The article is devoted to the analysis of the dynamics and structural features of the construction sector of the Republic of Belarus, as well as its impact on the national economy for the period 2014–2023. The research aims to conduct a comprehensive assessment of the construction sector's development, identify key factors determining its functioning, and define its role in ensuring the quality and efficiency of the Belarusian national economy.

To achieve this goal, the study employs a comprehensive methodological approach, including the analysis of statistical data on key indicators of the construction industry (dynamics of contract work volumes, structure and volumes of investments, number of construction organizations, housing commissioning) and econometric modeling based on a Time-Varying Vector Autoregression (TV-VAR) model. The key variables selected for modeling were the GDP of the Republic of Belarus, the volume of construction contract work, fixed capital investments allocated to construction, the share of construction investments in total investment capital, and the physical volume index of construction and installation works.

The analysis of current trends revealed periods of dynamic transformations in the Belarusian construction industry, including the impact of state modernization programs and fluctuations in the sector's share of GDP. The significant role of the state as a regulator and customer was noted, as well as changes in the number of construction organizations and the volume of contract work, including capital and current repairs, at the regional level. The dynamics of investments in construction and installation works and housing commissioning were also analyzed.

The research findings can be useful for forming effective investment policies, forecasting construction activity, and developing measures to enhance the industry's competitiveness.

Keywords: construction industry, investments, economic growth, construction and installation works, housing construction, construction organizations.

**АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ И РОСТА СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ ДЛЯ СОДЕЙСТВИЯ ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТИ
НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ НА ОСНОВЕ VAR-МОДЕЛИ**

Юэ Тайшань

Реферат

Статья посвящена анализу динамики и структурных особенностей строительного сектора Республики Беларусь, а также его влияния на национальную экономику за период 2014–2023 годов. Исследование направлено на проведение всесторонней оценки развития строительного сектора, выявление ключевых факторов, определяющих его функционирование, и определение его роли в обеспечении качества и эффективности национальной экономики Республики Беларусь.

Для достижения поставленной цели в работе применяется комплексный методологический подход, включающий анализ статистических данных по основным показателям строительной отрасли (динамика объемов подрядных работ, структура и объемы инвестиций, количество строительных организаций, ввод жилья) и эконометрическое моделирование на основе векторной авторегрессии с переменной во времени (TV-VAR). В качестве ключевых переменных для моделирования были выбраны ВВП Республики Беларусь, объем подрядных строительных работ, инвестиции в основной капитал, направленные на строительство, удельный вес строительных инвестиций в общем инвестиционном капитале и индекс физического объема строительно-монтажных работ.

Анализ современных трендов выявил периоды динамичных трансформаций в белорусской строительной отрасли, включая влияние государственных программ модернизации и колебания доли сектора в ВВП. Отмечена высокая роль государства как регулятора и заказчика, а также изменения в количестве строительных организаций и объемах подрядных работ, включая капитальный и текущий ремонт, в региональном разрезе. Также проанализирована динамика инвестиций в строительно-монтажные работы и ввод жилья.

Результаты исследования могут быть полезны для формирования эффективной инвестиционной политики, прогнозирования строительной активности и разработки мер по повышению конкурентоспособности отрасли.

Ключевые слова: строительная отрасль, инвестиции, экономический рост, строительно-монтажные работы, жилищное строительство, строительные организации.

Introduction

The economic growth of the Republic of Belarus directly depends on the dynamic development of the construction industry, which has a significant impact on macroeconomic processes. The construction sector is an important element of investment activity, ensuring the modernization of infrastructure, stimulating business activity and creating new jobs. The study is particularly relevant in the context of changing investment structures and fluctuating economic indicators. In this regard, a detailed study of the factors determining the development of the construction sector, as well as its impact on GDP and macroeconomic stability, is necessary.

Modern economic and mathematical models are widely used both in scientific research and in practical developments, contributing to the optimization of construction production management. In this context, it is especially important to take into account the complex of interdependent factors that can have both a deterministic and random impact on the key performance indicators of construction organizations.

Today, the most widely used models are correlation-regression analysis, production functions and systems of econometric equations, which allow us to identify relationships between parameters and predict their dynamics. However, the most promising direction for further development of analytical methods is the vector autoregression model (VAR) [1; 7]. This

approach makes it possible to study the mutual influence of production indicators of a construction company more deeply and objectively, taking into account both historical dynamics and possible structural changes [19]. This article will focus on the analysis of this model and its practical application for assessing and forecasting the construction sector.

The purpose of this article is to conduct a comprehensive analysis of the development and growth of the construction industry in Belarus from the point of view of its impact on the quality and efficiency of the national economy.

Research methodology. To achieve the stated goal, the following methodological approaches are used:

1) analysis of statistical data for 2014–2023 – study of the dynamics of the construction sector, volumes of contract work, structure of investments and their share in the economy;

2) economic and mathematical modeling by applying the time-variable vector autoregression (TV-VAR) model for the construction sector of the Republic of Belarus;

The use of an integrated approach to research allows us to form a holistic understanding of the functioning of the construction industry and its importance for the national economy, as well as to develop practical recommendations for improving the efficiency of its work.

Literature Review. Extensive attention in the scientific literature is devoted to various aspects of the construction sector. Researchers from China analyze the relationship between government management and production in the context of the energy efficiency of China's construction industry, identifying regional differences and key factors [6; 14; 18]. The qualitative development of China's construction industry is assessed based on an innovation-driven approach [15; 16], and social sustainability indicators for green buildings in China are validated using the fuzzy Delphi method.

Innovation and technology are also important research topics. Additive manufacturing is considered as a technology facilitating the digitalization of construction within the "Construction 4.0" concept. The role of innovation as a mediator in the impact of knowledge management capabilities on the organizational performance of construction firms is investigated. The appli-

cation of blockchain in the built environment and the construction industry is analyzed, including systematic reviews, conceptual models, and practical use cases [12; 13]. Systems for construction site safety monitoring and excavator activity analysis are being developed.

Issues of sustainable development and ecology are also a focus of attention. Critical success factors for integrating sustainability principles into construction project management practices in developing countries are explored [2; 3]. The impact of knowledge management potential on the organizational performance of construction companies is studied, as well as the perception of knowledge management among construction practitioners [11; 20].

Economic-mathematical models for decision-making in organizational resource management, applicable to construction, are proposed [1; 7; 8; 19].

This review demonstrates the multifaceted nature of research in the construction field, covering technological innovations, sustainable development, management practices, and economic analysis, with particular attention to China's experience in several works.

Modern Development Trends in the Construction Industry of the Republic of Belarus

The Belarusian construction industry has been going through a series of dynamic transformations, covering periods of rapid growth, followed by inevitable corrections. A striking example was the large-scale economic modernization program initiated in the late 2000s, when an ambitious goal was set to bring the annual housing commissioning to 10 million square meters. However, market realities have shown that a stable balance without the risk of overheating is possible in the range of 4–6 million square meters.

In 2024, the construction sector once again demonstrated positive dynamics, increasing its share in Belarus's GDP to 5.8 %, which is 0.5 percentage points higher than the previous year. In a historical context, this figure can be considered moderate: in certain periods, the industry's contribution reached 10 % of GDP, but such rates often led to serious imbalances in the economy (Figure 1).

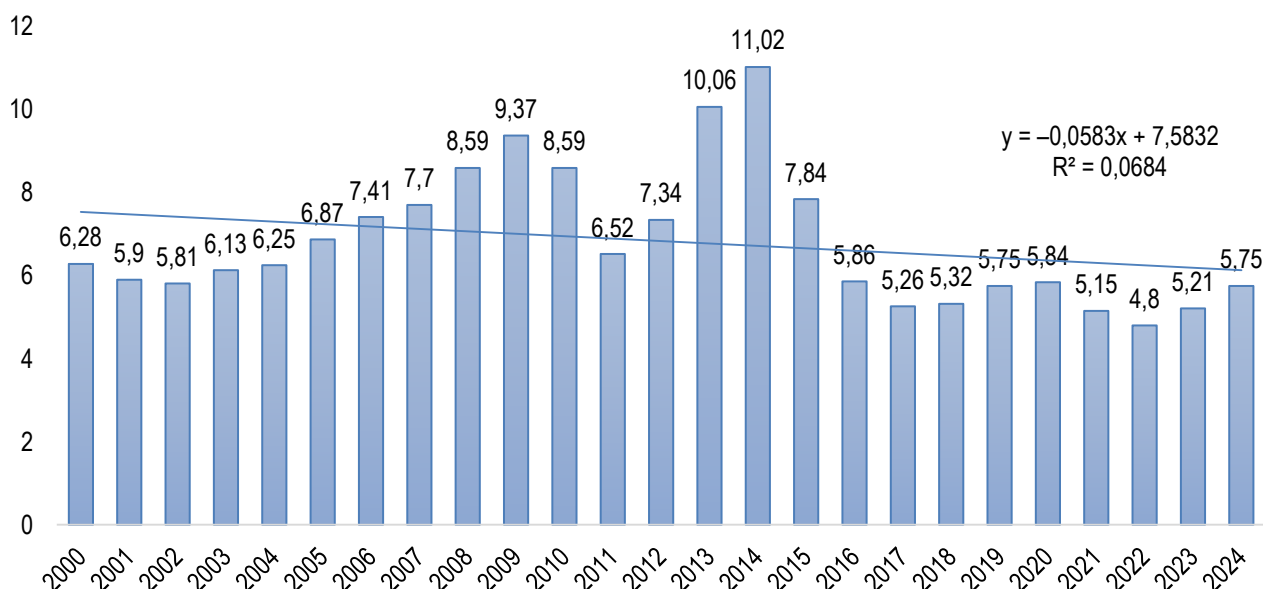


Figure 1 – Contribution of the construction sector to the GDP of the Republic of Belarus in 2000–2024, %

Source: author's development based on [10].

The construction industry occupies a strategic position in the economy of Belarus, exerting a complex influence on the development of regions and the entire country as a whole. The key factor of its importance is the active participation of the state, which acts simultaneously as a regulator, the largest customer and a significant market player. This scale of involvement explains why the construction sector remains a powerful engine of economic growth and structural transformation.

In 2023, there are about 8,073 organizations operating in the construction sector, and the vast majority of them are private enterprises (Table 1). However, despite the relatively small share of state construction organizations (only 4 % of the total), they account for about 17 % of contract work. This indicates a high concentration of large infrastructure projects in the public sector, which, in turn, determines the strategic priorities of the industry.

Table 1 – Dynamics of construction organizations and their distribution by regions of the Republic of Belarus in 2019–2023, units

Region	2019	2020	2021	2022	2023	Deviation (2019–2023)	Growth rate (2019 to 2023, in %)
Republic of Belarus	8 332	8 357	8 101	8 034	8 073	–259	–3.11 %
Brest region	840	866	868	857	861	+21	+2.50 %
Vitebsk region	686	664	642	635	628	–58	–8.46 %
Gomel region	836	834	810	911	802	–34	–4.07 %
Grodno region	635	601	590	590	591	–44	–6.93 %
Minsk city	1 704	1 669	1 588	1 542	1 557	–147	–8.63 %
Minsk region	2 928	3 011	2 922	2 949	2 967	+39	+1.33 %
Mogilev region	723	709	681	670	667	–56	–7.74 %

Source: author's development based on [4].

An analysis of the dynamics of construction organizations in the regions of the Republic of Belarus for the period 2019–2023 revealed multi-directional trends. The overall indicator for the country showed a decrease of 259 units (–3.11 %), which indicates a moderate reduction in the number of construction organizations.

Brest Region showed an increase of 21 units (+2.50 %), which may be due to regional initiatives to develop the construction industry. Minsk Region also increased the indicator by 39 units (+1.33 %), which confirms the stable development of the construction sector in this region.

The Vitebsk region shows the largest decrease by 58 units (–8.46 %), which may indicate a decrease in construction activity. Minsk also sig-

nificantly reduced its indicators (–147 units, –8.63 %), which may be due to changes in urban development and economic structure. Grodno region (–44 units, –6.93 %) and Mogilev region (–56 units, –7.74 %) also showed a noticeable decrease. Gomel region, despite growth in 2022, ended the analyzed period with a decrease in the number of organizations by 34 units (–4.07 %).

The overall trend shows a reduction in the number of construction organizations in most regions, which may be due to economic changes, redistribution of resources, or tightening of conditions in the construction market. However, in some areas, stability or slight growth is observed, which indicates local development factors.

Table 2 – Volume of contract work classified by types of economic activity in section F “Construction” in accordance with OKRB 005-2011 in the Republic of Belarus in 2019–2023, million BYN

Region	Type of repair	2019	2020	2021	2022	2023	Deviation (2019–2023)	Growth rate (2019 to 2023 %)
Republic of Belarus	Volume of contract work, total	12191.3	13060.4	12831.3	13511.6	16550.5	4359.1	35.8
	Capital	1080.0	1195.7	1182.9	1291.6	1587.5	507.5	47.0
	Current	1722.1	1589.4	1644.6	1983.7	2641.4	919.3	53.4
Brest region	Volume of contract work, total	1388.1	1454.6	1430.5	1522.7	1869.8	481.7	34.7
	Capital	91.0	87.0	121.4	125.4	159.1	68.0	74.7
	Current	181.5	166.0	178.7	230.7	334.3	152.8	84.2
Vitebsk region	Volume of contract work, total	1063.4	1052.9	1086.4	1198.3	1398.1	334.7	31.5
	Capital	139.5	149.0	175.3	174.5	216.4	76.9	55.1
	Current	214.2	173.7	179.9	241.1	299.7	85.5	39.9
Gomel region	Volume of contract work, total	1374.3	1510.3	1537.5	1557.5	1923.3	549.0	39.9
	Capital	122.1	158.2	169.3	156.9	206.9	84.8	69.4
	Current	192.4	179.0	177.9	221.4	297.2	104.8	54.5
Grodno region	Volume of contract work, total	1160.5	1210.0	1180.3	1304.6	1635.2	474.7	40.9
	Capital	79.0	101.8	86.8	101.7	117.1	38.1	48.2
	Current	137.4	137.6	143.1	207.5	252.1	114.7	83.5
Minsk city	Volume of contract work, total	4051.7	4479.3	4360.7	4380.2	5285.7	1234.0	30.5
	Capital	296.8	323.1	312.1	341.9	416.5	119.8	40.4
	Current	496.8	503.3	528.3	530.0	672.2	175.4	35.3
Minsk region	Volume of contract work, total	2234.5	2368.4	2241.5	2461.9	3003.0	768.6	34.4
	Capital	243.0	252.4	184.1	251.9	289.8	46.7	19.2
	Current	349.7	289.0	282.0	368.9	522.4	172.7	49.4
Mogilev region	Volume of contract work, total	918.8	984.8	994.3	1086.4	1435.3	516.5	56.2
	Capital	108.5	124.2	133.9	139.3	181.7	73.1	67.4
	Current	150.1	140.7	154.8	184.1	263.5	113.4	–27.3

Source: author's development based on [4].

Analysis of the dynamics of the volume of contract work in the construction industry of the Republic of Belarus for the period 2019–2023 demonstrates a steady growth of indicators. In general, the total volume of contract work increased by RUB 4,359.1 million (+35.8 %) compared to 2019, which indicates high activity in the construction sector.

The largest increase is observed in the capital repairs segment, which grew by 507.5 million BYN (+47.0 %), and current repairs showed even more significant growth – +919.3 million BYN (+53.4 %). This may be due to the modernization of infrastructure and the expansion of the volume of restoration work.

Among the regions, Minsk demonstrated the greatest growth – the volume of contract work increased by RUB 1,234.0 million (+30.5 %). In the Minsk region, the increase was RUB 768.6 million (+34.4 %), and in the Gomel region – RUB 549.0 million (+39.9 %). Such growth may be associated with the active development of urban and regional infrastructure, as well as with the implementation of large-scale construction projects.

Noticeable growth was also noted in the Grodno Region (+40.9 %), Brest Region (+34.7 %) and Vitebsk Region (+31.5 %). The largest increase in capital repairs was recorded in the Brest Region (+74.7 %) and Mogilev Region (+67.4 %), which indicates increased attention to the reconstruction of buildings and engineering structures.

It is noteworthy that in the Mogilev region the volume of contract work increased by 516.5 million BYN (+56.2 %), while the growth rate of cur-

rent repairs was –27.3 %, which may indicate a shift in emphasis towards major repairs and new construction projects.

Thus, the presented data demonstrate stable growth of the construction sector, an increase in the volume of major and current repairs, as well as regional differences in the dynamics of contract work. This trend confirms the high level of investment activity in construction and infrastructure renovation.

Analysis of the dynamics of the physical volume of contract work (table 3), classified by types of economic activity in section F "Construction", confirms the significant impact of the construction industry on the national economy of the Republic of Belarus. In 2019–2023, contract work indicators demonstrated both periods of decline and recovery, reflecting macroeconomic trends and structural changes in the industry.

Table 3 – Index of physical volume of contract works classified by types of economic activity in section F "Construction" in accordance with OKRB 005-2011 in % of the previous year in comparable prices across the territory of the Republic of Belarus for 2019–2023

Region	Type of repair	2019	2020	2021	2022	2023
Republic of Belarus	Volume of contract work, total	105.1	98.4	86.7	89.3	111.7
	Capital	107.5	99.0	86.5	91.7	114.3
	Current	114.0	83.9	92.4	100.8	119.7
Brest region	Volume of contract work, total	106.4	97.1	86.8	91.0	110.6
	Capital	94.5	87.7	126.8	85.3	112.2
	Current	113.3	82.6	93.9	110.1	127.6
Vitebsk region	Volume of contract work, total	118.4	91.8	91.6	94.4	109.3
	Capital	110.9	97.6	103.4	84.1	121.6
	Current	129.3	75.5	92.1	114.4	114.9
Gomel region	Volume of contract work, total	101.3	100.4	89.9	87.6	113.0
	Capital	85.9	119.2	94.5	80.5	122.9
	Current	108.4	84.7	87.6	102.0	120.9
Grodno region	Volume of contract work, total	97.5	95.0	89.0	94.1	114.5
	Capital	92.9	117.5	77.6	98.5	107.1
	Current	112.3	91.3	96.2	124.7	109.9
Minsk city	Volume of contract work, total	103.4	100.8	85.6	85.9	109.5
	Capital	101.1	95.7	84.3	90.5	117.2
	Current	112.5	89.8	97.1	83.9	116.5
Minsk region	Volume of contract work, total	108.4	98.6	81.9	89.3	111.6
	Capital	146.1	93.4	61.9	111.9	102.8
	Current	113.0	77.6	82.8	105.8	123.8
Mogilev region	Volume of contract work, total	105.2	98.8	89.8	93.9	119.4
	Capital	112.9	97.2	92.8	92.6	117.9
	Current	111.2	84.2	97.9	102.0	125.6

Source: author's development based on [4].

The total volume of contract work for 2023 amounted to RUB 16,550.5 million, which is 35.8 % higher than the 2019 level, confirming the recovery and growth of the construction sector. Capital repairs increased by 47.0 %, reaching RUB 1,587.5 million, and current repairs demonstrated the most noticeable increase – 53.4 %, reaching RUB 2,641.4 million. This indicates an expansion of restoration work and modernization of infrastructure facilities.

The connection with the index of physical volume of contract work also confirms the cyclical nature of the industry's development. For example, the decline in 2020 (a decrease to 98.4 % of the previous year's level) was followed by a correction in 2021–2022. The subsequent growth to 111.7 % in 2023 coincides with an increase in investment in construction and major repairs, which confirms the positive dynamics of construction investment (Table 4).

Thus, the increase in the physical volume of contract work is directly related to the restoration and growth of the national economy, and the stable increase in capital and current repairs indicates the continuation of the process of modernization and renewal of infrastructure.

An analysis of the dynamics of investment in construction and installation works in the Republic of Belarus for the period 2019–2023 shows a significant increase in investment in this segment of the economy. Overall, the volume of investment increased by RUB 3,137.8 million (+22.0 %), which demonstrates the active development of the construction sector and its impact on the national economy.

The largest increase was recorded in the Mogilev region, where the volume of investments increased by 550.1 million BYN (+62.2 %), which may indicate the implementation of large construction projects in the region. A significant increase in capital investments is also noted in the Brest region (+43.0 %) and Minsk (+29.0 %), which may be due to active urbanization and infrastructure development.

In the Minsk region, investments grew by 701.1 million BYN (+19.0 %), and in the Grodno region – by 219.7 million BYN (+11.3 %), which also confirms the positive dynamics in the construction sector. In the Vitebsk region, growth was 23.1 %, and in the Gomel region, on the contrary, there is a decrease in investments by 5.3 %, which may be due to the redistribution of resources or a slowdown in the pace of implementation of construction projects.

Table 4 – Volume of investments in construction and installation works in the Republic of Belarus in 2019–2023, million BYN

Region	2019	2020	2021	2022	2023	Deviation (2019–2023), thousand BYN	Growth rate (2019 to 2023, %)
Republic of Belarus	14289.2	15602.3	15217.5	14685.9	17427.0	3137.8	22.0
Brest region	1702.6	1741.1	1776.1	1940.2	2434.3	731.7	43.0
Vitebsk region	1256.8	1487.2	1294.5	1277.8	1546.6	289.8	23.1
Gomel region	2148.7	2547.1	2397.1	1771.9	2035.1	–113.5	–5.3
Grodno region	1940.2	1966.9	1968.1	1825.9	2159.9	219.7	11.3
Minsk city	2651.1	2903.3	2801.3	3133.6	3421.0	769.9	29.0
Minsk region	3694.2	3989.4	3937.6	3601.0	4395.4	701.1	19.0
Mogilev region	884.4	959.3	1027.0	1132.6	1434.5	550.1	62.2

Source: author's development based on [9].

Overall, the analysis of the investment structure confirms the key role of the construction sector in economic development, as increased investment contributes to the modernization of infrastructure, improvement of the quality of housing construction and development of industrial facilities. The presented data also indicate regional differences in investment activity, due to economic factors and urban development features.

In 2025, Belarus expects to commission 4.5 million square meters of housing, a significant part of which will be implemented with state support. Within the framework of social programs, 740 thousand square meters are intended for citizens in need of improved housing conditions.

At the regional level, the Minsk region, including satellite cities, traditionally leads, where it is planned to build 1.325 million square meters. In Minsk, the volume of new housing will amount to 710 thousand square

meters, which confirms the high level of construction activity in the capital region. In the Brest region, it is planned to commission 625 thousand square meters, in the Gomel region – 565 thousand, and in the Grodno, Vitebsk and Mogilev regions, construction will amount to about 400 thousand square meters.

It is worth noting that the dynamics of housing construction in different regions of Belarus is subject to significant fluctuations due to a number of factors. Among them are the level of demand for housing, availability of financing, production capacity of local construction companies, as well as urban development policy affecting the implementation of large infrastructure projects. Differences in these parameters explain regional disproportions, forming the individual characteristics of each regional real estate market and its development potential (Table 5).

Table 5 – Number of residential buildings commissioned in the Republic of Belarus in 2019–2023

Region	2020	2021	2022	2023	Deviation (2020–2023)	Growth rate (2020 to 2023, %)
Republic of Belarus	10 743	11 777	11 160	11 630	+887	8.26 %
Brest region	2 004	2 270	2 178	2 248	+244	12.18 %
Vitebsk region	880	870	879	1 048	+168	19.09 %
Gomel region	1 267	1 452	1 463	1 526	+259	20.45 %
Grodno region	945	1 038	976	942	–3	–0.32 %
Minsk city	161	186	247	131	–30	–18.63 %
Minsk region	4 581	5 027	4 338	4 790	+209	4.56 %
Mogilev region	905	934	1 078	945	+40	4.42 %

Source: author's development based on [4].

Analysis of the dynamics of indicators for 2020–2023 shows overall growth in most regions of the Republic of Belarus. Overall, the value for the country increased by 8.26 %, indicating positive changes.

The highest growth was recorded in the Gomel region (+20.45 %), Vitebsk region (+19.09 %) and Brest region (+12.18 %), which confirms the active development of the construction sector and the growth of investments in these regions.

In Minsk, a decrease of 18.63 % is observed, which may be due to changes in urban development policy or redistribution of investment flows. In the Grodno region, the indicator remained virtually unchanged (–0.32 %), indicating a stable investment climate.

Thus, the presented data confirm the multidirectional dynamics across regions, where growth rates depend on local factors, the level of demand and the availability of financing.

To construct a time-variable vector autoregression (TV-VAR) model for the construction sector of the Republic of Belarus, it is necessary to complete a number of steps:

1. Definition of model variables.

The following macroeconomic indicators can be used to analyze the construction sector:

Y_1 – GDP of the Republic of Belarus, million BYN;

Y_2 – volume of contract construction works, in million BYN;

Y_3 – investments in fixed capital directed towards construction, million roubles;

Y_4 – share of construction investments in total investment capital, %;

Y_5 – index of physical volume of construction and installation works.

2. Formalization of the model.

TV-VAR is written as:

$$Y_t = A_t Y_{t-1} + \varepsilon_t. \quad (1)$$

Where:

A_t – a matrix of coefficients changing over time;

ε_t – the vector of random errors.

The model takes into account the temporal variability of parameters, which allows us to analyze the impact of macroeconomic factors on the construction sector, taking into account structural changes (Table 6) [19].

To conduct the Johansen test on the presented data, it is necessary to perform a cointegration analysis to determine the long-run relationships between the model variables (Table 7).

Johansen test indicate the presence of one cointegration relationship between the macroeconomic indicators of the construction sector of the Republic of Belarus. This indicates a long-term relationship between the volume of contract construction work, investments in the sector, the share of construction investments and the country's GDP.

This conclusion confirms the fact that investment activity in the construction industry affects the rate of economic growth, and GDP, in turn, affects the dynamics of construction. In the short term, structural changes are possible, but in the long term, the relationship remains stable. Thus, the construction sector can be considered as an important factor in macroeconomic stability, and regulation of the investment process in the industry should take into account its impact on the overall economic indicators of the country.

Akaike Index (AIC) is used to select the optimal model by assessing the balance between prediction accuracy and model complexity. The lower the AIC value, the better the model explains the data while minimizing the prediction error. In this case, the most optimal series are GDP (Y_1) and investment in the construction sector (Y_3), since they have the lowest AIC values. This indicates that including these variables in the TV-VAR model will allow us to obtain the most accurate forecasts of the dynamics of the construction sector (Table 8) [1].

Table 6 – Initial data for modeling

Year	GDP of the Republic of Belarus, million BYN	Volume of contract work, million BYN	Volume of investments in construction and installation works, million BYN	The share of construction investments in total investment capital, %	Physical volume index, %
2014	80 579.27	7 134.50	8 719.20	49.19 %	94.3
2015	89 909.80	7 817.30	9 345.50	49.23 %	88.7
2016	94 949.00	8 107.81	9 774.20	50.80 %	85.2
2017	105 748.20	8 599.96	10 278.30	50.33 %	96.3
2018	121 568.00	10074.30	12 349.02	51.42 %	105.2
2019	134 732.1	12191.3	14 289.2	52.30 %	105.1
2020	149 720.8	13060.4	15 602.3	54.10 %	98.4
2021	176 849.0	12831.3	15 217.5	53.80 %	86.7
2022	193 741.0	13511.6	14 685.9	51.90 %	89.3
2023	217 969.0	16550.5	17 427.0	56.20 %	111.7

Source: developed by the author based on [4; 9; 10].

Table 7 – Johansen test results

Hypothesis	Trace statistics (Trace Statistic)	Critical value (5 %)	Maximum own statistics (Max-Eigen Statistic)	Critical value (5 %)	Conclusion
No cointegration ($r = 0$)	112.48	79.89	55.37	41.31	Rejected
One cointegration relationship ($r \leq 1$)	58.13	54.98	32.52	35.21	Accepted
Two cointegration relationships ($r \leq 2$)	27.62	38.51	16.47	26.34	Rejected

Source: developed by the author.

Table 8 – Values of the Akaike criterion (AIC) and Schwartz criterion (SC) for the model series

Lag	AIC	SC
1	-187.32	-180.89
2	-192.41	-185.62
3	-195.74	-188.52
4	-194.63	-186.91

Source: developed by the author.

The optimal lag according to AIC = 3, which indicates the presence of a three-period temporal impact of factors on the construction sector. The results of the Granger test (Table 9) confirm the existence of a two-way causal relationship between GDP and the volume of construction contracting work, indicating a close interaction between the construction sector and economic growth.

Table 9 – Granger Test for VECM

Variables	F-statistics	P-value	Conclusion
GDP → Volume of contract work	7.84	0.008	There is causality
Volume of contract work → GDP	6.21	0.015	There is causality
Investments → Volume of contract work	9.43	0.002	There is causality
Volume of contract work → Investments	7.56	0.011	There is causality
Investment share → Physical volume index	5.14	0.029	There is causality
Physical Volume Index → Share of Investments	4.32	0.043	Causality is weak

Source: developed by the author.

A strong causality was also found between the volume of contract work and investment activity, indicating that investment growth directly affects construction dynamics, and an increase in the volume of contract work, in turn, contributes to the expansion of investment flow.

Additionally, a significant relationship is noted between the specific weight of construction investment and the physical volume index, but the causality from the physical volume index has weak statistical significance. This may indicate that investment policy in construction has a greater impact on the physical volume of work than vice versa.

The results of the VAR model estimation are presented in Table 10.

Table 10 – Results of VAR model estimation

Variable	GDP (Y_1)	Volume of contract work (Y_2)	Investments (Y_3)	Specific gravity (Y_4)	IFO (Y_5)
$Y_1(-1)$	0.87	0.42	0.35	0.12	0.05
$Y_2(-1)$	0.46	0.83	0.29	0.18	0.07
$Y_3(-1)$	0.38	0.36	0.91	0.22	0.11
$Y_4(-1)$	0.22	0.19	0.17	0.84	0.09
$Y_5(-1)$	0.15	0.12	0.10	0.08	0.92

Source: developed by the author.

GDP has the greatest impact on contracting volume and investment, confirming the role of the construction sector as an engine of economic growth. Investments in the construction sector have a strong positive

relationship with the dynamics of contracting, confirming the need for a stable investment flow. The share of construction investment affects the physical volume index, but its impact is moderate, indicating the influence of other factors on the pace of construction activity.

Impulse responses show the reaction of variables to shock changes. Thus, a GDP shock leads to accelerated growth of contract work over 4 reporting periods, and an investment shock causes an increase in the volume of contract work, but the effect fades after 2 years. A shock to the physical volume index has a small effect on GDP, but its impact on investment is noticeable in the long term.

Conclusion

The study of the dynamics of the construction sector of the Republic of Belarus using the time-variable vector autoregression (TV-VAR) model allowed us to identify key macroeconomic relationships and determine the impact of construction activity on the national economy. The analysis confirmed the presence of long-term cointegration between GDP, the volume of contract work, investment in construction, the share of construction investment and the index of physical volume, which indicates a stable impact of construction activity on the economic development of the country. These relationships determine the structural features of the sector and its dependence on macroeconomic dynamics.

The optimal structure of the model was determined based on the Akaike criterion (AIC), which made it possible to identify the most significant variables for forecasting construction activity. According to the data obtained, the key factors are GDP (Y_1) and investment in construction

(Y₃), which confirms the role of investment flow as the main driver of growth in the construction industry.

The causal analysis using the Granger test confirmed the existence of a two-way relationship between GDP and the volume of construction contracting, demonstrating that economic growth contributes to the development of the construction sector, while an increase in the volume of contracting has a positive effect on GDP. In addition, a strong causality was found between investment and contracting, which emphasizes the importance of investment incentives for the sustainable development of the industry.

The assessment of the VAR model coefficients showed that GDP has the greatest impact on the volume of contract work and investment, which confirms its role as the main macroeconomic factor. Investment activity in construction is closely linked to the dynamics of contract work, which emphasizes the need to maintain a stable financial flow to ensure the growth of the sector. The share of construction investment affects the physical volume index, but its impact remains moderate, which indicates the presence of additional factors determining the pace of construction activity.

Impulse responses demonstrated the reaction of variables to shock changes. In particular, the GDP shock leads to accelerated growth in contracting work over four quarters, which demonstrates the direct impact of macroeconomic changes on the construction sector. The investment shock causes an increase in contracting work, but the effect gradually fades after two years, which indicates the temporary nature of the investment impulse. The shock of the physical volume index has a small effect on GDP, but its impact on investment becomes noticeable in the long term, confirming the influence of construction activity on overall economic trends.

In 2025, Belarus is expected to continue to use the construction industry as a key driver of economic growth. The growth of real incomes of the population contributes to stable demand in the real estate market and the activation of housing construction, ensuring positive dynamics of the construction sector. In addition, the availability of credit instruments, especially mortgage lending, increases the investment attractiveness of the construction industry, contributing to the expansion of construction projects and the modernization of infrastructure. State support for infrastructure projects also has a positive impact on the industry, stimulating the growth of contracting work and creating favorable conditions for business development.

The integration of these macroeconomic factors forms a stable basis for further growth of the construction sector, which in turn has a positive impact on employment, the investment climate and the overall economic growth of the country. Thus, the analysis based on the TV-VAR model confirmed the importance of the construction industry for the economic development of the Republic of Belarus and the need for effective management of the investment process to ensure stable growth of the sector.

References

1. Economic and Mathematical Model for Decision-Making in Resource Management of an Organization / A. L. Akhtulov, L. N. Akhtulova, A. V. Leonova, A. V. Ovsyannikov // Omsk Scientific Bulletin. – 2015. – No. 1 (135). – P. 168–172.
2. Critical success factors (CSFs) for integration of sustainability into construction project management practices in developing countries / S. Banihashemi, M. R. Hosseini, H. Golizadeh, S. Sankaran // International Journal of Project Management. – 2017. – Vol. 35, No. 6. – P. 1103–1119.
3. Begum, R. A. Waste generation and recycling: Comparison of conventional and industrialized building systems / R. A. Begum, S. K. Safari, J. J. Pereira // American Journal of Environmental Sciences. – Vol. 6, No. 4. – P. 383–388. – DOI: 10.3844/ajessp.2010.383.388.
4. Construction Statistics. – URL: <https://dataportal.belstat.gov.by/osids/rubric-info/1063384> (date of access: 04.05.2025).
5. Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0 / F. Craveiro, J. P. Duarte, H. Bartolo, P. J. Bartolo // Autom. Constr. – 2019. – Vol. 103. – P. 251–267.
6. The government-production nexus of energy efficiency in China's construction industry: Regional difference and factor analysis / X. Feng, R. Q. Jin, Y. H. Chiu, L. A. Zhang // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2023. – Vol. 30. – P. 106227–106241.
7. Gelrud, Ya. D. Vector Autoregression Model of Production Performance Indicators for a Construction Enterprise / Ya. D. Gelrud, E. A. Ugryumov, V. L. Rybak // Bulletin of South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Informatics. – 2018. – Vol. 7, No. 3. – P. 19–30.
8. Impact of knowledge management capabilities on organizational performance in construction firms: The mediating role of innovation / H. Idrees, S. A. Haider, J. Xu [et al.] // Measuring Business Excellence. – 2023. – Vol. 27, No. 2. – P. 322–340.
9. Investment Statistics in Fixed Assets. – URL: <https://dataportal.belstat.gov.by/osids/rubric-info/1063385> (date of access: 04.05.2025).
10. Key Indicators for the Republic of Belarus. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/osnovnye-pokazateli-po-respublike-belarus/> (date of access: 04.05.2025).
11. Lessing, B. Main factors causing delays in large construction projects: Evidence from New Zealand / B. Lessing, D. Thurnell, S. Durdjev // Journal of Management Economics and Industrial Organization. – 2017. – Vol. 1, No. 2. – P. 63–82.
12. Li, J. Blockchain in the built environment and construction industry: A systematic review, conceptual models and practical use cases / J. Li, D. Greenwood, M. Kassem // Automation in Construction. – 2019. – Vol. 102. – P. 288–307.
13. The Effect of Disruptive Technologies on Facilities Management: A Case Study of the Industrial Sector / K. Michell, N. Brown, J. Terblanche, J. Tucker // In Construction in 5D: Deconstruction, Digitalization, Disruption, Disaster, Development; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. – 2022. – P. 113–123.
14. Validating green building social sustainability indicators in China using the fuzzy delphi method / M. L. Tseng, S. X. Li, C. W. R. Lin, A. S. F. Chiu // Journal of Industrial and Production Engineering. – 2022. – P. 1–19.
15. Xiaowu, D. Evaluation on the High-quality Development of China's Construction Industry Based on the Innovation-driven Way / D. Xiaowu, S. Xushan, D. Zhonghui // Journal of Xi'an Shiyou University (Social Science Edition). – 2022. – Vol. 31. – P. 39–47.
16. Average propagation length analysis for the change trend of China's construction industry chain / Z. Yang, G. Guan, H. Fang, X. Xue // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. – 2021. – Vol. 21. – P. 1078–1092.
17. Zhanq, S. Construction site safety monitoring and excavator activity analysis system / S. Zhanq, L. Zhang // Construction Robotics. – 2022. – Vol. 6. – P. 151–161.
18. Zhong, J. Impact of financial development and its spatial spillover effect on green total factor productivity: evidence from 30 Provinces in China / J. Zhong, T. Li // Mathematical Problems in Engineering. – 2020. – P. 1–11. – DOI: 10.1155/2020/5741387.
19. Zubarev, A. V. Building a GVAR Model for the Russian Economy / A. V. Zubarev, M. A. Kirillova // HSE Economic Journal. – 2023. – Vol. 27, No. 1. – P. 9–32.
20. Zuofa, T. Appraising knowledge management perceptions among construction practitioners / T. Zuofa, E. Ochieng, A. Burns // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Management, Procurement and Law. – 2015. – Vol. 168, No. mp2. – P. 89–98.

Material received 16.05.2025, approved 17.06.2025, accepted for publication 18.06.2025

УДК 658.7

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКОНОМЕТРИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОПЛАТЫ ПРОЕЗДА В ГОРОДСКОМ ПАССАЖИРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

М. К. Жудро¹, Е. В. Романова²

¹ Д. э. н., профессор, профессор кафедры экономики и логистики, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: nv_mk@bntu.by

² Аспирант, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: box224028@mail.ru

Реферат

В статье на основе выполненной аналитики научных рекомендаций и практики организации оплаты проезда в городском пассажирском транспорте в Республике Беларусь и других странах, выявлены методологические достоинства и проблемы эконометрического обоснования ее перспективного развития. Аргументирована необходимость предотвращения злоупотреблений пассажирами возможностью безбилетного проезда и обеспечения экономической добросовестности в пользовании общественным транспортом посредством цифровизации технологической и финансовой технологии реализации системы его оплаты в пассажирском транспорте.

Установлено, что такие ключевые тренды цифровизации пассажирского транспорта, как развитие и гармонизированное внедрение технологических достижений мехатроники, роботизации, искусственного интеллекта (ИИ), экотроники в логистике создают предпосылки для преодоления конфликтной конфигурации систем оплаты проезда в городском пассажирском транспорте, альтернативных затрат, доходов и сложности их оптимизации с позиции требований конкурентной политики всех участников экосистем на основе экономической теории не традиционного равновесного, а предлагаемого деравновесного рынка и маркетинговой практики ее реализации.

Аргументирована необходимость эффективной адаптации системы оплаты проезда в городском пассажирском транспорте к новым вызовам и возможностям ее цифровизации посредством разработки и практикоприменения инженерно-экономического методического инструментария учетной политики эффективного майнинга динамично-дифференцированных значений тарифов транспортных компаний на флуктуирующем рынке агрегативно-сетевого или «умно-сплетенного» спроса и предложения пассажирских перевозок, учитывая три фундаментальные предпосылки его развития: 1) новое адаптивное структурирование баз данных записей о поездках пассажиров и/или выполнения расчетов тарифов и документооборота; 2) имплементацию электронного билетного агрегатора, выполняющего онлайн-комплекс процедур и операций по реализации динамичных систем оплаты проезда в городском пассажирском транспорте и 3) их онлайн метрологию и цифровое администрирование.

Разработана и предложена концепция инженерно-технологического использования двойной валидации динамической дифференциации инвестиционно-финансового кросс-взаимодействий транспортных компаний, пассажиров и бюджета (государства).

Ключевые слова: бизнес-модели, система, оплата проезда, общественный, пассажирский, транспорт, цифровизация, социальная справедливость, экономическая целесообразность, двойная валидация, субсидирование, кросс-взаимодействие, пассажир компании, бюджет, агрегатор, транзакции, концепция.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF ECONOMETRIC SUBSTANTIATION OF THE FARE PAYMENT SYSTEM IN URBAN PASSENGER TRANSPORTATION

M. K. Zhudro, E. V. Romanova

Abstract

In the article on the basis of the analysis of scientific recommendations and practice of fare payment organization in urban passenger transport in the Republic of Belarus and other countries, methodological advantages and problems of econometric substantiation of its prospective development are revealed. The necessity to prevent passengers from abusing the possibility of "fare dodging" and to ensure economic integrity in the use of public transport by means of digitalization of technological and financial technology of its payment system implementation in passenger transport is argued.

It has been established that such key trends of digitalization of passenger transport as the development and harmonized implementation of technological achievements of mechatronics, robotization, "artificial" intelligence (AI), ecotronics in logistics create prerequisites for overcoming the conflict configuration of fare payment systems in urban passenger transport, alternative costs, revenues and the complexity of their optimization from the position of the requirements of competitive policy of all participants of ecosystems on the basis of economic theory not traditional equilibrium, but on the basis of the economic theory of the equilibrium of all participants of the ecosystems.

The necessity of effective adaptation of the fare payment system in urban passenger transport to the new challenges and opportunities of its digitalization through the development and practical application of engineering and economic methodological tools of accounting policy of effective mining of dynamically differentiated values of transport companies' tariffs on the fluctuating market of aggregate-network or "smart-split" demand and supply of passenger transportation has been argued, taking into account three fundamental prerequisites of its development: 1) new adaptive structuring of databases of passenger travel records and/or fare calculations and workflow; 2) implementation of an electronic ticket aggregator, which performs online complex of procedures and operations for the implementation of dynamic fare payment systems in urban passenger transport and 3) their online metrology and digital administration.

The concept of engineering-technological use of double validation of dynamic differentiation of investment-financial cross-interaction of transportation companies, passengers and budget (state) is developed and proposed.

Keywords: business models, system, fare, public, passenger, transport, digitalization, social justice, economic feasibility, double validation, subsidy, cross-interaction, company passenger, budget, aggregator, transactions, concept.

Введение

В процессе исследований актуальной практики разработки и внедрения эффективных бизнес-моделей оплаты проезда в городском пассажирском транспорте в Республике Беларусь и других стран установ-

лено, что ключевыми их методологическими проблемами выступают эмпирические диспропорции величин инвестиционно-финансовых, эксплуатационных расходов транспортных организаций и их маржинальности, генерирующие целый комплекс социально-экономических, бюджет-

ных, культурных, интеллектуально-технологических негативных проявлений как в транспортно-логистическом бизнесе, так и в жизни человека как клиента и представителя социума.

Согласно исследованиям, в 2024–2025 годах усиливаются негативные проблемы контроля за безбилетным проездом в общественном транспорте города Минска. Они особенно актуальны с точки зрения необходимости оптимизации системы финансирования работы транспортной системы и обеспечения выполнения противоречивого взаимодействия двух фундаментальных принципов социально-экономического развития цивилизации: 1) экономической целесообразности и 2) социальной справедливости для всех пассажиров.

Ключевым условием успешного преодоления указанной методологической проблемы является практикоприменение «золотого правила» бизнеса: «за любую полезность нужно платить в полном объеме и в моменте ее приобретения». В настоящее время именно эта эконометрическая аксиома в полной мере с инвестиционно-финансовой точки зрения не реализована и требует проведения обстоятельных научных исследований с целью разработки эффективного алгоритма расчета динамически-дифференцированных величин транзакций за проезд пассажирами в транспорте. Отсутствие действенной системы оплаты проезда в городском пассажирском транспорте в Республике Беларусь генерирует некомпетентное финансовое поведение потребителей транспортных услуг как в городе Минске, так и в других городах Республики Беларусь.

Аргументом сформулированной методологической проблемы эконометрического обоснования системы оплаты проезда в городском пассажирском транспорте выступает новая возможность для уклонения от нее и общественного порицания посредством использования потерянных бесконтактных смарт-карт с записанным проездным документом «льготный». Этот феномен вызывает все большее беспокойство среди транспортных служб и общественности, так как такие действия подрывают доверие к системе льгот и ставят под сомнение эффективность контроля за безбилетным проездом. В результате возникают вопросы о необходимости усиления мер по предотвращению злоупотреблений и обеспечению честности в использовании общественным транспортом. На уровне правительства для поиска успешного решения данной проблемы в соответствии с постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 11.01.2023 № 22 «О проведении эксперимента по оплате транспортной работы» государственным предприятием «Минсктранс» в 2023–2024 гг. в Минске проводится эксперимент по оплате транспортной работы при выполнении городских автомобильных перевозок пассажиров транспортом общего пользования [1].

По данным Национального статистического комитета за период с 2020 г. по 2024 г., объем перевозок пассажиров варьировался в пределах от 1639,1 до 1722,9 млн чел., пассажирооборот за данный период увеличился в 1,43 раза с 1854,2 млн пасс. км до 26500,0 млн пасс. км (таблица 1) [2].

Таблица 1 – Показатели работы транспорта по территории Республики Беларусь

Показатели	2020	2021	2022	2023	2024
Пассажирооборот, тыс. пасс. км	18542084,3	20851081,9	21687659	23900592,6	26500033,6
Объем перевозок пассажиров, тыс. чел.	1639172,5	1591577,5	1568331,2	1629589,5	1722968,2

Анализ структуры пассажирооборота по видам транспорта и объема перевозок на основе статистических данных [2] показал, что если до 2019 г. количество перевезенных пассажиров всеми видами транспорта ежегодно увеличивалось, при этом в структуре перевозок различным транспортом наблюдалось увеличение числа

перевезенных пассажиров автобусами, электробусами при снижении их числа трамваями и троллейбусами, то с 2020 происходит падение объема пассажирских перевозок по всем видам транспорта (рисунок 1, 2). Улучшение ситуации начинается с 2023 г., в 2024 г. рост пассажирооборота составил 109,9 % к 2023 г.

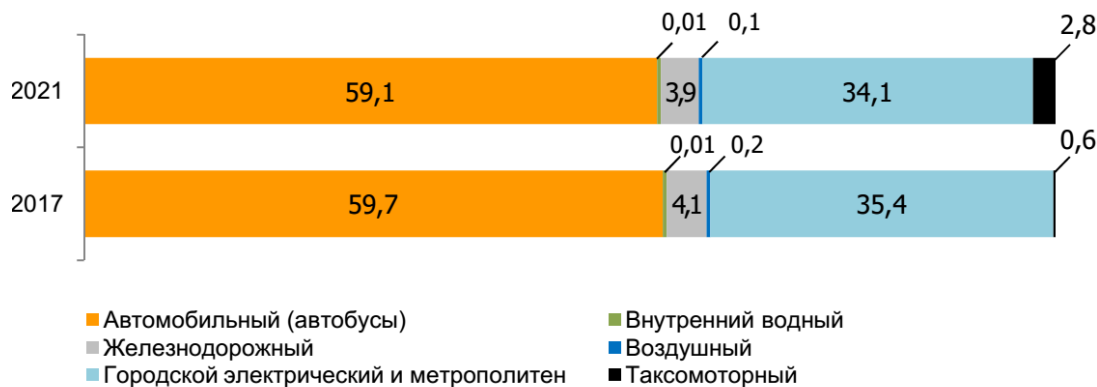


Рисунок 1 – Структура объема перевозок пассажиров по видам транспорта, %

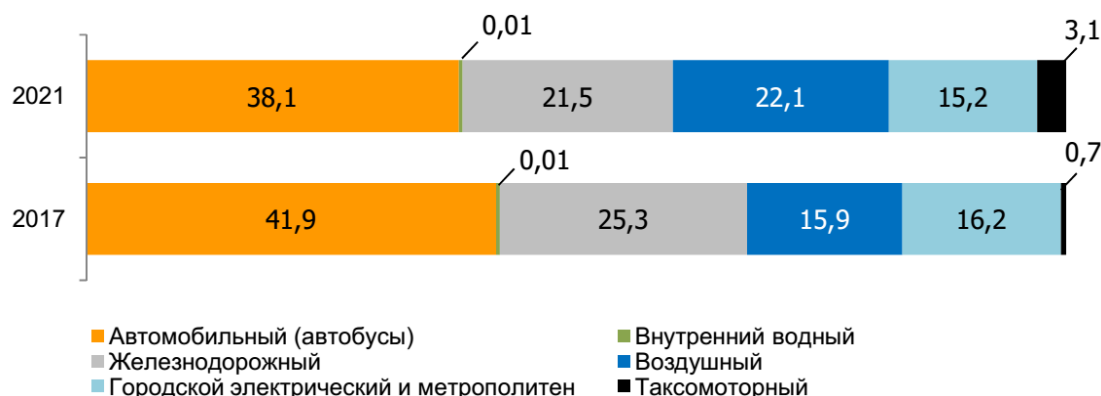


Рисунок 2 – Структура пассажирооборота по видам транспорта, %

По данным ГП «Минсктранс», в рамках эксперимента стоит задача организовать достоверный учет всех перевезенных пассажиров, имеющих право на бесплатный проезд в городском общественном транспорте г. Минска путем выдачи бесконтактных смарт-карт с записанным проездным документом «льготный» для подтверждения факта проезда путем прикладывания смарт-карты к валидатору. Такого рода инженерно-технологическое решение преследует цель совершенствования маршрутной сети и улучшения качества оказываемых услуг, в том числе составления удобного расписания общественного транспорта, учитывая каждого пассажира и его потребности в поездках.

Так, на 1 января 2025 г. выдано 254 882 «льготных» проездных документов на бесконтактных пластиковых картах. Воспользоваться ими пассажиры могут не только для поездок на автобусах, троллейбусах, трамваях, но и в электропоездах столичной подземки. Учащиеся школ, гимназий и колледжей получили 247 326 проездных документов, инвалиды I и II группы, дети инвалиды до 18 лет, ветераны и инвалиды ВОВ и др. – 7 556 [3]. Льготные проездные прикладывают к валидаторам с разной степенью активности около 180 тыс. детей. Ежедневно отмечается до 45 тыс. транзакций. Но это не отражает реальной картины перевозки льготных категорий граждан. Все-таки часть пассажиров карточку в общественном транспорте не прикладывают к валидатору.

Согласно исследованиям, около 15 % учащихся начальной школы свои бесконтактные смарт-карты с записанным проездным документом «льготный» потеряли. Так, с момента действия эксперимента заблокировано свыше 14 тыс. БСК, которые утеряны, сломаны или не возвращены, либо их владельцы утратили право на бесплатный проезд в общественном транспорте [4].

Совершенствование системы оплаты проезда. Инженерно-технологическая концепция

Выполненная аналитика традиционной практики разработки и внедрения эффективных бизнес-моделей оплаты проезда в городском пассажирском транспорте в Республике Беларусь свидетельствуют о доминировании карточно-центричной ее конструкции, которая представляет собой систему сбора платы, в которой средства доказательства права на проезд осуществляются посредством инженерно-технологической концепции: «разовой при входе пассажира в салон транспорта валидации» тех или иных инструментов контроллинга транзакции. При этом любые основные записи о поездках пассажиров в общественном транспорте хранятся непосредственно на карте. Все фронтальные устройства в системе оплат поездок на основе карт обеспечивают информационную и алгоритмическую возможность обновлять записи о поездках и/или выполнять расчеты тарифов непосредственно на карте каждый раз, когда она представляется. В процессе реализации концепции «разовой при входе пассажира в салон транспорта валидации» валидатор/терминал тестирует подлинность карты и что соответствующие права/стоимость присутствуют. Валидатор также обновляет данные на карте, и такие транзакции карты-терминала безопасны и мгновенны [5].

Обстоятельная инженерно-экономическая аналитика существующей методологии обоснования и реализации карточно-центричной конструкции оплаты за проезд позволила установить, что, во-первых, она базируется на преимущественно статичном эконометрическом расчете тарифов и тем самым не учитывает динамико-дифференцированные изменения всех переменных предоставления транспортной компанией услуг пассажиру во времени и бизнес-пространстве. И, как следствие, она не позволяет реализовать «золотое правило» бизнеса: «за любую полезность нужно платить в полном объеме и в моменте ее приобретения».

Во-вторых, транспортные компании испытывают инвестиционно-финансовые ограничения и нуждаются в субсидировании своей транспортно-логистической деятельности.

В-третьих, имеют место спекулятивные схемы оплаты проезда пассажирами и неэквивалентные социально-экономические условия жизни населения страны. В этой связи возникает проблема администрирования контроллинга за безбилетным проездом в общественном транспорте с целью достижения оптимальной маржинальности транспортной системы и обеспечения социально-экономической справедливости для пассажиров и в целом населения. Так, только около 30 % оплачивает пассажир. В общественном транспорте Минска за 2024 год количество безбилетников составило более 100 тысяч безбилетников,

которые получили штрафы на сумму больше 3 млн рублей. При этом на некоторых безбилетников нападения на контролеров возбуждено шесть уголовных дел — по ч. 1 ст. 366 УК (насилие либо угроза насилием в отношении должностного лица, выполняющего служебные обязанности). Штраф за проезд без билета составляет от 0,5 до 1 базовой величины или 21–42 рубля и не освобождает от оплаты проезда. Безбилетника, который не захочет покупать талон, высажат на ближайшей остановке [6]. Пассажир, оплачивая проезд, компенсирует менее трети его реальной стоимости [7].

Этот феномен генерирует определенное социальное безразличие и недовольство среди транспортных служб и общественности. В результате чего такие логистические действия снижают эффект льготной системы оплаты и ставят под сомнение практику ее контроллинга.

Следовательно, в качестве ключевой методологической проблемы эконометрического обоснования оплаты проезда в городском пассажирском транспорте следует считать, во-первых, отсутствие научно-методического обеспечения сочетания регуляторных и динамических эконометрических подходов к обоснованию, формированию и реализации бизнес-моделей реализации стоимостных и ценностных взаимовыгодных экономических интересов транспортных организаций и пассажиров, базирующихся на учете: а) расстояния; б) продолжительности времени поездки; в) физического времени поездки; г) массы и объема пассажироместа; д) уровня доходов пассажиров, пользующихся льготированием пассажирского транспорта; е) репутационного стандарта поездки; ж) плотности пассажиропотоков; з) социально-экономических и функционально-эмоциональных их запросов, обеспечивающих генерирование и практикоприменение эффективных композитных логистических решений государством, бизнесом и клиентом.

В-вторых, сохраняется институционально-технологическая практика доминирования императивной регуляtorики разработки и практикоприменения бизнес-моделей коммерческой и субсидированной системы оплаты проезда в городском пассажирском транспорте, которая сдерживает конвергенцию развития императивной и диспозиционной правовой и социально-экономической среды в транспортно-логистическом бизнесе и в обществе в целом.

В-третьих, действующая институционально-экономическая конструкция оплаты проезда в городском пассажирском транспорте сдерживает конвергенцию интеллектуально-технологического внедрения национальных эффективных цифровых бизнес-моделей оплаты проезда в городском пассажирском транспорте и конкурентных достижений в высокотехнологических странах, мотивирующие национальные транспортные организации снижать субсидирование.

Для преодоления сформулированной выше ключевой методологической проблемы эконометрического обоснования оплаты проезда в городском пассажирском транспорте следует активно использовать возможности ключевых трендов цифровизации учета всех аспектов пассажирских перевозок в контексте синхронизации развития и внедрения технологических достижений мехатроники, роботизации, искусственного интеллекта (ИИ), экотроники в логистике с целью преодоления конфликтной конфигурации альтернативных затрат, доходов и сложности их оптимизации с позиций требований учетной политики всех участников экосистем на основе не традиционной экономической теории равновесного, а неравновесного рынка транспортно-логистических услуг и маркетинговой практики ее реализации [8, 9, 10].

В этой связи следует констатировать, что более состоятельной конструкцией системы оплаты проезда в городском пассажирском транспорте в Республике Беларусь является ее бизнес-модель на основе инженерно-технологической концепции: двойная при входе пассажира в салон и выхода из салона транспорта валидация тех или иных инструментов контроллинга транзакции.

В этих целях можно использовать аккаунт – основанное билетирование (ABT) – это система сбора платы, в которой доказательство права на проезд и любые записи о поездках хранятся в бэк-офисе (т. е. на серверах) и не обязательно на каком-либо физическом носителе, принадлежащем пассажиру. ABT отличается от традиционных схем на основе карт, потому что бизнес-правила и расчет тарифов происходит в бэк-офисе, а тариф рассчитывается и выставляется после завершения поездки. Это означает, что носитель тарифа, используемый для входа и выхода из системы, является ничем иным, как уникальным идентификатором для клиента, связанным с его аккаунтом [11, 12].

При этом важно отметить, что следует применять специальные цифровые архитектуры интеграции карт и АВТ. Они позволяют хранить право на проезд в бэк-офисе и эту информация также записывать на саму карту. Балансы на карте и в бэк-офисе сравниваются и проверяются во время синхронизации. В больших системах объем данных слишком велик, чтобы постоянно синхронизироваться со всеми транспортными средствами, и поэтому (добавить) такой гибридный подход обеспечивает более быструю валидацию и снижает финансовые риски [13].

Их внедрение обеспечивает точное динамико-дифференцированное измерение величин и пропорций инвестиционно-финансовых, эксплуатационных расходов транспортных организаций и маржинальности их логистических услуг, учитывая: а) расстояние; б) продолжительность времени поездки; в) физическое время поездки; г) массу и объем пассажироместа; д) уровень доходов пассажиров, пользующихся льготированием пассажирского транспорта; е) репутационный стандарт поездки; ж) плотность пассажиропотоков; з) социально-экономические и функционально-эмоциональные их запросов в рамках национальной социальной экосистемы [14, 15, 16].

Данное направление развития систем оплаты проезда в общественном пассажирском транспорте способствует устойчивому росту технического, рыночного потенциала предприятий, стабильности, рентабельности и ликвидности их экономической деятельности, а также формированию эффективного использования социальных фондов субсидирования и этических пропорций распределению бюджетных ресурсов.

В этой связи необходимы технологические трансформации традиционных бизнес-моделей систем оплаты проезда в инженерно-экономические конструкции их онлайн билетных агрегаторов, генерирующие инвестиционно-финансовые предпосылки модернизации взаимодействия: а) городского пассажирского транспорта; б) пассажира и в) бюджета [17, 18, 19, 20]. Такого рода цифровизация систем оплаты проезда в общественном пассажирском транспорте трансформирует операционную конструкцию выбора тарифной модели и технологии ее проектирования в зависимости от кросс-изменений всех ключевых бизнес-образующих пассажиропотоков и выбора поставщика. Другими словами, электронный билетный агрегатор выполняет онлайн-комплекс процедур и операций по реализации инновационных систем оплаты проезда в городском пассажирском транспорте [21]. Он реализуется в виде закрытых и открытых программно-технологических систем, ориентированных на SMART-карты предоплаты, постоплаты, билетирование на основе аккаунта, мобильного билетирования с использованием SIM-карт, с защищенным элементом, HCE, интероперабельность, мультисервис, маячки, NFC, QR-коды и др.

Заключение

Выполненные аналитические, эмпирические, экспериментальные исследования позволяют свидетельствовать, что реальное и эффективное решение выявленных методологических проблем эконометрического обоснования оплаты услуг пассажирского транспорта возможно посредством разработки и внедрения композитных инженерно-экономических и цифровых технологических конструкций, производных использования физического и искусственного интеллекта в рамках реализации инженерно-технологической концепции: двойная при входе пассажира в салон и выхода из салона транспорта валидация тех или иных инструментов контроллинга транзакции.

Список цитированных источников

1. Для чего выдается бесконтактная смарт-карта с записанным проездным документом «льготный» лицам, имеющим право бесплатного проезда в городском общественном транспорте г. Минска? – URL: <https://minsktrans.by/faq/dlya-chego-vydaetsya-beskontaktnaya-smart-karta-s-zapisannym-proezdnym-dokumentom-lygotnyj-liczam-imeyushhim-pravo-besplatnogo-proezda-v-gorodskom-obshhestvennom-transporte-g-minska> (дата обращения: 07.01.2025).
2. Статистика транспорта. – URL: <https://dataportal.belstat.gov.by/osids/rubric-info/10610> (дата обращения: 10.02.2025).
3. В Минске выдали почти 255 тыс. карт для льготного проезда в метро и наземном транспорте. – URL: <https://1prof.by/news/v-strane/v-minske-vydali-pochti-255-tys-kart-dlya-lygotnogo-proezda-v-metro-i-nazemnom-transporte> (дата обращения: 10.01.2025).
4. 5 innovations that will make public transport more resilient // Advancing Public Transport. – URL: <https://www UITP.org/news/5-innovations-that-will-make-public-transport-more-resilient> (access date: 19.11.2024).
5. В Беларуси запустили оплату проезда в автобусах картами банков: что будут проверять контролеры. – URL: <https://normativka.by/lib/news/59881> (дата обращения: 28.01.2025).
6. Вот сколько безбилетников поймали за год в Минске. Есть и уголовные дела. – URL: <https://money.onliner.by/2025/01/14/skolko-bezbiletnikov-pojmali-kontrolery> (дата обращения: 28.01.2025).
7. Вот сколько должен стоить в Минске талончик, чтобы общественный транспорт окупался. – URL: <https://money.onliner.by> (дата обращения: 28.01.2025).
8. Жудро, М. М. Smart-экономика трансформирует традиционный закон спроса и предложения в закон «умно-сплетенного» агрегативного спроса и предложения (Zhudro) / М. М. Жудро, В. М. Жудро // Политические, экономические и социокультурные аспекты регионального управления на Европейском Севере: материалы XVI Всероссийской науч. конф. (с международным участием), г. Сыктывкар, 26–28 апреля 2023 г. – Сыктывкар : ГОУ ВО КРАГСиУ, 2023. – С. 345–354.
9. Автоматизация бизнес-процессов компаний в соответствии с концепцией CRM: коллективная монография / Ю. В. Подповетная, П. П. Переверзев, Е. В. Бунова [и др.] ; под ред. Е. В. Буновой. – М. : Перо, 2017. – 134 с.
10. Жудро, В. М. Трансформация традиционной экономики в цифровую экотронику. – URL: <https://www.morebooks.de/shop-ui/shop/product/9786200457905> (дата обращения: 24.04.2025).
11. Мировой рынок автоматических систем оплаты проезда – отраслевые тенденции и прогноз до 2029 года // Data Bridge Market Research. – URL: https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-automatic-fare-collection-system-market?srsltid=AfmBOouUr-nKQ5z_ELK0fi4hYSVW7qAFgr2K9TUMD84JnDiFirY7D (дата обращения: 07.11.2024).
12. Инновации в сборе платы за проезд в странах ACEAH // Southeast Asia Infrastructure. – URL: <https://southeastasiainfra.com/travel-easy-fare-collection-innovations-in-asean-countries-2> (дата обращения: 07.11.2024).
13. Будущее общественного транспорта: внедрение решений по умной продаже билетов // DTSis. – URL: <https://dtsis.com/embracing-smart-ticketing-solutions> (дата обращения: 09.11.2024).
14. Жудро, М. М. Методический инструментальный идентификации и количественного измерения высокотехнологичного бизнеса / М. М. Жудро // Научные труды Белорусского государственного экономического университета. – Минск : БГЭУ, 2019. – Вып. 12. – С. 181–187.
15. Market Challenges Present Opportunities for Sales & Marketing. – URL: <https://www.ttnews.com/articles/market-challenges-present-opportunities-sales-marketing> (дата обращения: 24.03.2025).
16. Automotive Industry: Trends and reflections. – URL: https://webapps.ilo.org/public/libdoc/ilo/2010/110B09_226_engl.pdf (дата обращения: 10.02.2025).
17. Оплата проезда пассажиров // Эксплуатация дорожной сети и интеллектуальные транспортные системы. – URL: <https://mo-its.piarc.org/en/user-services-electronic-payment-payment-applications/passenger-fare-payment?width=500&height=400&inline=true#reference-sources> (дата обращения: 11.11.2024).
18. Как автоматический сбор платы за проезд может улучшить общественный транспорт // Littlepay. – URL: <https://littlepay.com/how-automatic-fare-collection-can-improve-public-transport> (дата обращения: 12.11.2024).
19. Жудро, М. К. Мехатроника как ключевой драйвер формирования гибких профессиональных экономических компетенций / М. К. Жудро, Н. В. // Наука – образованию, производству, экономике : XXI Международная научно-техническая конференция, Республика Беларусь, Минск, 23–24 марта 2023 г. / Белорусский национальный технический университет. – Минск : Четыре четверти, 2023. – С. 98–100.

20. Жудро, М. К. SMART-маркетинг 5P (ZHUDRO) инактиватор традиционных маркетинговых компетенций / М. К. Жудро, М. М. Жудро, В. М. Жудро // Новые парадигмы развития маркетинга в условиях трансформации современной экономики : сборник научных статей Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию основания университета, Гомель, 3 октября 2024 г. / редкол.: Т. Н. Байбардина, О. В. Пигунова ; под науч. ред. Т. Н. Байбардиной. – Гомель : Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации, 2024. – С. 18–20.
 21. Жудро, М. К. Методологические проблемы научного форматирования SMART-экономики / М. К. Жудро, В. М. Жудро // Инновации: от теории к практике : сборник научных статей IX Межд. науч.- прак. конф., Брест, 19–20 октября 2023 г. : в 2 ч. / Брестский государственный технический университет ; редкол. : Г. Б. Медведева [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2023. – Ч. 2. – С. 23–27.
- References**
1. Dlya chego vydaetsya beskontaktnaya smart-karta s zapisannym proezdnyim dokumentom «l'gotnyj» licam, imeyushchim pravo besplatnogo proezda v gorodskom obshchestvennom transporte g. Minska? – URL: <https://minsktrans.by/faq/dlya-chego-vydaetsya-beskontaktnaya-smart-karta-s-zapisannym-proezdnyim-dokumentom-lgotnyj-liczam-imeyushhim-pravo-besplatnogo-proezda-v-gorodskom-obshchestvennom-transporte-g-minska> (data obrashcheniya: 07.01.2025).
 2. Statistika transporta. – URL: <https://dataportal.belstat.gov.by/osids/rubric-info/10610> (data obrashcheniya: 10.02.2025).
 3. V Minske vydali pochti 255 tys. kart dlya l'gotnogo proezda v metro i nazemnom transporte. – URL: <https://1prof.by/news/v-strane/v-minske-vydali-pochti-255-tys-kart-dlya-lgotnogo-proezda-v-metro-i-nazemnom-transporte> (data obrashcheniya: 10.01.2025).
 4. 5 innovations that will make public transport more resilient // Advancing Public Transport. – URL: <https://www.uitp.org/news/5-innovations-that-will-make-public-transport-more-resilient> (access date: 19.11.2024).
 5. V Belarusi zapustili oplatu proezda v avtobusah kartami bankov: chto budut proverjat kontrolery. – URL: <https://normativka.by/lib/news/59881> (data obrashcheniya: 28.01.2025).
 6. Vot skol'ko bezbiletnikov pojmal za god v Minske. Est' i ugovolnye dela. – URL: <https://money.onliner.by/2025/01/14/skolko-bezbiletnikov-pojmal-kontrolery> (data obrashcheniya: 28.01.2025).
 7. Vot skol'ko dolzhen stoit v Minske talonchik, chtoby obshchestvennyj transport okupalsya. – URL: <https://money.onliner.by> (data obrashcheniya: 28.01.2025).
 8. ZHudro, M. M. Smart-ekonomika transformiruet tradicionnyj zakon sprosa i predlozheniya v zakon «umno-spletyonnogo» agregativnogo sprosa i predlozheniya (Zhudro) / M. M. ZHudro, V. M. ZHudro // Politicheskie, ekonomicheskie i sociokul'turnye aspekty regional'nogo upravleniya na Evropejskom Severe: materialy XVI Vserossijskoj nauch. konf. (s mezhdunarodnym uchastiem), g. Syktyvkar, 26–28 aprelya 2023 g. – Syktyvkar : GOU VO KRAGSiU, 2023. – S. 345–354.
 9. Avtomatizaciya biznes-processov kompanij v sootvetstvii s koncepciej CRM: kollektivnaya monografiya / YU. V. Podpovetnaya, P. P. Pereverzev, E. V. Bunova [i dr.] ; pod. red. E. V. Bunovoj. – M. : Pero, 2017. – 134 s.
 10. ZHudro, V. M. Transformaciya tradicionnoj ekonomiki v cifrovuyu ekotroniku. – URL: <https://www.morebooks.de/shop-ui/shop/product/9786200457905> (data obrashcheniya: 24.04.2025).
 11. Mirovoj rynek avtomaticheskikh sistem oplaty proezda – otraslevye tendencii i prognoz do 2029 goda // Data Bridge Market Research. – URL: https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-automatic-fare-collection-system-market?srsltid=AfmBOoouUr-nKQ5z_ELK0fii4hYSVW7qAFgr2K9TUMD84JnDiFtirY7D (data obrashcheniya: 07.11.2024).
 12. Innovacii v sbore platy za proezd v stranah ASEAN // Southeast Asia Infrastructure. – URL: <https://southeastasiainfra.com/travel-easy-fare-collection-innovations-in-asean-countries-2> (data obrashcheniya: 07.11.2024).
 13. Budushchee obshchestvennogo transporta: vnedrenie reshenij po umnoj prodazhe biletov // DTSis. – URL: <https://dtsis.com/embracing-smart-ticketing-solutions> (data obrashcheniya: 09.11.2024).
 14. ZHudro, M. M. Metodicheskij instrumentarij identifikacii i kolichestvennogo izmereniya vysokotekhnologichnogo biznesa / M. M. ZHudro // Nauchnye trudy Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. – Minsk : BGEU, 2019. – Vyp. 12. – S. 181–187.
 15. Market Challenges Present Opportunities for Sales & Marketing. – URL: <https://www.ttnews.com/articles/market-challenges-present-opportunities-sales-marketing> (data obrashcheniya: 24.03.2025).
 16. Automotive Industry: Trends and reflections. – URL: https://webapps.ilo.org/public/libdoc/ilo/2010/110B09_226_engl.pdf (data obrashcheniya: 10.02.2025).
 17. Oplata proezda passazhirov // Ekspluataciya dorozhnoj seti i intellektual'nye transportnye sistemy. – URL: <https://mo-its.piar.org/en/user-services-electronic-payment-payment-applications/passenger-fare-payment?width=500&height=400&inline=true#reference-sources> (data obrashcheniya: 11.11.2024).
 18. Kak avtomaticheskij sbor platy za proezd mozhet uluchshit' obshchestvennyj transport // Littlepay. – URL: <https://littlepay.com/how-automatic-fare-collection-can-improve-public-transport> (data obrashcheniya: 12.11.2024).
 19. ZHudro, M. K. Mekhatronika kak klyuchevoj drajver formirovaniya gibkih professional'nyh ekonomicheskikh kompetencij / M. K. ZHudro, N. V. // Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike : XXI Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya, Respublika Belarus', Minsk, 23–24 marta 2023 g. / Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet. – Minsk : CHetyre chetverti, 2023. – S. 98–100.
 20. ZHudro, M. K. SMART-marketing 5R (ZHUDRO) inaktivator tradicionnyh marketingovyh kompetencij / M. K. ZHudro, M. M. ZHudro, V. M. ZHudro // Noveye paradigmy razvitiya marketinga v usloviyah transformacii sovremennoj ekonomiki : sbornik nauchnyh statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 60-letiyu osnovaniya universiteta, Gomeľ, 3 oktyabrya 2024 g. / redkol.: T. N. Bajbardina, O. V. Pigunova ; pod nauch. red. T. N. Bajbardinoj. – Gomeľ : Belorusskij torгово-ekonomicheskij universitet potrebitel'skoj kooperacii, 2024. – S. 18–20.
 21. ZHudro, M. K. Metodologicheskie problemy nauchnogo formatirovaniya SMART-ekonomiki / M. K. ZHudro, V. M. ZHudro // Innovacii: ot teorii k praktike : sbornik nauchnyh statej IX Mezhd. nauch.- prakt. konf., Brest, 19–20 oktyabrya 2023 g. : v 2 ch. / Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet ; redkol. : G. B. Medvedeva [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2023. – CH. 2. – S. 23–27.

Материал поступил 26.05.2025, одобрен 30.05.2025, принят к публикации 25.07.2025

УДК 330.45:004.588:519.17

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ГРАФОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ

А. И. Жук¹, Е. Н. Защук², Л. А. Ярмолик³, В. А. Шеина⁴

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

Теория графов играет важную роль в экономике, позволяя анализировать сложные системы и находить оптимальные решения. Она применяется в логистике для оптимизации транспортных маршрутов и минимизации затрат. В рыночных структурах графы помогают моделировать конкуренцию, определять влияние компаний и выявлять ключевых игроков. Финансовые сети используют графовые модели для анализа потоков капитала и оценки системных рисков. В социальных и экономических сетях графы позволяют изучать взаимодействие участников и их влияние на процессы, такие как цепочки поставок или распространение информации. Эти методы делают экономический анализ более точным и помогают принимать эффективные решения.

Решение этих задач очень трудоемко и требует внедрения новых методов, которые будут использовать классические задачи 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. Визуализация данных в системе отличается высокой точностью и возможностью интерактивного взаимодействия, что особенно полезно для исследований и презентаций. Основное внимание уделяется решению и визуализации двух ключевых задач: поиск максимального (минимального) остовного дерева, задача китайского почтальона, где целью является нахождение оптимального маршрута для прохождения всех ребер графа.

Рассматриваются алгоритмы, реализованные в Mathematica, а также визуализация полученных решений, что подчеркивает практическое применение графов в задачах оптимизации.

Ключевые слова: элементы теории графов, минимальное и максимальное остовное дерево, система компьютерной алгебры Wolfram Mathematica, оптимальный маршрут.

MODELING GRAPH THEORY PROBLEMS USING COMPUTER ALGEBRA SYSTEMS

A. I. Zhuk, E. N. Zashchuk, L. A. Yarmolik, V. A. Sheina

Abstract

Graph theory plays an important role in economics, enabling the analysis of complex systems and the discovery of optimal solutions. It is applied in logistics to optimize transportation routes and minimize costs. In market structures, graphs help model competition, determine the influence of companies, and identify key players. Financial networks use graph models to analyze capital flows and assess systemic risks. In social and economic networks, graphs make it possible to study participant interactions and their impact on processes such as supply chains or the spread of information. These methods make economic analysis more precise and help in making effective decisions.

Solving these problems is very labor-intensive and requires the implementation of new methods that use classical graph problems based on computer algebra systems.

This article explores the ways of defining graphs in the symbolic package Mathematica, demonstrating 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 computations, as well as for data visualization and modeling of complex systems. Data visualization in the system is characterized by high accuracy and interactive capabilities, which is especially useful for research and presentations. The main focus is on solving and visualizing two key problems: finding the maximum (or minimum) spanning tree and the Chinese Postman Problem, where the goal is to find the optimal route that traverses all the edges of a graph.

The algorithms implemented in Mathematica are examined, along with the visualization of the resulting solutions, highlighting the practical application of graphs in optimization tasks.

Keywords: elements of graph theory, minimum and maximum spanning tree, computer algebra system Wolfram Mathematica, optimal route.

Введение

Теория графов широко применяется в экономике для моделирования и оптимизации различных процессов [1, 2]. Например, одними из ключевых направлений использования это:

– оптимизация логистики и транспортных маршрутов: графы помогают находить кратчайшие пути и минимизировать затраты на перевозку товаров;

– анализ сетей поставок: графовые модели используются для изучения связей между поставщиками, производителями и потребителями;

– социально-экономические исследования: графовые методы помогают изучать связи между предприятиями, рынками и экономическими агентами;

– оптимизация производственных процессов: графы используются для планирования и управления ресурсами [3, 4].

Методы применения компьютерной алгебры к решению прикладных задач являются активно развивающейся научной отраслью. Так, в работах [5, 6, 7] была проведена компьютерная симуляция задач биологии, в работах [8–11] – моделирование задач гидрологии с помощью систем компьютерной алгебры. Разрабатывается мето-

дическое направление использования систем компьютерной алгебры в преподавании теоретических дисциплин [12–14]. Так используют библиотеку Wolfram Demonstrations Project [15], в которой содержатся готовые разработанные модули, авторами были разработана серия программных модулей для использования их при чтении лекций в университете [16–25].

В современных математических символьных пакетах, таких как Wolfram Mathematica, задание графов осуществляется по средствам мощных алгоритмов и гибких инструментов, обеспечивающих простоту их построения и анализа [15]. Данная статья посвящена исследованию способов представления графов и их построения в этом пакете, что открывает новые возможности для решения задач в области теории графов.

Способы задания графов

В СК Mathematica графы можно задавать различными способами [15]. Одним из таких способов является задание графа с помощью списка ребер, где каждая пара вершин соединена ребром. Функция Graph позволяет изменять цвет, форму и размер вершин, цвет и стиль линии, соединяющей ребра, указывать вес и пропускную способность ребер и отображать их на графе.

Следующая командная строка задает неориентированный граф с 4 вершинами и 4 ребрами $v_1 - v_2$, $v_2 - v_3$, $v_3 - v_1$, $v_4 - v_3$, размер вершин – средний, и название вершин имеет вид $-v_i$:

```
Graph[{1 - 2, 2 - 3, 3 - 1, 4 - 3}, VertexSize -> Medium, VertexLabels -> Table[i -> vi, {i, 4}]]
```

В случае необходимости задания ориентированного графа командная строка примет следующий вид:

```
Graph[{1 -> 2, 2 -> 3, 3 -> 1, 4 -> 3}, VertexSize -> Medium, VertexStyle -> Orange, EdgeStyle -> {1 -> 2 -> Blue, 2 -> 3 -> Dashed}, VertexLabels -> Table[i -> vi, {i, 4}]]
```

Результатом будет вывод на экран графа с 4 вершинами оранжевого цвета, с 4 ориентированными ребрами $v_1 \rightarrow v_2$, $v_2 \rightarrow v_3$, $v_3 \rightarrow v_1$, $v_4 \rightarrow v_3$, где ребро $1 \rightarrow 2$ выделено синим цветом, а ребро $2 \rightarrow 3$ – пунктиром.

Графы можно задать с использованием встроенных функций для создания стандартных графов, таких как полный граф, циклы и деревья: CompleteGraph, CycleGraph, TreeGraph. Так же графы можно импортировать из внешних файлов, таких как файлы формата GraphML или CSV, содержащих информацию о ребрах и вершинах.

Еще один способ задания графа в рассматриваемом символьном пакете – по заданной матрице смежности (AdjacencyGraph) или инцидентности (IncidenceGraph). Матрица смежности графа – квадратная матрица, размерность ее совпадает с количеством вершин графа, элементы матрицы обозначают наличие (1) или отсутствие (0) ребра между соответствующими вершинами. Такое представление используется для ориентированных и неориентированных графов. Авторами был написан программный модуль, который генерирует случайным образом матрицу смежности графа, состоящую из 0 и 1 с помощью функций RandomInteger и MatrixForm по заданному пользователем числу вершин графа. И уже по сгенерированной матрице модуль строит и выводит на экран соответствующий граф и саму матрицу смежности (рисунок 1). Пользователь может менять количество вершин графа в процессе работы модуля. Сам авторский модуль имеет следующий вид:

```
Manipulate[
Module[{vetr},
m=RandomInteger[1,{n,n}];
Grid[{{MatrixForm[m],AdjacencyGraph[m,VertexLabels-
>Table[i->Subscript[v,i],{i,n}]]}},ItemSize-
>{{15,20},15}},
{{n,5,"введите число вершин"},1,7,1,Appearance-
>"Labeled"},
AutorunSequencing->{1},SaveDefinitions-> True].
```

На рисунке 1 представлен результат работы модуля при значении числа вершин $n=5$. На экран выведена квадратная матрица смежности размерности 5×5 и соответствующей этой матрице граф.

Изменение значений опции DirectedEdges -> False позволяет строить неориентированный граф функцией AdjacencyGraph.

Матрица инцидентности для неориентированного графа содержит только 0 и 1, для ориентированного графа 0, 1, -1. Количество строк в матрице инцидентности соответствует числу вершин графа, а количество столбцов – числу ребер. Любая случайная матрица из 0, 1 и -1 не может быть матрицей инцидентности. Матрица инцидентности должна обладать следующими свойствами: каждый столбец матрицы должен соответствовать одному ребру графа и содержать одно значение 1 и одно значение -1 для ориентированного графа и два значения 1 для неориентированных графов, наличие одной 1 означает петлю при соответствующей вершине. Таким образом, возникают сложности при использовании матрицы инцидентности для задания графа случайным образом.

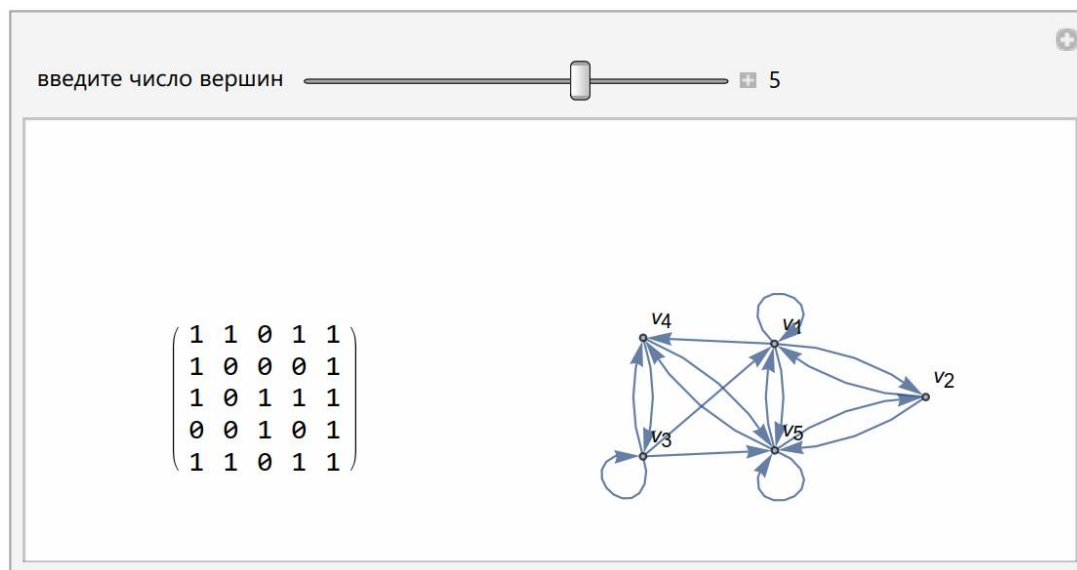


Рисунок 1 – Результат работы программного модуля по построению ориентированного графа по матрице смежности

В пакете предусмотрена встроенная функция RandomGraph, позволяющая строить произвольный граф по количеству ребер и вершин. В этой встроенной в пакет функции есть ряд опций, поз-

воляющий строить ориентированные, неориентированные графы, взвешенные графы и графы с заданной пропускной способностью ребер. Авторами была написана функция:

```
RG[n0_,m0_,p0_] := Module[{n=n0,m=m0,p=p0,style,weight},
style={VertexSize->0.2,ImagePadding->10,ImageSize->{220,220}};
weight=RandomInteger[{1,p},m];
g1=RandomGraph[{n,m},DirectedEdges->
True,VertexSize->Medium,EdgeWeight->weight,style];
ER=EdgeRules[g1];
g3=Graph[g1,EdgeLabels->Table[ER[[i]]->weight[[i]],{i,Length[ER]}],VertexLabels->Table[i-
>Subscript[v, i],{i,VertexCount[g1]}],style];
g3],
```

которая генерирует случайным образом список значений весов ребер (weight) в заданном пользователем диапазоне (p), генерирует случайный граф (g1) по введенным параметрам n (число вершин графа) и m (число ребер графа), формирует новый взвешенный граф (g3), придавая каждому ребру графа g1 соответствующее значение из списка весов weight. Результатом работы данной функции является взвешенный ориентированный граф с введенным пользователем числом вершин, ребер и диапазоном веса ребер.

Следующий программный модуль при нажатии кнопки «новый граф» вызывает функцию RG[n0_,m0_,p0_] с выбранными пользователем параметрами:

```
Manipulate[Module[{style},
style={VertexSize->0.2,ImagePadding->10,ImageSize->{220,220}};g],
{{g,RG[5,6,5]},None},
{{p,5,"диапазон веса ребер p"},1,10,1,Appearance->"Labeled"},
{{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"}],
Button["новый граф",g=RG[n,m,p]],
AutorunSequencing->{3},SaveDefinitions->True].
```

На рисунке 2 виден результат работы модуля при значениях $p=5$ (диапазон веса берет от 1 до 5), $n=5$ (число вершин графа), $m=7$ (число ребер графа).

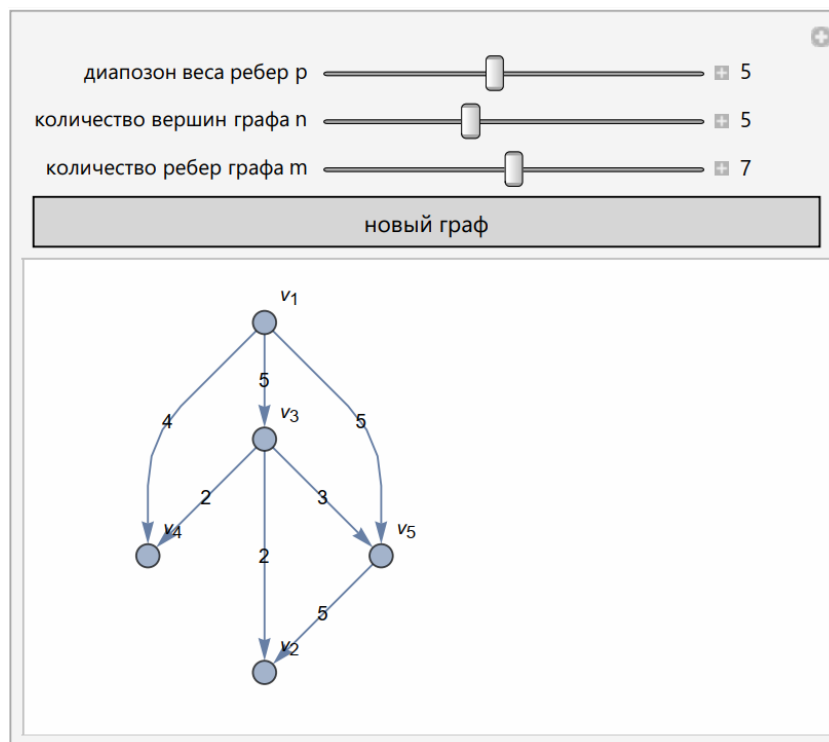


Рисунок 2 – Результат работы программного модуля по построению ориентированного взвешенного графа по заданному числу вершин и ребер

Изменение значений опции DirectedEdges $\rightarrow$ False функции RandomGraph позволяет строить неориентированный граф. Командная строка

```
Control[{{m,4,"количество ребер графа m"},n-1,n (n-1)/2,1,Appearance->"Labeled"}]
```

осуществляет контроль числа ребер графа, по уже введенному числу вершин и не позволяет пользователю ввести значение, при котором граф невозможно построить. При необходимости генерации графа с заданной пропускной способностью ребер следует заменить опцию EdgeWeight $\rightarrow$ weight функции RandomGraph на EdgeCapacity $\rightarrow$ weight.

Поиск минимального и максимального остовного дерева

При изучении элементов теории графов особое внимание уделяется алгоритмам поиска минимального и максимального остовного дерева [1, 26, 27]. Этот алгоритм находит применение в различных областях: он помогает оптимизировать прокладку кабелей или проводов, минимизируя затраты при проектировании локальных сетей или электросетей, он используется для построения эффективных

маршрутов доставки, он может быть использован для определения кластеров в больших наборах данных и др.

Для поиска минимального остовного дерева в системе Mathematica предусмотрена встроенная функция FindSpanningTree. Для поиска максимального остовного дерева также можно использовать эту же функцию, только перед ее применением вес каждого ребра необходимо умножить на -1 . Авторами статьи был написан программный модуль, который реализует в случайно сгенерированном графе поиск максимального или минимального остовного дерева в зависимости от выбора пользователя.

Для генерации взвешенного неориентированного графа случайным образом воспользуемся функцией RG[n0_, m0_, p0_], которая использовалась в предыдущем модуле. Напомним, что эта функция генерирует граф по заданному пользователем числу вершин и ребер с весами ребер в выбранном диапазоне. Для нахождения максимального и минимального остовного дерева были написаны специальные функции, которые выводят на экран первоначальный граф, выделяют в нем соответствующую сеть и вычисляют длину этой сети:

```
FMINST[g0_] := Module[{g = g0},
```

```

style = {VertexSize -> 0.2, VertexLabels -> "Name",
ImagePadding -> 10, ImageSize -> {220, 220}};
g1 = FindSpanningTree[g];
eweight = PropertyValue[{g1, #}, EdgeWeight] & /@
EdgeList[g1];
Grid[
{{g, Column[{Text@
Row[{HighlightGraph[g, g1, GraphHighlightStyle ->
"Thick"}],
Text@Row[{" длина минимальная сети = ",
Total[eweight]}]}]}]}];
FMAXST[g0_] := Module[{g = g0},
style = {VertexSize -> 0.2, VertexLabels -> "Name",
ImagePadding -> 10, ImageSize -> {220, 220}};
eweight = PropertyValue[{g, #}, EdgeWeight] & /@ Edge-
List[g];
g1 = FindSpanningTree[g, EdgeWeight -> -1*eweight];
eweight1 = PropertyValue[{g, #}, EdgeWeight] & /@
EdgeList[g1];
Grid[{{g,
Column[{Text@
Row[{HighlightGraph[g, g1, GraphHighlightStyle ->
"Thick"}],
Text@Row[{" длина максимальная сети = ",
Total[eweight1]}]}]}]}].

```

Сам программный модуль имеет следующий вид:

```

Manipulate[
Module[{ style},
style = {VertexSize -> 0.2, ImagePadding -> 10,
ImageSize -> {220, 220}};
Grid[{Switch[op,
1, {FMINST[g],
2, {FMAXST[g]}]}],
{{g, RG[5, 6, 5]}}, None},
{{p, 5, "диапазон веса ребер p"}, 1, 10, 1, Appearance ->
"Labeled"},
{{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"}],
Button["новый граф", g = RG[n, m, p]],
{{op, 1, "НАЙТИ"}, {1 -> "минимальную сеть ",
Spacer[5],
2 -> "максимальную сеть "}},
AutorunSequencing -> {3}, SaveDefinitions -> True].

```

Рисунок 3 демонстрирует результат работы программного модуля, который выводит на экран сгенерированный взвешенный неориентированный граф с числом вершин $n=7$, числом ребер $m=11$ и диапазоном веса ребер от 1 до $p=9$. В пользовательском окне при нажатии соответствующей кнопки на экране отображается минимальная сеть и ее длина или максимальная сеть и ее длина (рисунок 3).

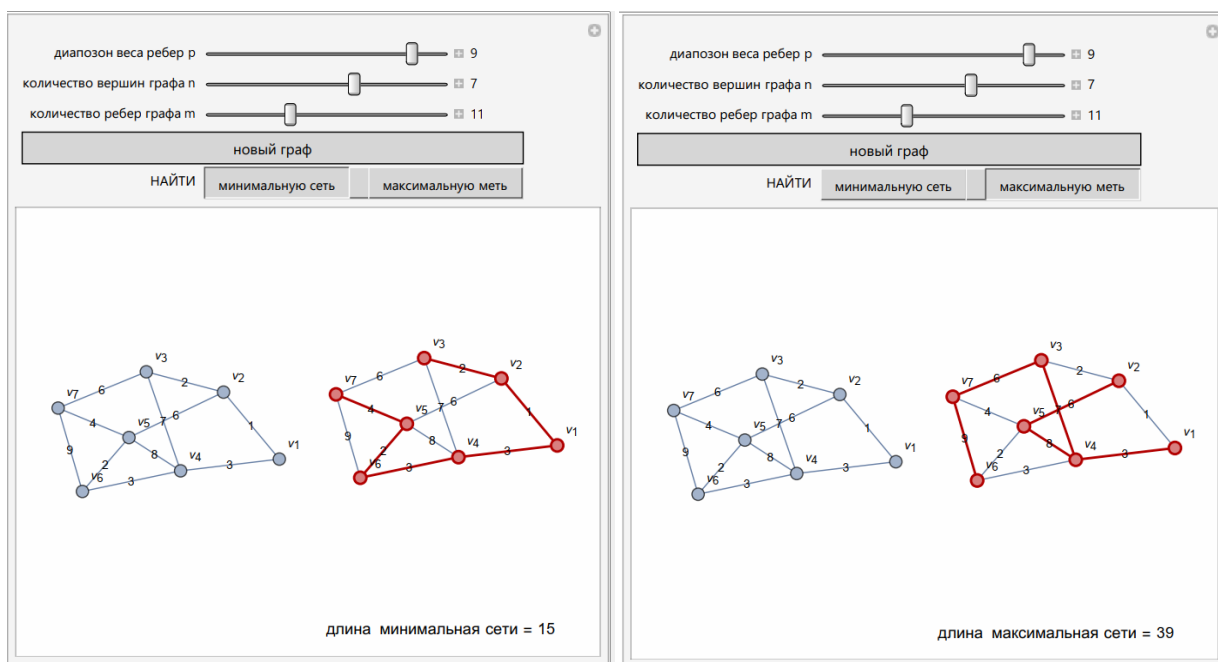


Рисунок 3 – Результат работы программного модуля поиска минимального и максимального остовного дерева в графе

Задача китайского почтальона

Обязательной задачей теории графов является задача китайского почтальона (Chinese Postman Problem). При решении этой задачи требуется найти кратчайший маршрут, который проходит через каждое ребро графа хотя бы один раз. Алгоритм ее решения используется для оптимизации маршрутов доставки почты, инспекции дорог или, например, уборки улиц. Если граф является эйлеровым (имеет цикл, проходящий через каждое ребро один раз), то решение задачи – этот цикл. Если граф не является эйлеровым, то необходимо минимизировать количество повторных проходов по ребрам, чтобы сделать маршрут оптимальным. Для поиска такого маршрута в системе Mathematica предусмотрена встроенная функция FindPostmanTour. Был написан программный модуль, который с использованием анимации выводит на экран один из оптимальных

таких маршрутов в случайном взвешенном неориентированном графе, сам план маршрута и его длину. Программный модуль имеет следующий вид:

```

Manipulate[Module[{ style},
style = {VertexSize -> 0.2, ImagePadding -> 10,
ImageSize -> {220, 220}};
PT = First[FindPostmanTour[g]];
l = Length[PT];
LT = Total[PropertyValue[{g, #}, EdgeWeight] & /@ Edge-
List[PT]];
Grid[{{Column[{Text@
Row[{ListAnimate[
Table[HighlightGraph[g, PT[[1 ;; i]], {i, 0, l}]]],
Text@Row[{" один из возможных маршрутов = ", PT}],

```

Экономика

```
Text@Row[{" длина этого маршрута = ", LT}]]]]],
{{g, RG[5, 6, 5]}, None},
{{p, 5, "диапазон веса ребер p"}, 1, 10, 1, Appearance ->
"Labeled"},
{{n, 5, "количество вершин графа n"}, 2, 10, 1,
Appearance -> "Labeled"},
Control[{{m, 5, "количество ребер графа m"}, n - 1, n
(n - 1)/2, 1,
Appearance -> "Labeled"}],
Button["новый граф", g = RG[n, m, p]],
AutorunSequencing -> {3}, SaveDefinitions -> True]
```

На рисунке 4 продемонстрирован результат работы программного модуля, осуществляющего поиск оптимального маршрута, который позволяет пройти по всем ребрам графа с минимальным общим весом (длиной маршрута). Пользовательский модуль построил взвешенный граф (с диапазоном веса ребер от 1 до $p=5$), число вершин этого графа $n=6$, число ребер – $m=9$. Решение представлено в виде анимации, которая иллюстрирует движение по найденному маршруту, выводится также на экран список соответствующих ребер маршрута $1-6, 6-2, 2-6, 6-3, 3-5, 5-2, 2-3, 3-4, 4-1, 1-2, 2-1$ и его длина 27 ед.

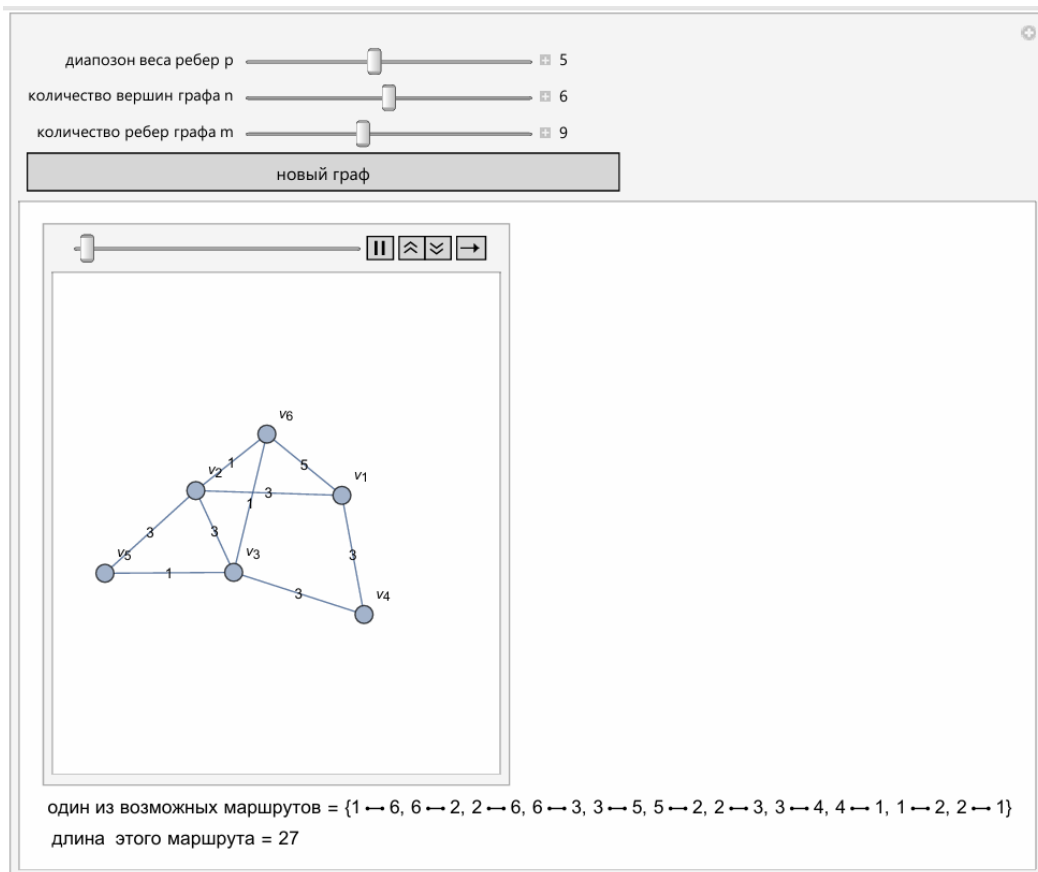


Рисунок 4 – Результат работы программного модуля поиска оптимального маршрута, который позволяет пройти по всем ребрам графа с минимальным общим весом

Заключение

В данной статье была рассмотрена важность графов и их широкие возможности для моделирования решения практических задач с использованием системы Mathematica. Были описаны основные способы задания графов, а также методы визуализации и анализа их структуры. Особое внимание было уделено алгоритмам нахождения максимального и минимального остовного дерева, которые позволяют оптимизировать сеть, минимизируя стоимость или обеспечивая максимальную устойчивость. Кроме того, была успешно решена задача китайского почтальона, демонстрирующая применение теоретико-графовых подходов для маршрутизации в реальных условиях.

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.

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. Карнаухова, А. А. Использование теории графов при решении задач в экономике / А. А. Карнаухова, А. Ф. Долгополова // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3, Ч. 4. – С. 468–469. – URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14128> (дата обращения: 05.05.2025).
3. Меркулова, Ю. В. Теоретико-методологические подходы к моделированию экономических стратегий на основе использования графов / Ю. В. Меркулова // Фундаментальные исследования. – 2022. – № 8. – С. 75–88.
4. Кузьмич, П. М. Расчет календарных планов с вероятностными временными параметрами работ / П. М. Кузьмич, Л. П. Махнист, Н. В. Михайлова // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 1 (79). – С. 139–142.
5. 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.

6. 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.
7. 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 ; Eds.: V. V. Rumiantsev [et al.]. – Siedlce, 2011. – P. 23–24.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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 : БрГУ, 2022. – С. 24.
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, 2016. – Ч. 1. – 62 с.
13. 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.
14. 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.
15. Wolfram Demonstrations Project. – URL: <https://demonstrations.wolfram.com> (date of access: 08.05.2025).
16. 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.
17. Швычкина, Е. Н. Использование математического пакета в лекции «Знакопередающиеся 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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. Головки (гл. ред.) [и др.]. – Брест, 2021. – С. 69–70.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Жук, А. И. Математика / А. И. Жук, Е. Н. Защук, М. С. Климчук. – Брест : Брест. гос. техн. ун-т, 2019. – 44 с.
26. Махнист, Л. П. Эконометрика и экономико-математические методы и модели : практикум / Л. П. Махнист, В. С. Рубанов, И. И. Гладкий. – Брест : Брест. гос. техн. ун-т, 2016. – 82 с.
27. Юхимук, Т. Ю. Математическое программирование / Т. Ю. Юхимук, М. М. Юхимук, Л. П. Махнист. – Брест : Брест. гос. техн. ун-т, 2024. – 55 с.

References

1. Lekcii po teorii grafov / V. A. Emelichev, O. I. Mel'nikov, V. I. Sarvanov [i dr.]. – M. : Nauka, 1990. – 390 s.
2. Kamauhova, A. A. Ispolzovanie teorii grafov pri reshenii zadach v ekonomike / A. A. Kamauhova, A. F. Dolgopola // *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik*. – 2015. – № 3, CH. 4. – S. 468–469. – URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14128> (data obrashcheniya: 05.05.2025).
3. Merkulovala, YU. V. Teoretiko-metodologicheskie podhody k modelirovaniyu ekonomicheskikh strategij na osnove ispol'zovaniya grafov / YU. V. Merkulovala // *Fundamental'nye issledovaniya*. – 2022. – № 8. – S. 75–88.
4. Kuz'mich, P. M. Raschet kalendarnyh planov s veroyatnostnymi vremennymi parametrami rabot / P. M. Kuz'mich, L. P. Mahnist, N. V. Mihajlova // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. – 2013. – № 1 (79). – S. 139–142.

5. CHichurin, A. V. Komp'yuternoe modelirovanie dvuh modelej hemostata dlya odnogo pitatel'nogo re-sursa / A. V. CHichurin, E. N. SHvychkina // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo univer-siteta. Seriya: Fizika, matematika, informatika. – 2013. – № 5 (83). – S. 9–14.
6. 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.
7. 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; Eds.: V. V. Rumiantsev [et al.]. – Siedlce, 2011. – P. 23–24.
8. Mahnist, L. P. Primenenie sistem komp'yuternoj algebry pri reshenii modeli stohasticheskoy gidrologii / L. P. Mahnist, E. N. Zashchuk, I. I. Gladkij // Matematicheskie i fizicheskie metody issledovaniy: 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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 : BrGU, 2022. – S. 24.
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 : Belarus. gos. un-t, 2016. – CH. 1. – 62 s.
13. 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 : Belarus. gos. un-t, 2017. – CH. 2. – 60 s.
14. 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 : Belarus. gos. un-t, 2017. – CH. 3. – 68 s.
15. Wolfram Demonstrations Project. – URL: <https://demonstrations.wolfram.com> (date of access: 08.05.2025).
16. SHvychkina, E. N. Ispol'zovanie SKA Mathematica pri matematicheskoy podgotovke studentov v tekhnicheskoy 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.
17. SHvychkina, E. N. Ispol'zovanie matematicheskogo paketa v lekciy «Znakocheduyushchiesya 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. Matsytska. – Brest, 2016. – S. 148–149.
18. Zashchuk, E. N. Ispol'zovanie matematicheskogo paketa v lekciy «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.
19. Zashchuk, E. N. Komp'yuternaya vizualizatsiya tel vrashcheniya na lekciyah dlya studentov tekhnicheskikh special'nostej / E. N. Zashchuk, A. I. ZHuk // Matematicheskie i fizicheskie metody issledovaniy: 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.
20. Zashchuk, E. N. Modelirovanie «Polyarnoy 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 uchenykh 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.
21. Zashchuk, E. N. Komp'yuternaya vizualizatsiya trekhmernykh 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.
22. Zashchuk, E. N. Ispol'zovanie metodov komp'yuternoj algebry v lekciyah «Predel chislovoj posledovatel'nosti i funkciy» / E. N. Zashchuk, A. I. ZHuk, L. P. Mahnist // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2023. – № 1 (130). – S. 125–128.
23. Zashchuk, E. N. Vychislitel'naya vizualizatsiya 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.
24. Zashchuk, E. N. Vychislitel'naya vizualizatsiya opredelenij krivykh vtorogo porjadka / 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.
25. ZHuk, A. I. Matematika / A. I. ZHuk, E. N. Zashchuk, M. S. Klimchuk. – Brest : Brest. gos. tekhn. un-t, 2019. – 44 s.
26. Mahnist, L. P. Ekonometrika i ekonomiko-matematicheskie metody i modeli : praktikum / L. P. Mahnist, V. S. Rubanov, I. I. Gladkij. – Brest : Brest. gos. tekhn. un-t, 2016. – 82 s.
27. YUhimuk, T. YU. Matematicheskoe programmirovaniye / T. YU. YUhimuk, M. M. YUhimuk, L. P. Mahnist. – Brest : Brest. gos. tekhn. un-t, 2024. – 55 s.

Материал поступил 05.05.2025, одобрен 29.05.2025, принят к публикации 29.05.2025

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ТРАНСГРАНИЧНОГО РЕГИОНА

В. В. Зазерская

*К. э. н., доцент, декан экономического факультета, УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь, e-mail: zazerskaya@mail.ru*

Реферат

Эффективная система управления экономическим потенциалом территории повышает качество управления на региональном уровне и стимулирует рост конкурентоспособности регионов. В условиях быстро меняющейся среды актуальным становится вопрос оценки и внедрения новых подходов к развитию экономического потенциала трансграничных регионов. Эти подходы должны способствовать выявлению и использованию внутренних резервов для экономического роста, а также максимально эффективно использовать выгоды от интеграционных и трансграничных связей. Отсутствие научно обоснованных экономических методов для анализа и оценки формирования и использования экономических ресурсов тормозит инвестиционную, инновационную и потребительскую активность, что, в свою очередь, замедляет темпы экономического развития. Актуальность исследования теоретико-методологических и практических подходов к управлению развитием трансграничных регионов обусловлена необходимостью адаптации их целей и задач к меняющимся геополитическим реалиям, эффективному использованию транзитного потенциала, развитию транспортной инфраструктуры и совершенствованию механизмов рационального освоения экономического потенциала региона. Все эти причины указывают на актуальность дальнейшего исследования экономического потенциала трансграничного региона, механизма его функционирования, разработки на этой базе системы управленческих решений, направленных на эффективное формирование и использование экономического потенциала. В результате исследования представлен методический подход к оценке экономического потенциала трансграничного региона. Алгоритм оценки уровня экономического потенциала трансграничного региона включает восемь этапов. Были отобраны 73 показателя, характеризующих развитие трансграничный экономический коридор развития. Выбранные показатели в последующем были объединены в восемь блоков. В методике применяется статико-динамический подход для анализа экономического потенциала в зависимости от продолжительности периода изучения состояния объекта. На заключительном этапе расчет интегрального показателя проводился по методу агрегирования по средней геометрической. Для корректного понимания результатов установлены пороговые значения уровня экономического потенциала. В работе представлен расчет уровня экономического потенциала трансграничного экономического коридора развития за период 2013–2023 гг. Экономическое развитие, которое трансграничный экономический коридор развития придает территории, положительно влияет на динамику ВВП.

Ключевые слова: экономический потенциал, трансграничное сотрудничество, трансграничный регион, трансграничный экономический коридор развития, социально-экономическое развитие, методика, оценка.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE LEVEL OF ECONOMIC POTENTIAL OF A CROSS-BORDER REGION

V. V. Zazerskaya

Abstract

An effective system for managing the economic potential of a territory improves the quality of management at the regional level and stimulates the growth of competitiveness of regions. In a rapidly changing environment, the issue of assessing and implementing new approaches to the development of the economic potential of cross-border regions is becoming relevant. These approaches should help identify and use internal reserves for economic growth, as well as make the most of the benefits of integration and cross-border relations. The lack of scientifically sound economic methods for analyzing and assessing the formation and use of economic resources inhibits investment, innovation and consumer activity, which, in turn, slows down the pace of economic development. The relevance of the study of theoretical, methodological and practical approaches to managing the development of cross-border regions is due to the need to adapt their goals and objectives to changing geopolitical realities, efficient use of transit potential, development of transport infrastructure and improvement of mechanisms for the rational development of the region's economic potential. All these reasons indicate the relevance of further study of the economic potential of the cross-border region, the mechanism of its functioning, development on this basis of a system of management decisions aimed at the effective formation and use of economic potential. As a result of the study, a methodological approach to assessing the economic potential of the cross-border region is presented. The algorithm for assessing the level of economic potential of the cross-border region includes 8 stages. 73 indicators characterizing the development of the cross-border economic development corridor were selected. The selected indicators were subsequently combined into eight blocks. The methodology uses a static-dynamic approach to analyze the economic potential depending on the duration of the period of studying the state of the object. At the final stage, the calculation of the integral indicator was carried out using the aggregation method by the geometric mean. For a correct understanding of the results, threshold values of the level of economic potential are set. The paper presents the calculation of the level of economic potential of the cross-border economic development corridor for the period 2013–2023. Economic development, which the cross-border economic development corridor gives to the territory, has a positive effect on the dynamics of GDP.

Keywords: economic potential, cross-border cooperation, cross-border region, cross-border economic development corridor, socio-economic development, methodology, assessment.

Введение

В настоящее время приоритетными направлениями государственной политики Республики Беларусь является увеличение ВВП, повышение уровня жизни населения, укрепление демографического потенциала, развитие цифровой экономики и проактивная внешнеэкономическая политика [1]. В целях разработки эффективной региональной политики следует провести адекватную оценку уровня социально-экономического развития регионов, выявить их особенности, ключевые факторы экономического

роста, а также провести анализ эффективности использования экономического потенциала региона. Под влиянием процессов глобализации и локализации экономика трансграничных регионов развивается как сложное полисистемное образование. При этом локальные пространства трансграничных регионов находятся в поиске оптимальных способов интегрирования в глобальные процессы. На развитие трансграничных пространств оказывают влияние внешнеэкономическая деятельность, состояние инфраструктуры, транзитный потенциал [2].

Интенсификация внешнеторговых связей, влияние транзитных функций на производственный и инновационный базис экономики белорусских регионов способствуют формированию трансграничной территории макроуровня – трансграничный экономический коридор развития [3].

Трансграничные территории, с их природными и экономическими взаимосвязями, представляют собой сложные геопропространственные образования, функционирующие как единые системы. Для полноценного понимания механизмов их функционирования необходим всесторонний подход, включающий экологические, экономические, политические и социальные аспекты. Изучение основных явлений и пропорций, существующих в трансграничной региональной экономической системе, закономерно ставит задачу комплексного исследования геоэкономического аспекта потенциала данной системы. Пространственное положение трансграничного экономического коридора по отношению к внешним объектам определяется совокупностью трёх групп факторов:

1. Внутренние факторы, к которым относятся природные ресурсы, состояние инфраструктуры, уровень профессиональной подготовки рабочей силы, особенности институциональной среды и степень государственного вмешательства. Эти элементы определяют возможности региона для развития и его инвестиционную привлекательность [4].

2. Внешние факторы, такие как политическая обстановка в окружающем регионе, экономическая стратегия соседних государств, глобальные экономические тенденции, наличие международных торговых соглашений и транспортных маршрутов. Они могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на развитие региона [4].

3. Интеграционные факторы, соединяющие внутренние и внешние условия, включают способность региона участвовать в мировых экономических процессах, уровень его конкурентоспособности на глобальных рынках, развитие трансграничных связей и эффективность использования внешних ресурсов.

Особо важно учитывать изменения во внешних связях трансграничного региона. Его поступательное развитие напрямую связано с умением выстраивать продуктивное международное сотрудничество, быстро адаптироваться к внешним изменениям и оказывать влияние на процессы в региональной политике.

Методологические аспекты анализа и оценки уровня экономического потенциала трансграничного региона

Уровень экономического потенциала трансграничного региона отражает инновационный и производственный базис, благосостояние и качество жизни населения, инвестиционную привлекательность, качество управления регионом, институциональную среду, особенности трансграничного сотрудничества. Анализ экономического развития регионов в нашем исследовании основывается на использовании системы статистических показателей, которые характеризуют основные явления и пропорции, существующие в региональной экономической системе. Комплексный подход позволяет объективно оценить социально-экономическое положение в трансграничном регионе и основные пути его дальнейшего развития. Основные задачи комплексного анализа:

- а) выявление ситуационных факторов и количественное измерение их влияния на положение объекта анализа;
- б) оценка реального состояния анализируемого объекта, а также выявление и измерение основных тенденций его развития;
- в) исследование эффективности хозяйственной деятельности и определение привлекательности социально-экономических условий ведения бизнеса и комфортности проживания населения объекта, выявление проблемных с точки зрения экономического развития суб-потенциалов и определение частных индикаторов, имеющие определяющее значение в снижении уровня экономического потенциала;
- г) обоснование оптимальных управленческих решений, направленных на повышение эффективности экономической политики и управления регионом;
- д) решение частных задач в рамках исследования трансграничного региона может включать, например, выявление территориальных и видовых особенностей формирования валового регио-

нального продукта в современных условиях, анализ ретроспективных и структурных тенденций развития, оценку уровня развития социальной, инновационной, интеграционной сфер, а также инфраструктуры, цифрового и институционального потенциала.

Оценка достигнутого уровня экономического развития трансграничного региона, как правило, опирается на показатели деятельности организаций в таких отраслях, как промышленность, сельское хозяйство, строительство и сфера услуг. Эти данные играют ключевую роль при определении стратегических целей регионального развития в условиях рыночной конкуренции за ресурсы. Кроме того, они способствуют оптимизации межрегиональных связей и позволяют более точно оценивать экспортный потенциал регионального производства.

Методологические аспекты анализа и оценки социально-экономического развития региона получили широкое освещение как в зарубежной, так и в отечественной научной литературе. Среди иностранных исследователей, внёсших вклад в развитие этой тематики, можно отметить таких авторов, как Н. В. Агабекова, Н. В. Глушак, Е. В. Добрынин, Р. Камани, Г. Марковиц, Ф. Модильяни, Ф. Найт, Н. К. Нурланова, А. К. Омаров, Г. П. Полякова Д. Рикардо, А. Смит, Э. С. Бурак, Л. Дж. Сэвидж, В. Феодоритов, М. Фридман, Дж. Хикс, А. Шахназаров и др. [5–8].

Значительный вклад внесён также такими исследователями, как Н. Богдан, В. Борисевич, П. Гейзлер, Т. Вертинская, Е. Дорина, Л. Козловская, М. Ковалёв, Н. Нехорошева, И. Русак, В. Фатеев и др. [9–12]. Анализ научных подходов показывает, что существующие методики оценки развития региона используют как интегральные, так и частные показатели, отражающие различные аспекты социально-экономического состояния территории [13–15]. К ним относятся: показатели, характеризующие экономическую, финансовую сферу, уровень и качество жизни населения, уровень развития и ресурсы региона, производство, услуги, финансы, внешнеэкономические связи регионов.

Алгоритм оценки уровня экономического потенциала трансграничного региона

Проанализировав существующие методические подходы к оценке социально-экономического развития региона, предложена методика оценки уровня экономического потенциала трансграничного региона, отвечающая требованиям Концепции Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2026–2030 годы и Программе деятельности Правительства Республики Беларусь на 2025–2029 годы, согласно которым основными составляющими социально-экономического развития являются повышение устойчивости экономики, развитие человеческого потенциала, новые стандарты качества жизни, продвижение цифровых технологий, реализация потенциала каждого региона, развитие экспортного потенциала [16]. На рисунке 1 представлен алгоритм интегрированной оценки экономического потенциала.

Были отобраны 73 показателя, характеризующих развитие трансграничный экономический коридор развития. Выбранные показатели в последующем были объединены в восемь блоков:

- 1) экономический потенциал:
 - а) показатели развития;
 - б) производственно-финансовые показатели;
 - с) потребительские показатели;
 - д) трудовые показатели.
- 2) Социальный потенциал:
 - а) инклюзивность;
 - б) демографические показатели;
 - с) социальная инфраструктура.
- 3) Инфраструктурный потенциал.
- 4) Инновационный потенциал.
- 5) Интеграционный потенциал.
- 6) Транзитный потенциал.
- 7) Потенциал цифрового развития.
- 8) Институциональный потенциал:
 - а) уровень развития бизнеса;
 - б) уровень развития управления;
 - с) уровень социального развития.



Рисунок 1 – Алгоритм оценки уровня экономического потенциала трансграничного региона

В методике применяется статико-динамический подход для анализа экономического потенциала в зависимости от продолжительности периода изучения состояния объекта. Статичный подход будет использоваться для оценки уровня экономического потенциала в определенный момент времени, когда отсутствуют радикальные структурные и институциональные сдвиги и социально-экономическая система региона является устойчивой и сбалансированной. Системная динамика отражает «тенденции развития экономического явления» [17]. Во-первых, «хозяйственный объект должен рассматриваться как целостная динамическая система, обладающая ярко выраженными эмерджентными свойствами (результативность, эффективность, устойчивость, продуктивность)» [18]. Научным инструментарием экономического анализа выступает приём построения нормативной (эталонной) динамики развития организации. В своей работе В. В. Ковалев, О. Н. Волкова [19] рассматривают метод нормативной системы значений показателей/эталонной динамики состояния субъекта. «В данном методе динамика каждого показателя определяется как темп его роста. Нормативная система

значений показателей представляет собой эталонную динамику состояния предприятия, понимаемую как наилучшее распределение всех показателей, характеризующих это состояние по темпам их роста» [19]. Также динамический анализ, как отмечал А. С. Тонких, позволяет использовать различные показатели [20]. Поскольку используемые показатели имеют разные единицы измерения, предложенный алгоритм оценки предполагает приведение данных к сопоставимому виду с учетом направленности индикаторов.

Полученные 73 частных индекса были объединены в субиндексы по каждому из восьми блоков. На заключительном этапе расчет интегрального показателя проводился по методу агрегирования по средней геометрической [21].

Финальной стадией оценки станет интерпретация комплексной оценки экономического развития трансграничного региона. Для корректного понимания результатов необходимо установить пороговые значения уровня экономического потенциала (таблица 1).

Расчет уровня экономического потенциала трансграничного экономического коридора развития за период отражен в таблице 2.

Таблица 1 – Уровни экономического потенциала трансграничного региона

Уровень потенциала	Интервал значений	Интерпретация интегральной оценки уровня развития ЭП
Низкий	0,1–0,28	Неустойчивое, несбалансированное состояние региона, предкризисное состояние
Ниже среднего	0,29–0,46	Частичная сбалансированность, нарушен паритет между подсистемами региона. Наблюдается ассиметричное развитие
Средний	0,47–0,64	Устойчивое / с некоторыми признаками неустойчивого развития. Есть признаки ассиметричного развития
Высокий	0,65–0,82	Постоянное развитие подсистем региона с учётом их согласованного взаимодействия, дающего синергетический эффект для обеспечения динамической стабильности региона
Очень высокий	0,83–1	Сбалансированное, устойчивое, динамичное развитие, эффективное использование ресурсов и возможностей

Примечание – Источник: собственная разработка.

Таблица 2 – Динамика уровня экономического потенциала трансграничного экономического коридора развития

Субпотенциал	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Экономический потенциал	80,9	80,7	73,3	84,6	85,9	80,7	83,7	76,7	85,0	77,6	82,1
Социальный потенциал	105,6	103,0	101,5	99,3	98,5	101,7	102,5	103,2	103,1	104,2	106,5
Инфраструктурный потенциал	135,8	138,6	140,7	127,7	129,7	130,3	129,7	118,4	134,1	120,5	158,6
Инновационный потенциал	45,50	44,23	44,40	45,90	46,37	48,06	48,04	46,91	50,17	49,10	64,27
Интеграционный потенциал	97,9	100,1	87,8	94,4	105,1	110,9	106,3	83,4	109,6	88,6	106,0
Транзитный потенциал	98,7	284,3	184,1	114,9	113,2	59,6	109,0	108,9	92,8	–	–
Потенциал цифрового развития	79,0	80,4	67,1	69,5	72,1	74,5	77,0	78,7	80,7	81,6	64,1
Институциональный потенциал	72,7	70,6	69,0	68,0	70,5	72,6	72,0	74,5	73,9	74,3	50,9
Интегральный показатель	85,76	97,59	87,64	84,19	86,30	80,91	87,50	83,41	87,94	82,35	84,53
Уровень ЭПТР	ОВ	ОВ	ОВ	ОВ	ОВ	В	ОВ	ОВ	ОВ	ОВ	ОВ

Расчеты показали, что за исследуемый период уровень ЭПТР характеризуется как очень высокий. Экономическое развитие, которое придает трансграничный экономический коридор развития территории, положительно влияет на динамику ВВП.

Проведенные расчеты отражают существенные различия в развитии потенциальных возможностей трансграничного региона. Изменение каждой компоненты потенциала имеет разную динамику, что свидетельствует о резервах для наращивания потенциала. Так, увеличение активности в социальной, инфраструктурной, интеграционной сферах соответствует направлениям государственной поддержки, а эффективность использования и управления экономическим потенциалом раскрывает экономический и институциональный потенциал. За рассматриваемый период драйверами роста экономического потенциала выступали показатели субпотенциала «Показатели развития», а именно индекс объема промышленного производства и индекс роста основных средств, а также показатели, характеризующие товарное обращение. О росте благосостояния населения свидетельствует рост показателей инклюзивности. На рост ВВП положительно повлияла и динамика показателей инфраструктурного субпотенциала – индекс фондонасыщенности территории, плотность автомобильных дорог общего пользования с твердым покрытием, километров в расчете на 1 000 квадратных километров территории; институционального субпотенциала – удельный вес выручки от реализации продукции, товаров, работ, услуг субъектов МСП в общей выручке от реализации продукции, товаров, работ, услуг организаций, уровень инфляции, темп роста количества граждан, получивших жилье и улучшивших жилищные условия; интеграционного субпотенциала – коэффициент покрытия экспортом импорта, индекс числа прибывших лиц по территории Республики Беларусь.

В то же время замедление роста некоторых показателей, отрицательная динамика показателей трудового, производственно-финансового инновационного субпотенциалов негативно влияют на развитие трансграничных территорий.

Заключение

К основным достоинствам предлагаемой нами методики оценки уровня экономического потенциала трансграничного региона можно отнести:

- 1) удобство сравнения уровня экономического потенциала в определенные моменты времени и с учетом протекающих тенденций;
- 2) широкий охват критериев экономического развития;
- 3) ориентация на особенности и условия социально-экономического развития трансграничного региона.

Научная новизна методики заключается в разработке организационно-экономического инструментария для оценки реализации экономического потенциала, базирующегося на статико-динамическом подходе, включающем в себя обоснование предложенной системы критериев, компонентов экономического потенциала, формирование системы показателей его оценки, поэтапного алгоритма оценочной процедуры и направленного на выявление и оценку эффекта, который возникает при взаимодействии отдельных компонентов потенциала за счет внутренней динамики развития региона, интеграционного влияния и трансграничного сотрудничества.

Список цитированных источников

1. Об утверждении Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы : Указ Президента Республики Беларусь от 29 июля 2021 г. № 292 : текст по состоянию на 1 апр. 2025 г. // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь : информ.-поисковая система (дата обращения: 23.03.2025).
2. Зазерская, В. В. Концептуальные подходы к интеграции трансграничных регионов. – URL: http://edoc.bseu.by:8080/bitstream/edoc/98620/1/Zazerskaya_83_84.pdf (дата обращения: 23.03.2025).
3. Зазерская, В. В. Трансграничная регионализация: типология регионов и пространственное планирование / В. В. Зазерская // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D. – 2023. – № 3. – С. 28–34.
4. Чувилова, О. Н. Система показателей оценки геоэкономического потенциала региона / О. Н. Чувилова // Экономический анализ: теория и практика. – 2008. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-pokazateley-otsenki-geoekonomicheskogo-potentsiala-regiona> (дата обращения: 11.03.2025).
5. Потенциал устойчивого инновационного развития региона: концепция и практика многоаспектной оценки / Н. В. Агабекова, Л. А. Сошникова, С. Ю. Высоцкий [и др.]. – Минск : Белорусский государственный аграрный технический университет, 2021. – 202, [1] с.
6. Нурланова, Н. К. Методология оценки экономического потенциала приграничных районов и рекомендации по его использованию (на примере Алматинской области) / Н. К. Нурланова, А. К. Омаров // Economy: strategy and practice. – 2020. – № 15 (2). – С. 29–42.
7. Полякова, Г. П. Экономический потенциал региона как фактор устойчивого развития: методы измерения и диагностики: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. экон. наук: специальность 08.00.05 Экономика и управление народным хозяйством (региональная экономика) / Полякова Галина Петровна. – Иваново, 2013. – 22 с.
8. Сарышахин, Э. Б. Экономические проблемы использования ресурсного потенциала прибрежного региона трансграничного типа: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. экон. наук: специальность 08.00.05 Экономика и управление народным хозяйством / Сарышахин Эшреф Бурак. – Санкт-Петербург, 2014. – 17 с.
9. Вертинская, Т. С. Методические основы разработки комплекса индикаторов для оценки экономической интеграции регионов стран – членов ЕЭП / Т. С. Вертинская // Евразийская экономическая интеграция. – 2013. – № 2 (19). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-osnovy-razrabotki-kompleksa-indikatorov-dlya-otsenki-ekonomicheskoy-integratsii-regionov-stran-chlenov-eeep> (дата обращения: 11.07.2025).
10. Русак, И. Н. Методологические основы диагностики регионального развития в сфере аналитической деятельности / И. Н. Русак. – URL: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/323186/1/%D0%A0%D1%83%D1%81%D0%B0%D0%BA_%D0%9D%D0%A2_24_%D0%A4%D0%93_2-286-296.pdf (дата обращения: 10.04.2025).
11. Фатеев, В. С. Социальные инновации и их роль в развитии регионов и городов / В. С. Фатеев, Т. Тамошюнас // Экономический рост Республики Беларусь: глобализация, инновационность, устойчивость: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 17 мая 2018 г. / редкол.: В. Н. Шимов (отв. ред.) [и др.]; М-во образования Респ. Беларусь, УО «Белорусский гос. экон. ун-т». – Минск : БГЭУ, 2018. – С. 492–493.
12. Полоник, С. С. Интегрированная оценка уровня экологического состояния и его влияние на социально-экономическое развитие Республики Беларусь / С. С. Полоник, Э. В. Хоробрых, А. А. Литвинчук // Экономічний вісник університету. – 2018. – Вип. 36(1). – С. 94–103.
13. Есжанова, Ж. Ж. Экономический потенциал регионов Казахстана: методика, сравнительный анализ и рейтинговая оценка / Ж. Ж. Есжанова, М. А. Каликов, Т. Е. Абдыкадыр // Economy: strategy and practice. – 2023. – № 18 (2). – С. 187–203. – DOI: 10.51176/1997-9967-2023-2-187-203.
14. Виноградова, К. О. Сущность и структура потенциала развития региона / К. О. Виноградова, О. А. Ломовцева // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9620> (дата обращения: 11.03.2025).
15. Белоусова, И. В. Подходы к оценке совокупного экономического потенциала национальной экономики / И. В. Белоусова, О. В. Григоренко // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2019. – № 3–1. – С. 10–15.
16. Программа деятельности Правительства Республики Беларусь на 2025–2029 годы одобрена на заседании Палаты представителей. – URL: <https://pravo.by/novosti/obshchestvenno-politicheskie-i-v-oblasti-prava/2025/maj/88629> (дата обращения: 23.03.2025).

17. Кондрашова, Н. В. Прием динамических нормативов в финансово-экономическом анализе развития организации / Н. В. Кондрашова, К. Н. Васильева, А. В. Кривошеев // Современная экономика: проблемы и решения. – 2021. – № 5 (137). – С. 109.
18. Парфенова, В. Е. Факторный анализ хозяйственной деятельности предприятия на основе динамического норматива / В. Е. Парфенова // Известия СПбГАУ. – 2016. – № 44. – С. 142.
19. Ковалев, В. В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия: учебник / В. В. Ковалев, О. Н. Волкова. – М. : ТК Велби, Изд-во Проспект, 2004. – С. 412–415.
20. Тонких, А. С. Формирование эталонной динамики развития как основа выявления слабых мест в финансовой деятельности предприятия / А. С. Тонких // Финансы и кредит. – 2005. – № 21 (189). – С. 46–54.
21. Zazerskaya, V. V. Method of integrated assessment of the level of economic potential of a cross-border region / V. V. Zazerskaya // Vestnik of Brest State Technical University. – 2024. – No. 3(135). – P. 156–159.
10. Rusak, I. N. Metodologicheskie osnovy diagnostiki regional'nogo razvitiya v sfere analiticheskoy deyatel'nosti / I. N. Rusak. – URL: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/323186/1/%D0%A0%D1%83%D1%81%D0%B0%D0%BA_%D0%9D%D0%A2_24_%D0%A4%D0%93_2-286-296.pdf (data obrashcheniya: 10.04.2025).
11. Fateev, V. S. Social'nye innovacii i ih rol' v razvitii regionov i gorodov / V. S. Fateev, T. Tamoshynas // Ekonomicheskij rost Respubliki Belarus': globalizaciya, innovacionnost', ustojchivost': materialy XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 17 maya 2018 g. / redkol.: V. N. SHimov (otv. red.) [i dr.]; M-vo obrazovaniya Resp. Belarus', UO «Belorusskij gos. ekon. un-t». – Minsk : BGEU, 2018. – S. 492–493.
12. Polonik, S. S. Integrirovannaya ocenka urovnya ekologicheskogo sostoyaniya i ego vliyanie na social'no-ekonomicheskoe razvitiye Respubliki Belarus' / S. S. Polonik, E. V. Horobryh, A. A. Litvinchuk // Ekonomichnij visnik universitetu. – 2018. – Vip. 36(1). – S. 94–103.
13. Eszhanova, ZH. ZH. Ekonomicheskij potencial regionov Kazahstana: metodika, sravnitel'nyj analiz i rejtingovaya ocenka / ZH. ZH. Eszhanova, M. A. Kalikov, T. E. Abdykadyr // Economy: strategy and practice. – 2023. – № 18 (2). – S. 187–203. – DOI: 10.51176/1997-9967-2023-2-187-203.
14. Vinogradova, K. O. Sushchnost' i struktura potentsiala razvitiya regiona / K. O. Vinogradova, O. A. Lomovceva // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2013. – № 3. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9620> (data obrashcheniya: 11.03.2025).
15. Belousova, I. V. Podhody k ocenke sovopnogo ekonomicheskogo potentsiala nacional'noj ekonomiki / I. V. Belousova, O. V. Grigorenko // Vestnik Altajskoj akademii ekonomiki i prava. – 2019. – № 3–1. – S. 10–15.
16. Programma deyatel'nosti Pravitel'stva Respubliki Belarus' na 2025–2029 gody odobrena na zasedanii Palaty predstavitelej. – URL: <https://pravo.by/novosti/obshchestvenno-politicheskie-i-v-oblasti-prava/2025/maj/88629> (data obrashcheniya: 23.03.2025).
17. Kondrashova, N. V. Priem dinamicheskikh normativov v finansovo-ekonomicheskom analize razvitiya organizacii / N. V. Kondrashova, K. N. Vasil'eva, A. V. Krivosheev // Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya. – 2021. – № 5 (137). – S. 109.
18. Parfenova, V. E. Faktornyj analiz hozyajstvennoj deyatel'nosti predpriyatiya na osnove dinamicheskogo normativa / V. E. Parfenova // Izvestiya SPbGAU. – 2016. – № 44. – S. 142.
19. Kovalev, V. V. Analiz hozyajstvennoj deyatel'nosti predpriyatiya: uchebnik / V. V. Kovalev, O. N. Volkova. – M. : TK Velbi, Izd-vo Prospekt, 2004. – S. 412–415.
20. Tonkih, A. S. Formirovanie etalonnoj dinamiki razvitiya kak osnova vyyavleniya slabых мест v finansovoj deyatel'nosti predpriyatiya / A. S. Tonkih // Finansy i kredit. – 2005. – № 21 (189). – S. 46–54.
21. Zazerskaya, V. V. Method of integrated assessment of the level of economic potential of a cross-border region / V. V. Zazerskaya // Vestnik of Brest State Technical University. – 2024. – No. 3(135). – P. 156–159.

References

1. Ob utverzhdenii Programmy social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na 2021–2025 gody : Ukaz Prezidenta Respubliki Belarus' ot 29 iyulya 2021 g. № 292 : tekst po sostoyaniyu na 1 apr. 2025 g. // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus' : inform.-poiskovaya sistema (data obrashcheniya: 23.03.2025).
2. Zazerskaya, V. V. Konceptual'nye podhody k integracii transgranichnyh regionov. – URL: http://edoc.bseu.by:8080/bitstream/edoc/98620/1/Zazerskaya_83_84.pdf (data obrashcheniya: 23.03.2025).
3. Zazerskaya, V. V. Transgranichnaya regionalizaciya: tipologiya regionov i prostranstvennoe planirovanie / V. V. Zazerskaya // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya D. – 2023. – № 3. – S. 28–34.
4. CHuvilova, O. N. Sistema pokazatelej ocenki geoeconomicheskogo potentsiala regiona / O. N. CHuvilova // Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika. – 2008. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-pokazateley-otsenki-geoeconomicheskogo-potentsiala-regiona> (data obrashcheniya: 11.03.2025).
5. Potencial ustojchivogo innovacionnogo razvitiya regiona: koncepciya i praktika mnogoaspektnoj ocenki / N. V. Agabekova, L. A. Soshnikova, S. YU. Vysockij [i dr.]. – Minsk : Belorusskij gosudarstvennyj agrarnyj tekhnicheskij universitet, 2021. – 202, [1] s.
6. Nurlanova, N. K. Metodologiya ocenki ekonomicheskogo potentsiala prigranichnyh rajonov i rekomendacii po ego ispol'zovaniyu (na primere Almatinskoy oblasti) / N. K. Nurlanova, A. K. Omarov // Economy: strategy and practice. – 2020. – № 15 (2). – S. 29–42.
7. Polyakova, G. P. Ekonomicheskij potencial regiona kak faktor ustojchivogo razvitiya: metody izmereniya i diagnostiki: avtoref. diss. na soiskanie uch. stepeni kand. ekon. nauk: special'nost' 08.00.05 Ekonomika i upravlenie narodnym hozyajstvom (regional'naya ekonomika) / Polyakova Galina Petrovna. – Ivanovo, 2013. – 22 s.
8. Saryshahin, E. B. Ekonomicheskie problemy ispol'zovaniya resursnogo potentsiala pribrezhnogo regiona transgranichnogo tipa: avtoref. diss. na soiskanie uch. stepeni kand. ekon. nauk: special'nost' 08.00.05 Ekonomika i upravlenie narodnym hozyajstvom / Saryshahin Eshref Burak. – Sankt-Peterburg, 2014. – 17 s.
9. Vertinskaya, T. S. Metodicheskie osnovy razrabotki kompleksa indikatorov dlya ocenki ekonomicheskoy integracii regionov stran – chlenov EEP / T. S. Vertinskaya // Evrazijskaya ekonomicheskaya integraciya. – 2013. – № 2 (19). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-osnovy-razrabotki-kompleksa-indikatorov-dlya-otsenki-ekonomicheskoy-integratsii-regionov-stran-chlenov-eeep> (data obrashcheniya: 11.07.2025).

Материал поступил 11.07.2025, одобрен 16.07.2025, принят к публикации 16.07.2025

УДК 331.1:658.3.07

ПРОБЛЕМА УДЕРЖАНИЯ ПЕРСОНАЛА: ДЕТЕРМИНИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ И СТРАТЕГИИ РЕШЕНИЯ

И. Н. Кандричина¹, Е. Г. Богданович², Н. И. Куновская³

¹ К. соц. н., доцент, заведующий кафедрой менеджмента, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: ikandrichina@bntu.by

² К. ист. н., доцент, доцент кафедры менеджмента, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: elenabogdanovich@bntu.by

³ Помощник ректора, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: nikunovskaya@bntu.by

Реферат

В условиях дефицита квалифицированных кадров на рынке труда удержание персонала приобретает приоритетное значение. Сегодня удержание персонала является ключевой персонал-стратегией, направленной на выявление квалифицированных и талантливых работников, их сохранение в штате организации, развитие и использование их потенциала в долгосрочной перспективе. Стратегия удержания персонала организации представляет собой комплекс мероприятий по снижению текучести кадров и сохранению штата сотрудников. Удержание сотрудников следует рассматривать как стратегическую практику управления человеческими ресурсами, включающую долгосрочное кадровое планирование, формирование кадрового резерва и управление карьерой, выявление, развитие и удержание талантливых сотрудников.

Формирование персонал-стратегии, направленной на выявление квалифицированных и талантливых работников, их сохранение в штате организации, развитие и использование их потенциала в долгосрочной перспективе, является приоритетной задачей кадрового менеджмента современной организации. Разработка и внедрение эффективных стратегий удержания персонала обеспечивают долгосрочные выгоды организации, способствуют экономическому развитию и стабильности.

Проблему удержания персонала детерминируют внешние (глобализация и регионализация, совершенствование цифровых и интеллектуальных технологий, деятельность и развитие транснациональных корпораций, миграционные процессы, демографическая яма 1990-х годов, несогласованность предпочтений молодежи с потребностями рынка труда, дефицит квалифицированных кадров и старение населения) и внутренние (рабочая среда, иерархическая организационная структура, стиль микроменеджмента, удовлетворенность персонала, забота о благополучии сотрудников) факторы жизнедеятельности организации.

Ключом к удержанию персонала является последовательное внедрение эффективных методов вовлечения, обучения и развития сотрудников, управления эффективностью и вознаграждением персонала, наличие и поддержание сильной организационной культуры, а использования этического лидерства, базирующегося на честности, порядочности и приверженности этическим нормам.

Ключевые слова: удержание персонала, стратегия удержания персонала, факторы удержания персонала, управление эффективностью персонала, вовлеченность персонала, управление вознаграждением персонала.

THE PROBLEM OF STAFF RETENTION: DETERMINING FACTORS AND SOLUTION STRATEGIES

I. N. Kandrichina, E. G. Bogdanovich, N. I. Kunovskaya

Abstract

In the conditions of shortage of qualified personnel in the labor market, personnel retention is becoming a priority. Today, personnel retention is a key personnel strategy aimed at identifying qualified and talented employees, keeping them on the staff of the organization, developing and using their potential in the long term. The personnel retention strategy of the organization is a set of measures to reduce staff turnover and retain the staff. Employee retention should be considered as a strategic practice of human resource management, including long-term personnel planning, formation of a personnel reserve and career management, identification, development and retention of talented employees.

Formation of a personnel strategy aimed at identifying qualified and talented employees, keeping them on the staff of the organization, developing and using their potential in the long term is a priority task of personnel management of a modern organization. Development and implementation of effective personnel retention strategies provide long-term benefits to the organization, contribute to economic development and stability.

The problem of staff retention is determined by external (globalization and regionalization, improvement of digital and intellectual technologies, activity and development of transnational corporations, migration processes, demographic hole of the 1990s, mismatch of preferences of young people with the needs of the labor market, shortage of qualified personnel and aging of the population) and internal (work environment, hierarchical organizational structure, micromanagement style, staff satisfaction, concern for the well-being of employees) factors of the organization's life.

The key to staff retention is the consistent implementation of effective methods of employee engagement, training and development, performance management and remuneration of personnel, the presence and maintenance of a strong organizational culture, and the use of ethical leadership based on honesty, integrity and commitment to ethical standards.

Keywords: staff retention, staff retention strategy, staff retention factors, staff performance management, staff engagement, staff compensation management.

Введение

В условиях дефицита квалифицированных кадров на рынке труда удержание персонала приобретает приоритетное значение. Сегодня удержание персонала является ключевой персонал-стратегией, направленной на выявление квалифицированных и талантливых работников, их сохранение в штате организации, развитие и использование их потенциала в долгосрочной перспективе. Стратегия

удержания персонала организации представляет собой комплекс мероприятий по снижению текучести кадров и сохранению штата сотрудников. Талантливые сотрудники считаются высококвалифицированными и/или обладающими специфическими для организации знаниями и навыками. Удержание сотрудников следует рассматривать как стратегическую практику управления человеческими ресурсами, включающую долгосрочное кадровое планирование, форми-

рование кадрового резерва и управление карьерой, выявление, развитие и удержание талантливых сотрудников.

В настоящее время организации вынуждены дополнять свои кадровые политики мероприятиями, направленными на повышение удовлетворенности и организационной приверженности персонала, сохранение штата и удержание талантливых сотрудников. Традиционно для достижения данных целей использовались экономические методы стимулирования и удержания персонала – денежные вознаграждения, бонусы и льготы. Однако они имеют краткосрочный эффект и не снижают показатели текучести кадров в долгосрочной перспективе.

Детерминанты и стратегии удержания персонала

Разработка и внедрение эффективных стратегий удержания персонала обеспечивают долгосрочные выгоды организации, способствуют экономическому развитию и стабильности.

Проблему удержания персонала детерминируют как внешние, так и внутренние факторы жизнедеятельности организации.

Внешние факторы – глобализация и регионализация, совершенствование цифровых и интеллектуальных технологий, деятельность и развитие транснациональных корпораций, миграционные процессы – дестабилизируют бизнес-среду, делают ее более динамичной и открытой. Высокие темпы международной мобильности стали фактором оттока рабочей силы во многих странах, особенно высококвалифицированных специалистов. Так, например, исследование тенденций управления персоналом транснациональных корпораций М. Гатриджа и А. Б. Комма [1, 2] показало, что топ-менеджеры в течение своей трудовой деятельности в среднем дважды переезжают из одной страны в другую в целях продвижения по карьерной лестнице. Демографическая яма 1990-х годов, темпы миграции, несогласованность предпочтений молодежи с потребностями рынка труда, дефицит квалифицированных кадров и старение населения актуализируют проблему удержания персонала для большинства организаций Беларуси.

Основными внутренними факторами, обостряющими проблемы удержания персонала, являются рабочая среда, иерархическая организационная структура, стиль микроменеджмента, удовлетворенность персонала, забота о благополучии сотрудников.

Рабочая среда, т. е. совокупность условий, в которых люди выполняют свои должностные обязанности, оказывает непосредственное влияние на уровень вовлеченности персонала, уровень мотивации и общую производительность труда работников. Она детерминирует проблему удержания персонала, поскольку экстремальные рабочие нагрузки, отсутствие сложной/интересной, творческой работы, необходимость выполнять скучную и бессмысленную работу, отсутствие разнообразия рабочей силы и недостаточная вовлеченность в работу усугубляют проблему текучести кадров. В. Р. Деви [3] подчеркивал, что неблагоприятная рабочая среда приводит к снижению уровня мотивации, отчуждению сотрудников и, как следствие, снижению производительности труда персонала. А. Э. Монсен и Р. В. Босс [4] отмечали, что постановка неадекватных и нереалистичных целей приводит к двусмысленности ролей и внутреннему конфликту между менеджерами и их непосредственными подчиненными.

Специалисты по персоналу заметили, что организационные контекстуальные факторы (традиционные иерархии, устаревшие технологии и политика позитивного действия) обостряют проблему удержания персонала [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Так, сложная иерархическая организационная структура и стиль микроменеджмента актуализируют проблему текучести кадров, снижают удовлетворенность персонала и создают проблемы для его удержания. Рутинная, неинтересная и бессмысленная работа, чрезмерные нагрузки, нереалистичные общеорганизационные цели, отсутствие поощрений, признания заслуг, карьерных и образовательных возможностей отражаются на уровне удовлетворенности, формируют намерение уволиться и стимулируют поиск альтернативной работы в других организациях.

Микроменеджеры часто концентрируются на рутинных рабочих бизнес-процессах, не поощряют и не допускают инициативности и самостоятельности, вмешиваясь в сферы ответственности подчиненных и препятствуя их развитию, тем самым снижают производи-

тельность и вынуждают квалифицированных работников покидать организацию. Действительно, результаты исследования Р. Д. Уайта [13] подтверждают, что микроменеджерский стиль, характеризующийся проявлениями чрезмерного внимания к незначительным деталям и тотальным контролем, приводит к снижению удовлетворенности работой с сопутствующим повышением показателей текучести кадров. А. Хозле и П. Дайя [14] предполагают, что политика позитивного действия, предоставляющая привилегии определенной группе работников, несмотря на цели по достижению социального равенства, может вызвать негативные чувства, например, разочарование у кандидатов на продвижение в связи с неоправдавшимися карьерными ожиданиями.

Пренебрежение благополучием сотрудников также приводит к повышению уровня текучести кадров. В условиях интенсификации труда и роста профессионально-квалификационных требований соблюдение баланса между работой и личной жизнью становится проблематичным, что, в свою очередь, меняет роль заботы о благополучии персонала с популярного тренда до приоритетного направления кадровой политики организации. Многочисленные исследования подтверждают, что проблема удержания персонала существует в организациях, пренебрегающих благополучием сотрудников и/или не уделяющих должного внимания заботе о них. Речь идет об отсутствии помощи со стороны отдела кадров или руководства организации в решении личных проблем в области физического и ментального здоровья, взаимоотношений в рабочем коллективе, удовлетворенности трудом, осознания своего вклада в достижение организационных целей.

Дж. Ван Дайк и М. Кутзее [15] отмечают, как забота о благополучии сотрудников снижает уровень стресса. Так, например, наличие медицинских страховок и программ оздоровления работников не только снижает уровень стресса, но и повышает уровень приверженности организации, привлекает талантливых и высококвалифицированных сотрудников [16]. Аналогичным образом, отсутствие заботы о благополучии сотрудников и непризнание необходимости равномерного распределения времени и ресурсов между работой и личной жизнью работников негативно влияют на уровень приверженности персонала и стимулируют намерение сменить место работы.

Эффективность методов управления персоналом, особенно стратегий удержания сотрудников, напрямую зависит от руководителей организации. Исследование Л. Летчии и А. Томаса [17] подтверждает, что стиль лидерства, организационная культура, цели организации, возможности развития потенциала, социально одобряемая работа и коллегиальность являются факторами, способствующими удержанию персонала.

Организации с низким уровнем текучести кадров, как правило, применяют демократический, товарищеский или индивидуальный стиль управления персоналом, предполагающие отношение к работникам как к ценному ресурсу. Руководство таких организаций выстраивает каналы прямой и обратной связи и координирует взаимодействия, ориентируясь на необходимость обеспечения высокого уровня доверия, открытого общения и взаимопонимания между всеми членами трудового коллектива. Базовыми направлениями HR-менеджмента подобных субъектов хозяйствования являются: оценка персонала, обучение и развитие, мотивация и вовлечение, планирование карьеры, забота о благополучии и управление талантами. Индивидуальное внимание, получаемое каждым работником, способствует формированию лояльности и приверженности организации, снижает вероятность потери квалифицированных кадров.

Ключом к удержанию персонала является последовательное внедрение эффективных методов вовлечения сотрудников [18]. Сначала формируется приверженность персонала: его привязанность к организации, сознательная и бессознательная идентификация с организацией, стремление способствовать ее благо. Затем проявляется лояльность, желание быть частью организации и развивать ее. Лояльный работник доброжелательно и уважительно относится к коллегам, качественно выполняет свои должностные обязанности, соблюдает обязательства перед организацией, защищает ее интересы и стремится внести свой вклад в общий результат. Человеку нравится работать именно в этой организации, и он планирует продлевать свои трудовые правоотношения с организа-

цией. Вовлеченный работник, инициативный и осознающий свою ответственность за результаты деятельности и достижение организационных целей, хорошо осведомлен о специфике организации, бизнес-процессах и организационных процедурах, каналах связи и организационной культуре. Он максимально погружен и предан организации, разделяет цели и ценности организации и чувствует сопричастность организационным результатам. Степень вовлеченности прямо пропорциональна показателям удержания сотрудников. Особенно значимо ее влияние в организациях с кадровым разнообразием, поскольку мероприятия, направленные на формирование приверженности, лояльности и, в конечном счете, вовлеченности персонала позволяют работникам лучше узнать друг друга, способствуют взаимообучению разных групп персонала и формированию инклюзивности в бизнесе.

Управление эффективностью персонала как направление HR-менеджмента представляет собой последовательный процесс установления целей, оценку персонала, обратную связь, развитие, воз-

награждение в целях повышения производительности и достижения стратегических задач организации. Систематическая коммуникация между руководителями и персоналом по вопросам результатов их трудовой активности, признание заслуг и достижений работников способствует удержанию персонала.

Использование системы управления эффективностью персоналом в качестве стратегии удержания кадров базируется на возможности взаимодействия с HR-менеджерами и руководителями организации и обсуждении показателей производительности, ожиданий и долгосрочных целей. Это способствует пониманию требований, предъявляемых структурным подразделениям, трудовым коллективам и рабочим командам, формированию инициативности, ответственности и ощущения самостоятельности в работе. Справедливость, последовательность и прозрачность основных процедур (этапов) системы управления эффективностью персонала повышают уровень доверия между руководителями и персоналом организации и, тем самым, способствуют снижению показателей текучести кадров.

Таблица – Основные элементы системы удержания персонала

Удержание персонала					
Факторы удержания	Методы удержания		Способы удержания	Технологии удержания	Стратегии удержания
	Классические	Современные			
Здоровая рабочая среда	Создание комфортных условий труда	Обеспечение возможностей профессионального роста и обучения	Поиск потенциальных проблем на рабочем месте и их решение	Технологии привлечения и технологии формирования персонала	1. Формирование трудового коллектива со схожими ценностями. 2. Разнообразие и инклюзивность
Оплата труда	Конкурентная заработная плата	Предоставление денежных выгод и внедрение программ финансового благополучия	Индивидуальный подход	Технологии вознаграждения	1. Формирование системы оплаты труда, включающее вознаграждение по результатам и за усилие, творческие способы вознаграждения и премирования. 2. Поощрение сотрудников, проработавших в компании длительное время (денежное вознаграждение и бонусы, дополнительные отпуска, подарки и возможности профессионального роста, регулярное признание заслуг долгосрочных сотрудников). 3. Предоставление денежных выгод и внедрение программ финансового благополучия. 4. Внедрение ESOP (плана владения акциями сотрудников)
Признание заслуг	Регулярные повышения и бонусы	Саббатикал (длительный отпуск для сотрудников на грани увольнения)	Повышение статуса сотрудника в коллективе	Технологии управления талантами	1. Участие в программах корпоративной социальной ответственности. 2. Забота о благополучии и здоровье сотрудников (предоставление медицинской страховки, организация корпоративных занятий спортом и фитнес-программ)
Возможность роста, развития и продвижения	Курсы и тренинги	Регулярное обучение	Разнообразные формы и методы обучения	Технологии развития	Регулярное обучение
Открытость отношений и общения	Регулярная обратная связь и внимание к мнению работников	Проведение Exit-интервью	Открытые каналы прямой и обратной связи	Технологии использования персонала	Обеспечение баланса между работой и личной жизнью
Гибкость	–	Agile-методология управления	Флексибилизация занятости	Технологии привлечения и технологии использования персонала	Гибкие условия труда и гибридные рабочие места

В рамках управления эффективностью персонала можно выделить следующие стратегии удержания: признание достижения целей развития, предоставление качественных возможностей для развития или обучения, постановка реалистичных целей, установление значимых индивидуальных вознаграждений, совместное определение потребностей в развитии и вознаграждениях за достижение целей.

Управление вознаграждением персонала тесно связано с управлением эффективностью и также может использоваться в качестве стратегии удержания персонала. Система вознаграждений должна учитывать потребности работников и сочетать материальные и нематериальные, внешние и внутренние формы наград. Вознаграждение, соответствующее ожиданиям, желаниям и потребностям работников, стимулирует приверженность, снижает текучесть кадров и способствует удержанию персонала. С. Э. Ким и Дж. В. Ли [19] отмечают, что по мере того, как менеджеры поднимаются по карьерной лестнице, они начинают проявлять больше интереса к внутренним вознаграждениям. Так, руководителей высшего звена, в частности, больше привлекают внутренние вознаграждения, приносящие чувства удовлетворения и достижения результата и стимулирующие их лучше, чем материальные выплаты.

Обучение и развитие – еще одно ключевое направление управления персоналом, играющее важную роль в удержании работников. Предоставляемые организацией возможности обучения и развития способствуют повышению индивидуальных и организационных показателей, личностному росту и самосовершенствованию работников, наращиванию кадрового потенциала организации [20]. От эффективности прохождения обучения зависит уровень знаний и компетентности персонала, его способности реагировать на изменения во внешней среде, принимать и адаптироваться к инновациям. Тем более, успешное прохождение дополнительного обучения и/или курсов повышения квалификации часто является гарантией занятости и продвижения по карьерной лестнице. Именно этот факт и способствует решению проблем текучести кадров и удержания персонала.

Демократичное лидерство в организации также является важной стратегией удержания персонала. На самом деле, эффективные методы управления персоналом напрямую зависят от лидеров. Демократичное лидерство предполагает доверие и общение между линейными менеджерами и непосредственными подчиненными, признательность и поддержку со стороны линейных менеджеров, демократический стиль руководства и соблюдение этических норм этическое лидерство. Так, общеизвестно, что лидеры, придерживающиеся более либерального стиля руководства, имеют лучшие отношения с сотрудниками.

Лидеры также несут ответственность за разработку миссии и целей организаций, которые, в свою очередь, влияют на осмысленность работы и способствуют интеллектуальному стимулированию персонала. Ведь четкая постановка стратегических организационных целей позволяет привлекать и удерживать квалифицированные кадры, сообщает им о положении, роли и перспективах развития организации. Целеустремленные сотрудники впадают в отчаяние и развивают намерение сменить работу, когда видят, что их работа и вклад пропадают впустую в результате непоследовательных действий, смены стратегий и миссии.

Лидеры должны уделять внимание становлению доверительных отношений с персоналом и обеспечивать поддержку и признательность руководства. Ведь доверие между линейными менеджерами и непосредственными подчиненными играет важную роль в удержании персонала. Оно же лежит в основе концепции этического лидерства, предполагающей использование стиля руководства, базирующегося на честности, порядочности и приверженности этическим нормам.

Наличие и поддержание сильной организационной культуры крайне важно для удержания сотрудников. Организационная культура является отражением того, как сотрудники воспринимают и чувствуют организацию. Она развивается с течением времени и поэтому рассматривается как долгосрочная стратегия, влияющая на динамику организации.

Поскольку организационная культура организации также может внести свой вклад в удержание персонала, специалисты по персоналу сосредоточились на создании культуры, которая учитывает

и поддерживает разнообразие рабочей силы, чтобы сотрудники чувствовали себя принятыми и принадлежащими, а также избегали чувства изоляции. Организационная культура влияет на поведение сотрудников и их отношение к обязательствам организации, помогает создать чувство организационной идентификации, которое дополняет стратегии удержания сотрудников.

Заключение

Таким образом, удержание персонала является злободневной проблемой современных организаций, особенно в контексте дефицита квалифицированных кадров и высоких темпов трудовой мобильности. Проблема удержания персонала особенно актуальна для менеджеров среднего звена и детерминирована обеспечением благополучия сотрудников, рабочей средой и организационным контекстом. Целенаправленные действия и стратегии удержания, базирующиеся на этическом лидерстве и системе управления эффективностью персонала, представляются наиболее действенными и результативными. В связи с этим необходимо стремиться к достижению открытости при общении и продвижению этического лидерства в организации, укреплению доверия и сотрудничества, созданию доверительной рабочей среды и прозрачности информации, особенно при оценке персонала.

Список цитированных источников

- Guthridge, M. Why multinationals struggle to manage talent / M. Guthridge, A. B. Komm // *The McKinsey Quarterly*. – 2018. – Vol. 34. – P. 10–13.
- Guthridge, M. Making talent a strategic priority / M. Guthridge, A. B. Komm, E. Lawson // *The McKinsey Quarterly*. – 2021. – Vol. 48 (1). – P. 49–59.
- Devi, V. R. Employee engagement is a two-way street / V. R. Devi // *Human Resource Management International Digest*. – 2018. – Vol. 17 (2). – P. 3–4.
- Monsen, E. The impact of strategic entrepreneurship inside the organization: Examining job stress and employee retention / E. Monsen, R.W. Boss // *Entrepreneurship, Theory and Practice*. – 2019. – Vol. 33 (1). – P. 71–104.
- Кандричина, И. Н. Интеллектуальное управление персоналом: достоинства, недостатки, перспективные возможности и риски / И. Н. Кандричина, Е. Г. Богданович // *Научные труды Республиканского института высшей школы. Философско-гуманитарные науки*. – 2024. – № 23–2. – С. 200–207.
- Uitzinger, D. Perceptions of human resource professionals of challenges to and strategies for retaining managers / D. Uitzinger, P. Chrysler-Fox, A. Thomas // *Acta Commercii*. – 2018. – Vol. 18 (1). – P. 504.
- Kerr-Phillips, B. Macro and micro challenges for talent retention in South Africa / B. Kerr-Phillips, A. Thomas // *SA Journal of Human Resource Management*. – 2021. – Vol. 7 (1). – P. 82–91.
- Кандричина, И. Н. Роль кадрового менеджмента при международных слияниях и поглощениях компаний / И. Н. Кандричина, Е. Г. Богданович // *Научные труды РИВШ. Философско-гуманитарные науки*. – 2022. – Ч. 2. – С. 11–89.
- Кандричина, И. Н. Проблемы и перспективы исследований в области управления талантами / И. Н. Кандричина, Е. Г. Богданович // *Научные труды РИВШ. Философско-гуманитарные науки*. – 2023. – Вып. 22. – С. 291–298.
- Securing executive support with retention analytics. – *People analytics world*. – 2021.
- Spence, A. Blockchain and the Chief Human Resources Officer. Transforming the HR Function and the market for skills, talent, and training. / A. Spence // *A Blockchain Research Institute*. – 2018.
- Barozzi, G. From hierarchies to networks of teams. A new analytics era. / G. Barozzi // *People analytics Forum*. – 2017.
- White, R. D. The micromanagement disease: Symptoms, diagnosis and cure / R. D. White // *Public Personnel Management*. – 2020. – Vol. 39 (1). – P. 71–76.
- Khoele, A. Investigating the turnover of middle and senior managers in the pharmaceutical industry in South Africa / A. Khoele //

- SA Journal of Human Resource Management. – 2020. – Vol. 12 (1). – P. 1–10.
15. Van Dyk, J. Retention factors in relation to organizational commitment in medical and information technology services / J. Van Dyk, M. Coetzee // SA Journal of Human Resource Management. – 2022. – Vol. 10 (2). – P. 1–12.
 16. Govaerts, N. Influence of learning and working climate on the retention of talented employees / N. Govaerts // Journal Workplace Learning. – 2022. – Vol. 23 (1). – P. 35–55.
 17. Letchmiah, L. Retention of high-potential employees in a development finance company / L. Letchmiah, A. Thomas // SA Journal of Human Resource Management. – 2022. – Vol. 15 (2017). – P. 1–9.
 18. State of the global workplace: Employee engagement insights for business leaders worldwide. – Gallup, 2017. – P. 101.
 19. Kim, S. E. Is mission attachment an effective management tool for employee retention? An empirical analysis of a nonprofit human services agency / S. E. Kim, J. W. Lee // Review of Public Personnel Administration. – 2021. – Vol. 27 (3). – P. 227–248.
 20. Ashton, C. Managing talent for competitive advantage: Taking a systemic approach to talent management / C. Ashton // Performance Improvement Solutions. – 2020. – Vol. 4 (5). – P. 28–31.
- References**
1. Guthridge, M. Why multinationals struggle to manage talent / M. Guthridge, A. B. Komm // The McKinsey Quarterly. – 2018. – Vol. 34. – P. 10–13.
 2. Guthridge, M. Making talent a strategic priority / M. Guthridge, A. B. Komm, E. Lawson // The McKinsey Quarterly. – 2021. – Vol. 48 (1). – P. 49–59.
 3. Devi, V. R. Employee engagement is a two-way street / V. R. Devi // Human Resource Management International Digest. – 2018. – Vol. 17 (2). – P. 3–4.
 4. Monsen, E. The impact of strategic entrepreneurship inside the organization: Examining job stress and employee retention / E. Monsen, R.W. Boss // Entrepreneurship, Theory and Practice. – 2019. – Vol. 33 (1). – P. 71–104.
 5. Kandrichina, I. N. Intellekтуал'noe upravlenie personalom: dostoinstva, nedostatki, perspektivnye vozmozhnosti i riski / I. N. Kandrichina, E. G. Bogdanovich // Nauchnye trudy Respublikanskogo instituta vysshej shkoly. Filosofsko-gumanitarnye nauki. – 2024. – № 23–2. – S. 200–207.
 6. Uitzinger, D. Perceptions of human resource professionals of challenges to and strategies for retaining managers / D. Uitzinger, P. Chrysler-Fox, A. Thomas // Acta Commercii. – 2018. – Vol. 18 (1). – P. 504.
 7. Kerr-Phillips, B. Macro and micro challenges for talent retention in South Africa / B. Kerr-Phillips, A. Thomas // SA Journal of Human Resource Management. – 2021. – Vol. 7 (1). – P. 82–91.
 8. Kandrichina, I. N. Rol' kadrovogo menedzhmenta pri mezhdunarodnykh sliyaniiakh i pogloshcheniiakh kompanij / I. N. Kandrichina, E. G. Bogdanovich // Nauchnye trudy RIVSH. Filosofsko-gumanitarnye nauki. – 2022. – CH. 2. – S. 11–89.
 9. Kandrichina, I. N. Problemy i perspektivy issledovanij v oblasti upravleniya talantami / I. N. Kandrichina, E. G. Bogdanovich // Nauchnye trudy RIVSH. Filosofsko-gumanitarnye nauki. – 2023. – Vyp. 22. – S. 291–298.
 10. Securing executive support with retention analytics. – People analytics world. – 2021.
 11. Spence, A. Blockchain and the Chief Human Resources Officer. Transforming the HR Function and the market for skills, talent, and training. / A. Spence // A Blockchain Research Institute. – 2018.
 12. Barozzi, G. From hierarchies to networks of teams. A new analytics era. / G. Barozzi // People analytics Forum. – 2017.
 13. White, R. D. The micromanagement disease: Symptoms, diagnosis and cure / R. D. White // Public Personnel Management. – 2020. – Vol. 39 (1). – P. 71–76.
 14. Khoele, A. Investigating the turnover of middle and senior managers in the pharmaceutical industry in South Africa / A. Khoele // SA Journal of Human Resource Management. – 2020. – Vol. 12 (1). – P. 1–10.
 15. Van Dyk, J. Retention factors in relation to organizational commitment in medical and information technology services / J. Van Dyk, M. Coetzee // SA Journal of Human Resource Management. – 2022. – Vol. 10 (2). – P. 1–12.
 16. Govaerts, N. Influence of learning and working climate on the retention of talented employees / N. Govaerts // Journal Workplace Learning. – 2022. – Vol. 23 (1). – P. 35–55.
 17. Letchmiah, L. Retention of high-potential employees in a development finance company / L. Letchmiah, A. Thomas // SA Journal of Human Resource Management. – 2022. – Vol. 15 (2017). – P. 1–9.
 18. State of the global workplace: Employee engagement insights for business leaders worldwide. – Gallup, 2017. – P. 101.
 19. Kim, S. E. Is mission attachment an effective management tool for employee retention? An empirical analysis of a nonprofit human services agency / S. E. Kim, J. W. Lee // Review of Public Personnel Administration. – 2021. – Vol. 27 (3). – P. 227–248.
 20. Ashton, C. Managing talent for competitive advantage: Taking a systemic approach to talent management / C. Ashton // Performance Improvement Solutions. – 2020. – Vol. 4 (5). – P. 28–31.

Материал поступил 11.05.2025, одобрен 20.05.2025, принят к публикации 20.05.2025

УДК 336.22

СТРУКТУРНО-ПОВЕДЕНЧЕСКИЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АСПЕКТЫ НАЛОГОВОЙ СИСТЕМЫ С ПОЗИЦИИ РАЗРАБОТКИ НАЛОГОВОЙ СТРАТЕГИИ ПЛАТЕЛЬЩИКА

И. А. Конончук

К. э. н., доцент, доцент кафедры финансового менеджмента, УО «Полесский государственный университет», Пинск, Беларусь, e-mail: I_Kononchuk@mail.ru

Реферат

Набор налогов и сборов, их структура и способы взимания, сфера распространения налогов, налоговые привилегии и административное давление, а также другие характеристики налоговой системы выступают взвешенным механизмом реализации идей и предпочтений в решении социально-экономических задач, стоящих перед государством, результатом прикладных разработок ученых, многопрофильной средой функционирования плательщиков, выстраивающих свои стратегии, которые направлены не только на приспособление к действующим налоговым правилам, но и на выработку актуальных решений по укреплению финансовых позиций. Неотъемлемой процедурой формирования налоговой стратегии плательщиками является всесторонняя оценка налоговой системы. В статье аргументировано исследование налоговой системы по блокам (структурный, поведенческий, функциональный), отвечающие процедуре выработки налоговой стратегии организации. Обоснована потребность исследования структурного блока налоговой системы, позволяющий выявить потенциальный состав подлежащих к уплате налогов, их качественные свойства в разрезе элементов, соотнесение с предложенными группировками по различным критериям (субъект налога, режим налогообложения, возможности и широта прав уполномоченных органов, формирующие валовой доход элементы, критерий сложности их влияния на результирующий показатель, возможность манипулирования элементами налога и др.), а также доступность и ясность информации о налоговой системе. Доказана практическая ценность оценки налоговой системы с позиций ее подвижности и срочности (изменчивость налоговой системы, сроки начала и период действия изменений, вносимых в налоговое законодательство, процедура внесения изменений), объединенные в поведенческий блок. Установлена важность изучения таких характеристик налоговой системы, как направленность действующей налоговой системы, наличие прямых оговорок касательно налоговой оптимизации, ответственность за налоговые нарушения, объединенные в функциональный блок.

Ключевые слова: налоговая система, состав налогов, налоговые льготы, элементы налога, плательщики, валовой доход, прибыль, себестоимость, налоговая оптимизация, налоговая стратегия.

STRUCTURAL-BEHAVIORAL AND FUNCTIONAL ASPECTS OF THE TAX SYSTEM AS THE DEVELOPMENT OF THE PAYER'S TAX STRATEGY

I. A. Kononchuk

Abstract

The set of taxes and fees, their structure and methods of collection, the scope of tax distribution, tax privileges and administrative pressure, as well as other characteristics of the tax system are a weighted mechanism for implementing ideas and preferences in socioeconomic challenges facing the state, the result of applied developments of scientists, a multidisciplinary environment of operation of payers, building their strategies that are not only aimed at adjusting to the current tax rules, but also to develop relevant solutions for strengthening financial positions. An integral procedure for the formation of a tax strategy by taxpayers is a comprehensive assessment of the tax system. The article argues the study of tax system by blocks (structural, behavioral, functional), corresponding to the procedure of elaboration of tax strategy of the organization. The need for a study of the structural block of the tax system was justified, allowing to identify the potential composition of the taxes to be paid, their qualitative properties in terms of elements, correlation with the proposed groupings according to various criteria (the subject of tax, taxation regime, possibility and breadth of rights of authorized bodies forming gross income elements, criterion of their influence on the resulting indicator, possibility of manipulating elements of the tax, etc.), as well as accessibility and clarity of information on the tax system. The practical value of assessment of tax system in terms of its mobility and urgency (variability of tax system, dates of commencement and period of effect of changes made to tax legislation, procedure for making changes) combined into a behavioral block has been proven. The importance of studying such characteristics of the tax system as orientation of the current tax system, existence of direct reservations regarding tax optimization, responsibility for tax violations, combined in a functional block was determined.

Keywords: tax system, tax composition, tax benefits, tax elements, taxpayers, gross income, profit, cost price, tax optimization, tax strategy.

Введение

Налоговая система страны представляет собой не просто фискальный инструмент, а сложный регулятор, который при грамотном управлении способен стимулировать экономический рост посредством взаимодействия с адаптивными стратегиями плательщиков. Кроме того, налоговая система влияет на экологию и социальную сферу. Государство формирует общую налоговую среду посредством принятия законов и установления нормативов, а плательщики реагируют на эти условия, корректируя в соответствии с ними свою деятельность.

Современная научная литература, посвященная налоговой проблематике, охватывает широкий спектр исследований, структурированных по направлениям. Так, российские ученые Е. С. Вылкова, Л. В. Дуканич, С. В. Барулин и др. исследовали теоретико-методологические аспекты налоговой системы, в частности, понятие налоговой системы, ее структуру и функциональную значимость [1–4]. Ряд исследователей провели критический анализ проблем построения налоговых механизмов и пред-

ложили рекомендации по их совершенствованию [5–12]. Большинство работ носит практико-ориентированный характер, предлагая методы оптимизации налоговой нагрузки для субъектов экономики, включая снижение конкретных налогов и применение легальных схем минимизации платежей [1–4, 5–12].

Белорусские исследования (Т. И. Василевская [13], Н. Е. Заяц [14], И. А. Лукьянова [16, 17], Г. А. Шмарловская [19]) сосредоточены на анализе специфики налоговой системы Республики Беларусь, включая проблемы ее функционирования и перспективы реформирования [13–20].

Несмотря на значительный объем работ, посвященных налоговой проблематике, наблюдается дефицит методологических подходов, позволяющих оценивать налоговую систему с позиции плательщика. В частности, недостаточно изучены возможности использования налоговой системы как инструмента укрепления финансового состояния субъектов экономики, ограничения, препятствующие эффективной оптимизации налоговых платежей,

механизмы адаптации налоговой стратегии субъектов хозяйствования к динамике налоговой макросреды.

Целью статьи является исследование налоговой системы через призму трёх ее взаимосвязанных блоков (структурного, поведенческого, функционального) для выявления механизмов, позволяющих плательщикам разрабатывать эффективные налоговые стратегии в условиях макроэкономической динамики, изменений законодательства и асимметрии информации.

Основная часть

Налоговая система в силу своей сложности требует разделения на три взаимосвязанных блока – структурный, поведенческий, функциональный.

Структурный блок предполагает анализ элементов системы (налоги, ставки, льготы) и их взаимосвязей. Поведенческий – призван изучать и оценивать действия участников налоговых отношений (плательщиков, государства). Функциональный блок должен оценивать роль системы в достижении экономических и социальных целей. Предложенная группировка позволяет детализировать влияние каждого аспекта на налоговую стратегию организации.

Налоговая система любой страны формируется под влияние механизма правового регулирования, который включает национальное законодательство (законы, кодексы, указы) и международное право (соглашения, договоры), регулирующее деятельность транснациональных компаний, участвующих в интеграционных процессах. При этом международные нормы часто имеют большую юридическую силу, чем национальные, что требует их учета при разработке налоговой стратегии. Целью правового регулирования является создание единых правил для субъектов хозяйствования, в частности, определение перечня налогов и механизмов их уплаты, а также защита финансовых интересов сторон (например, посредством зачета налогов, уплаченных за рубежом), установление ответственности за нарушения и формализация критериев признания субъекта налогоплательщиком.

Правовое регулирование охватывает все три блока налоговой системы, обеспечивая её целостность. Поэтому для формирования эффективной налоговой стратегии организациям необходимо анализировать все три блока (структурный, поведенческий, функциональный) в контексте действующего законодательства, учитывая при этом двойственность правовой среды (национальные и международные нормы).

Структурный блок налоговой системы

Исследование структурного блока налоговой системы предполагает анализ перечня налогов, их элементов и группировок.

Налоги определяются через признаки, к которым можно отнести обязательность, законность, безэквивалентность, финансирование государственных расходов, наличие конкретного субъекта [21]. Четкое законодательное закрепление понятия налога в законах, кодексах, инструкциях позволяет выстроить систему отношений «государство-плательщик» и определить объект налогового воздействия. Конструкция налога, закрепленная законодательно, служит основой для разработки методов налоговой стратегии на микроуровне (в организации).

Величина налогового обязательства зависит от элементов налога, к которым относят объект обложения, базу, ставки, сроки уплаты. Элементы налога – обязательные (императивные) или факультативные элементы (например, льготы) – влияют на финансовый результат плательщика и требуют анализа со стороны субъекта хозяйствования с целью оптимизации [21].

Налоги группируют по ряду критериев. В теории существует множество классификационных признаков: субъект обложения, степень переложения, принадлежность к уровню управления, объект обложения, способ уплаты, источник уплаты и другие. Каждая группировка налогов предназначена для определенных практических целей. В целях управления налогами на микроуровне в основе их систематизации должен быть положен признак, позволяющий предвидеть потенциальные изменения величины налоговых потоков.

Классификация по субъектам налога (уплачиваемые организациями, физическими лицами, индивидуальными предприни-

мателями) часто подвергается критике в литературе из-за способности быстрой трансформации предпринимательства в юридическое лицо, а также возможности осуществления физическими лицами деятельности, направленной на извлечение дохода, вне предпринимательской формы ведения бизнеса [21]. В настоящее время однозначность отнесения налогов к конкретной группе плательщиков усложняется тем, что предпринимательская деятельность, жизнедеятельность домохозяйств, их взаимодействие с другими структурами тесно переплетены и сосуществуют друг с другом. Тем не менее, группировка налогов в разрезе видов плательщиков сохраняет свою ценность для налогового менеджмента. Финансовые и налоговая результативность деятельности субъектов экономики, взаимодействующих с контрагентами различных организационно-правовых форм, всегда зависит от особенностей налогообложения, вмененного их статусом. В процессе взаимодействия возможно создание партнерских союзов в системе внутреннего предпринимательства, налоговые последствия которых определяются составом и особенностями налогов и сборов, уплачиваемых партнерами. Такая классификация позволяет также просчитать и минимизировать риски доначисления налогов в результате признания сделки недействительной или притворной.

Налоговые системы большинства стран мира содержат особые (специфичные) системы налогообложения, введение которых определено, в большинстве случаев, проводимой в стране политикой стимулирования развития малого и среднего предпринимательства. Кроме особого платежа, заменяющего определенную группу налогов, плательщики могут уплачивать утвержденный перечень налогов, каждый из которых имеет свою специфику. Поэтому градация налогов в **разрезе режимов налогообложения** позволяет плательщику определить характерный для режима перечень обязательных платежей, механизм их расчета и уплаты, наметить перспективы их использования и оценить их влияние на устойчивость развития бизнеса.

Налоговые системы стран со сложными формами государственного устройства характеризуются многоуровневой системой налогообложения. При этом государственно-территориальные образования наделены правами вводить на своей территории закрытый или открытый перечень налогов, принимать установленные правовые действия относительно налоговых льгот, корректировать ставки и другие элементы налогов и сборов, введенных на соответствующей территории высестоящими органами государственного управления. Каждое такое действие влечет за собой определенные налоговые последствия и для бюджета соответствующего уровня бюджета, и для субъектов экономики. Поэтому группировка налогов **по степени автономии регионов в регулировании элементов налога (налоги, элементы которых подвергаются изменению решением местных органов власти, или неизменяемые)** позволяет оценить риски изменения условий налогообложения, колебания налоговой нагрузки на плательщиков, осуществляющих деятельность на различных территориях.

С целью анализа налоговой нагрузки важной видится классификация налогов **в разрезе элементов, формирующих валовой доход (налоги, включаемые в себестоимость, уплачиваемые из прибыли, оборотные налоги)**. Проблемой данной классификации может стать отнесение на себестоимость имущественных налогов. Например, земельный налог в отношении земельного участка, на котором возводится объект недвижимости, увеличивает стоимость строящегося капитального строения. Поэтому в группу налогов, относимых на себестоимость, включаются налоги, уплачиваемые в связи с участием субъектов хозяйствования в производстве.

Налог на прибыль зависит от объема реализации, инноваций и инвестиций. Сокращение налога можно достигнуть за счет зачета затрат и оптимизации облагаемого дохода.

НДС и акцизы теоретически считаются нейтральными для производителя, но в условиях эластичного спроса часть нагрузки ложится на него. В условиях зачетного метода расчета данных налогов складывается различный финансовый результат при различной структуре себестоимости. Поэтому проведение постоянного мониторинга указанных налогов, обстоятельств, влияющих на величину данной группы платежей, является важной процедурой выработки и принятия соответствующих стратегических решений.

Для плательщиков с неустойчивым финансовым положением и низкими значениями рентабельности, как правило, будут преобладать оборотные налоги. Наличие значимого имущественного комплекса в распоряжении плательщиков, активное использование природных ресурсов влечет за собой увеличение доли налогов, относимых на себестоимость. При прочих равных условиях повышение эффективности функционирования субъектов хозяйствования, реализация экономически обоснованных проектов увеличивает долю налогов, уплачиваемых непосредственно из прибыли.

Некоторые исследователи [22] считают, что с точки зрения налогового планирования оборотные налоги и налоги, относимые на себестоимость, необходимо объединить в одну группу налогов, уплачиваемых за счет издержек, то есть налогов, учитываемых при расчете налога на прибыль. Однако считаем, что с точки зрения налогового менеджмента такое укрупнение не позволяет реализовать концепцию стратегического управления в силу различной природы таких налогов.

По критерию сложности влияния на результирующий показатель деятельности институциональной единицы налоги можно разделить на **моносложные** и **многосложные**. Так, динамика налога на прибыль не оказывает влияние на иные платежи налогового характера. Его можно отнести к моносложным налогам. А вот изменение оборотных налогов и налогов, относимых на себестоимость, влечет за собой корректировку и иных налоговых платежей. Их мы относим к многосложным. Такая классификация позволяет учитывать мультипликативный эффект влияния отдельного показателя или группы показателей на результативность всей деятельности организации. Так, изменение, например, метода начисления амортизации может являться следствием изменения не только налога на недвижимость, но и налога на прибыль, и не только в части амортизационных затрат, но и в части налогов, относимых на себестоимость. Особое значение такая классификация приобретает в условиях формирования так называемых экосистем, предполагающих расширение не только географии, но и видов деятельности субъектов хозяйствования [23].

Методическую ценность с точки зрения управления налогами на уровне плательщика имеет дифференциация налогов **в зависимости от их поведения в ответ на изменение объема реализации на постоянные и переменные**. Колебания величины переменных налогов напрямую зависят от предпринимательской активности, конечного финансового результата. Размер постоянных налогов не зависит от платежеспособности плательщика, определяется характеристиками объекта обложения, завязан на использовании активов в производстве. Данная классификация позволяет оценить влияние налогов на величину объема продаж в точке безубыточности, использовать механизм финансового и операционного левериджа, оценивать степень чувствительности чистой прибыли к росту выручки от реализации продукции в различных условиях внешней среды, в том числе с точки зрения получения налоговых льгот.

Важно разграничивать также налоги по **регулярности уплаты на регулярные и разовые**. Уплата регулярных налогов носит систематический характер с закреплением в законодательстве этой периодичности. Срок уплаты разовых налогов и сборов (пошлин) определяется, как правило, совершением определенного законодательством действия, носящего нерегулярный характер. Разработка индивидуального платежного налогового календаря с целью сбалансирования денежных потоков плательщика и недопущения дефицита средств для расчета с бюджетом по налогам и сборам является важным инструментом, обеспечивающим своевременное исполнение налогового обязательства. В процессе реализации оптимизационной налоговой стратегии выбор сроков уплаты регулярных и разовых налоговых платежей основывается на временной ценности денежных ресурсов, которая определяется инфляцией, скоростью обращения денежного оборота, стоимостью денег, и требует в большинстве случаев максимально возможного перенесения сроков перечисления на более поздний период. В данном контексте манипулирование сроками уплаты возможно и достигается не только путем выбора периодичности расчета с бюджетом (при наличии возможности выбора), но и целенаправленным воздействием, влияющими на срок уплаты.

В тесной связке с предыдущей классификацией идет классификация налогов **по возможности манипулирования элементами налога**. Устанавливая четкие налоговые правила расчета налогов, законодательство, тем не менее, в определенных случаях допускает различные варианты отражения и учета хозяйственных операций при формировании налоговой базы, налоговых вычетов и скидок, сроков возникновения налогового обязательства. Объектом воздействия налогового менеджмента в таком случае выступает группа налогов, которые можно определить как **поддающиеся воздействию или гибкие**. Величина некоторых налогов (например, транспортный налог, земельный налог) практически **не поддается воздействию (жесткие)**. Технически организация налогового процесса в отношении таких налогов, по которым заранее известна налоговая база, налоговые ставки, может быть сведена к процедуре префайлинга, предусматривающая обязанность налоговых органов рассчитывать налоги и направлять уведомление или налоговую декларацию плательщику.

Процесс интернационализации экономической жизни, углубление специализации и кооперации в международном масштабе вызывает потребность учета страновых налоговых особенностей и их использование в механизме налоговой оптимизации [24]. Это позволяет проводить классификацию **налогов в разрезе устанавливающих их стран**.

Ключевым элементом структурного блока, напрямую влияющим на эффективность налоговой стратегии плательщика, является доступность и ясность информации о налоговой системе.

Наличие четких знаний позволяет плательщикам идентифицировать налоговые обязательства, анализировать законодательство и выявлять возможности для оптимизации. Эффективный обмен данными между налоговыми органами и плательщиками, наличие открытых баз законодательства, разъяснений, судебной практики, call-центров и цифровых сервисов с использованием ИИ [25] – это необходимые условия обеспечения доступности информации о налоговой системе. Критериями налоговой безопасности плательщика в данном случае являются понятность системы, доступность трактовки норм для неспециалистов, отсутствие противоречий в законодательстве и автоматизация процессов (например, префайлинг).

Общая характеристика структурного блока налоговой системы представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Структурный блок налоговой системы

	Элемент	Описание
1	Перечень налогов	Признаки – обязательность, законность, безэквивалентность и др.
		Законодательное закрепление (НК РФ и другие нормативные документы)
2	Элементы налогов	Обязательные – объект, база, ставка, сроки
		Факультативные (например, льготы)
3	Группировка налогов	
3.1	По субъектам	Организации, ИП, физлица
3.2	По режимам	Общая система налогообложения, УСН и др.
3.3	По уровню управления	Общегосударственные (федеральные), региональные, местные
3.4	По источнику уплаты	Себестоимость, прибыль, оборот
3.5	По сложности влияния	Моносложные, многосложные
3.6	По регулярности	Регулярные, разовые
3.7	По возможности манипуляции	Гибкие, жесткие
4	Международные аспекты	Классификация по юрисдикциям
5	Информационная доступность	Базы законодательства, судебная практика
		Цифровые сервисы с ИИ

Примечание – Источник: собственная разработка.

Поведенческий блок налоговой системы

Принятие эффективных управленческих решений в области налогообложения предполагает адаптацию плательщика к изменяющимся условиям. Методология принятия рациональных решений строится на оценке налоговой системы с позиций динамизма и срочности. Характеристики, отражающие динамизм и срочность налоговой системы, формируют **поведенческий блок**, который складывается из следующих аспектов – изменчивости налоговой системы, сроков изменений, вносимых в налоговое законодательство, и процедуры внесения изменений.

Эволюционное развитие налоговой системы предполагает внесение изменений в перечень взимаемых налогов и сборов и преобразование отдельных элементов налоговой системы. На макроуровне это может иметь цель увеличения налоговой нагрузки или усиления стимулирующей роли налогообложения, гибкого реагирования налоговой политики в ответ на потребности государства, выявления пробелов и неточностей, внедрения цифровых технологий. На микроуровне само предприятие тоже выступает инкубатором изменений. При этом плательщики, осуществляя налоговое администрирование, основываются на знании условий и периодичности корректировки налогового законодательства, наличии временного лага между утверждением нововведений и их вступлением в силу. Реакция плательщика на динамизм налоговой системы основывается на глубоком изучении изменений и последующем пересмотре целесообразности применяемых методов, уточнении инструментов воздействия на величину налогового обязательства. Такой адапционный шаг позволяет стать элементом налоговой стратегии эффективно действующего субъекта хозяйствования.

Налоговое обязательство формируется в пределах заданных налоговым законодательством временных периодов. Момент возникновения объекта обложения, начало и окончание действия налоговых льгот имеют тесную связь с временным отрезком, в течение которого определяется налоговая база, и последующим за этим

отрезком уплаты налогового платежа. Определение показателей, отражающих результативность важных для плательщика действий, также ограничено этим диапазоном. Субъект хозяйствования использует данную информацию для прогнозирования возможных изменений и выработки приемлемых мер. Длительность действия документа, регламентирующего отдельные стороны налоговых отношений, влияет на эффективность рассматриваемого варианта оптимизации налоговых платежей, его адаптацию и повторение. Поэтому в условиях изменчивости налогового законодательства осведомленность о сроках вступления в силу вносимых изменений, срочности правовой силы нормативного акта и другие схожие аспекты приобретает особую роль для налогового стратегирования.

Знание процедурных аспектов налогового администрирования позволяет влиять на принятие уполномоченными органами налоговых решений и находить консенсус в налоговых вопросах. В таком контексте актуальными становятся исследования важной роли социальных макрогрупп в принятии финансовых правил. Под социальными макрогруппами «...понимается объединение людей со специфической ролью в экономической деятельности, ориентированное на реализацию групповых и личных интересов членов социальной группы с использованием формальных и неформальных норм (институтов), обладающее влиянием, которое позволяет ему участвовать в определении специфики монетарной, фискальной и институциональной политики...» [26, С. 19–20]. Такими социальными макрогруппами могут выступать плательщики в форме различного рода объединений и союзов (по отраслевому, территориальному, организационному или иному признаку), способных обеспечивать себе более выгодные условия функционирования путем внесения обоснованных рекомендаций по изменению налогового законодательства. Это может реализовываться через выступления в средствах массовой информации, проведение пресс-конференций с ведущими экономистами, ведение социальных страниц. Краткая характеристика поведенческого блока налоговой системы представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Поведенческий блок налоговой системы

Элемент	Описание
1. Основные аспекты	
1.1. Динамизм системы	Частота изменений законодательства, гибкость налоговой политики. Реакция плательщиков на корректировку налоговых механизмов
1.2. Срочность изменений	Временной лаг между утверждением и вступлением в силу изменений. Длительность действия нормативных актов (например, льгот)
1.3. Процедура изменений	Законодательные инициативы государства. Роль социальных макрогрупп (лоббирование, отраслевые союзы) в принятии решений
2. Уровни адаптации	
2.1. Макроуровень	Цели государства: изменение налоговой нагрузки, стимулирование роста, цифровизация. Инструменты: введение новых налогов, корректировка ставок/льгот
2.2. Микроуровень	Действия плательщиков: мониторинг изменений, пересмотр налоговой стратегии, использование временного лага для адаптации
3. Временные параметры	
3.1. Сроки обязательств	Определение налоговой базы, период действия льгот. Прогнозирование цикличности изменений и рисков досрочного прекращения льгот
3.2. Временные ограничения	Сроки уплаты налогов, длительность действия нормативных актов
4. Взаимодействие с группами	
4.1. Формы объединений	Отраслевые, территориальные союзы, лоббистские группы
4.2. Механизмы влияния	Публичные инициативы (СМИ, пресс-конференции), участие в разработке законопроектов
5. Алгоритм адаптации	
5.1. Анализ изменений	Изучение нововведений, оценка налоговых последствий для бизнеса
5.2. Корректировка стратегии	Выбор новых инструментов оптимизации, пересмотр методов налогового планирования
5.3. Коммуникация с регуляторами	Участие в обсуждении законопроектов, использование префайлинга для минимизации споров

Примечание – Источник: собственная разработка.

Функциональный блок налоговой системы

Функциональный блок налоговой системы представляет собой комплекс механизмов и характеристик, определяющих практическую роль налогов в экономике, включая реализацию основных функций налогов (фискальную, регулятивную, антициклическую и др.), инструменты регулирования, правовые аспекты, адаптивность системы.

Основная задача функционального блока – обеспечение баланса между интересами государства (пополнение бюджета, контроль) и интересами плательщиков (минимизация рисков, легальная оптимизация).

Исследование этого блока налоговой системы проведено нами по следующим направлениям – функциональная направленность налоговой системы, правовое регулирование налоговой оптимизации, налоговые санкции.

Концепция многофункциональности налогов предполагает признание налоговой системе фискального предназначения, а также функции регулятора уровня социально-экономического развития и антициклического стабилизатора.

Так, налоговая система, характеризующаяся высокой долей налогового финансирования бюджетных расходов, перераспределением через налоги значительной части общественного продукта, преобладанием косвенных налогов в структуре налоговой нагрузки, свидетельствует о выполнении налогами в первую очередь своего первоначального фискального назначения. В таких условиях законопослушные плательщики вынуждены прибегать к всевозможным легальным способам сокращения налогового бремени и проявлять повышенную инициативу в русле разработки правил стратегического поведения для нивелирования чрезмерного государственного вмешательства в распределение полученных доходов. Плательщики должны также оценивать налоговую нагрузку на этапе открытия бизнеса. На этом этапе целесообразна страновая оценка налоговой нагрузки, сравнение налоговой нагрузки по отраслям экономики. В настоящее время национальные налоговые системы влияют на международные процессы. Результат налоговой конкуренции является налоговой стандартизацией не только в области косвенного налогообложения, но и в отношении корпоративного налога, по которому отдельными странами подписано соглашение о минимальной ставке корпоративного налога. Таким образом, государство использует налоги для фискальных целей, в ответ на это бизнес адаптируется через налоговое планирование на микроуровне. Глобализация усиливает конкуренцию между юрисдикциями, реакцией на которую является межстрановая координация политики для снижения рисков.

Важным фактором финансовой стабильности плательщиков может выступать налоговая система, предусматривающая значительные налоговые льготы, направленные на решение социальных, экологических, демографических задач, стимулирование развития важных для государства видов экономической деятельности. Несмотря на негативную коннотацию налоговых льгот и наметившуюся тенденцию к сокращению их масштабов, налоговые преференции могут являться важным инструментом повышения привлекательности бизнеса.

Следует также учитывать, что налоговые льготы зависят от макроэкономического контекста. Например, в условиях стабильности государство может расширять льготы для стимулирования инвестиций, тогда как в период кризиса их объем часто сокращается. Функциональная направленность налоговой системы проявляется по-разному в условиях макроэкономической стабильности и в условиях кризисных явлений. Логично, что степень выполнения налогами своих функций, способы их реализации имеют особенности в различных макроэкономических условиях, зависят от экономического, природно-технологического уровня страны, налогового потенциала плательщиков и учитывают специфику налогового администрирования. В совокупности эти обстоятельства сказываются на принятии плательщиком типа налоговой стратегии. Например, в рамках фискальной налоговой системы с высокими ставками и минимумом льгот плательщик вынужден выбирать оптимизационную стратегию, то есть использовать все легальные методы снижения нагрузки, включая налоговые вычеты и иногда даже офшоринг. И напротив, если государство проводит политику поддержки бизнеса, то есть снижает налоги, вводит льготы для приоритетных отраслей экономики, то компании чаще выбирают стабилизирующую налоговую стратегию и фокусируются на долгосрочном планировании и сохранении текущей налоговой нагрузки.

Относительно правового регулирования налоговой оптимизации следует отметить, что в течение последних десятилетий проблема борьбы с уклонением от налогов стала особенно актуальной. Государства на национальном и международном уровне принимают законы, направленные на предотвращение потерь бюджета из-за нелегальной минимизации налогов со стороны плательщиков. В этом отношении стоит привести пример проекта BEPS в рамках инициативы OECD [29].

Четкие и ясные правовые механизмы повышают прозрачность проверок и эффективность администрирования, а также снижают риски необоснованных претензий к плательщикам. Важно отметить

неоднозначность таких понятий, как «деловая цель» или «добросовестность плательщика». Так, отсутствие четких критериев «необоснованной налоговой выгоды» позволяет налоговым органам трактовать законность действий налогоплательщиков произвольно, что создает риски для ведения бизнеса. Эта проблема усугубляется асимметрией информации, наблюдающейся во взаимоотношениях «плательщик – налоговые органы». Плательщик владеет полными данными о своей деятельности, в то время как налоговые органы вынуждены полагаться прежде всего на документацию и отчетность. Должны быть предусмотрены правовые инструменты защиты интересов плательщиков (например, презумпция добросовестности налогоплательщика). В любом случае окончательная оценка правомерности действий налогоплательщика всегда требует тщательного анализа конкретных условий.

Применяемая во всех странах мира система мер ответственности за нарушение законодательства является одним из способов принуждения к исполнению конституционной обязанности налогоплательщика участвовать в финансировании государственных расходов. Причины непреднамеренного и преднамеренного налогового нарушения могут быть различными. Непреднамеренное нарушение налоговых норм может быть вызвано недостаточной информированностью плательщика, низким уровнем квалификации работника. Что касается преднамеренного оппортунизма в налоговой сфере, то результаты исследования ученых доказывают его связь с проводимой финансовой политикой государства, вероятностью аудита, налоговыми ставками, уровнем налоговой культуры, наличием институциональных ограничений, личностными характеристиками плательщика и другими экономическими и неэкономическими факторами [27, 28]. Часто происходит размывание границ между оптимизацией налогов и нарушением налоговой дисциплины, что приводит к налоговым санкциям в отношении плательщика. Для эффективного налогового управления плательщик должен взвешивать, с одной стороны, риски (вероятность наказания, размер санкций, тип ответственности), транзакционные издержки (оплата консультантов, документация, трудозатраты) и, с другой стороны, ожидаемую выгоду (экономии на налогах, снижении налоговой нагрузки).

Следует также отметить, что значительное повышение степени ответственности за налоговые нарушения может привести к негативному эффекту, прежде всего к уходу бизнеса в теневой сектор. Субъекты хозяйствования, ориентированные на высокие доходы от использования схем оптимизации налогов и имеющие более широкие возможности для этого (крупные, многопрофильные, транснациональные компании), как правило, принимают более высокие налоговые риски, связанные в том числе с рисками доначисления налогов. При этом крупные плательщики, у которых размер доначислений обычно выше, становятся ключевым объектом налогового контроля. Это повышает эффективность проверок, так как позволяет органам концентрировать ресурсы на значимых случаях. Налоговые органы могут повышать уровень их ответственности, в связи с чем крупные бизнес-игроки могут на основе изменения соотношения «доход-риск» вносить изменения в свои налоговые стратегии. Мелкие плательщики в условиях высоких рисков доначисления с низким потенциалом получения дохода будут опасаться использовать сомнительные, по их мнению, варианты оптимизации. Плательщики с высокими рисками потерь оборотных средств могут просто отказываться от возможностей налоговой стратегии. Тогда крупные плательщики либо недобросовестные плательщики, идущие на определенный риск, получают преимущества от внедрения налогового стратегирования.

В этом блоке большое значение имеет изучение процедуры реализации прав и обязанностей субъектов налоговых отношений, а также порядок обжалования актов и действий налоговых органов со стороны плательщика. Краткая характеристика функционального блока налоговой системы представлена в таблице 3.

Каждая из рассматриваемых сторон налоговой системы характеризует ее отдельный компонент, но при этом они взаимосвязаны. Структурный компонент создает основу для налогового планирования, поведенческий определяет реакцию плательщиков на динамику законодательства, а функциональный обеспечивает выполнение целей налоговой системы через взаимодействие государства и бизнеса.

Таблица 3 – Функциональный блок налоговой системы

Элемент	Описание
1. Функциональная направленность	
1.1. Фискальная функция	Обеспечение финансирования бюджетных расходов. Преобладание косвенных налогов в структуре нагрузки
1.2. Регулятивная функция	Стимулирование социально-экономического развития через льготы (экология, инвестиции, МСП). Антициклическое регулирование (стабилизация экономики)
1.3. Социальная функция	Перераспределение доходов, поддержка социальной сферы через целевые налоги (например, экологические сборы)
2. Правовое регулирование оптимизации	
2.1. Критерии легальности	Четкость понятий «добросовестность плательщика» и «необоснованная налоговая выгода». Презумпция добросовестности (например, в Республике Беларусь и Российской Федерации)
2.2. Международные инициативы	Гармонизация налоговых правил между юрисдикциями
3. Налоговые санкции и риски	
3.1. Виды ответственности	Штрафы, пени, уголовная ответственность за нарушения. Риски доначисления налогов
3.2. Факторы нарушений	Непреднамеренные (незнание законов) и преднамеренные (оппортунизм). Влияние налоговых ставок, вероятности аудита, налоговой культуры
4. Баланс интересов	
4.1. Государство-плательщик	Соотношение фискальных целей (бюджет) и минимизации рисков бизнеса. Роль цифровизации (ИИ, префайлинг) в снижении асимметрии информации
4.2. Макроэкономический контекст	Зависимость льгот от экономической стабильности (расширение в стабильности, сокращение в кризис). Влияние на выбор стратегии (оптимизационная/стабилизирующая)
5. Процедуры взаимодействия	
5.1. Защита прав плательщиков	Порядок обжалования решений налоговых органов. Использование судебной практики и экспертных заключений
5.2. Цифровые инструменты	Внедрение ИИ-сервисов, автоматизация расчетов и отчетности для повышения прозрачности

Примечание – Источник: собственная разработка.

Заключение

Проведённое исследование позволило выделить три ключевых блока, определяющих функционирование налоговой системы и формирующих основу для разработки налоговых стратегий организаций.

Структурный блок, включающий классификацию налогов по источникам уплаты, регулярности и возможности манипуляции, служит фундаментом для налогового планирования. Например, разделение налогов на моносложные (например, налог на прибыль) и многосложные (НДС, акцизы) помогает бизнесу оценить мультипликативный эффект решений, а учет международных аспектов — минимизировать риски в условиях внешних шоков.

Поведенческий блок раскрывает роль динамизма налогового законодательства и срочности внедрения норм. Ключевым инструментом адаптации становится использование временного лага между принятием и вступлением в силу законов и норм (например, отсрочка реализации проектов до вступления в силу льготных режимов или оперативный пересмотр методов оптимизации после публикации новых правил). Участие плательщиков в законодательных инициативах через отраслевые ассоциации позволяет снижать риски неожиданных изменений.

Функциональный блок обеспечивает баланс между фискальными целями государства и интересами плательщиков. Четкость критериев «добросовестности» и «необоснованной выгоды», а также цифровизация налогового администрирования на основе префайлинга, ИИ-сервисов снижают асимметрию информации и конфликт интересов в налоговых отношениях.

Для плательщиков анализ трех блоков становится основой для выбора между оптимизационной и стабилизирующей налоговой стратегией. В условиях фискальной системы с высокими ставками становится выгодно оптимизация (офшоринг, налоговые вычеты), тогда как при поддержке бизнеса государством эффективнее долгосрочное планирование.

Учет исследованных в статье структурных, поведенческих и функциональных аспектов позволяет не только минимизировать риски организаций, но и трансформировать налоговое бремя в конкурентное преимущество на рынке.

Список цитированных источников

1. Вылкова, Е. С. Налоговое планирование: учебник для магистрантов / Е. С. Вылкова. – М. : Издательство Юрайт, 2011. – 639 с.
2. Дуканич, Л. В. Налоги и налоговый менеджмент в России / Л. В. Дуканич. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 605 с.
3. Барулин, С. В. Налоговый менеджмент: учебник / С. В. Барулин, Е. А. Ермакова, В. В. Степаненко. – М. : Дашков и К*, 2012. – 332 с.
4. Налоговые реформы. Теория и практика: монография для магистрантов / под ред. И. А. Майбутова, Ю. Б. Иванова. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2020. – 463 с.
5. Лукаш, Ю. А. Как законно уменьшить налоги фирмы. Плюсы и минусы различных схем налоговой оптимизации / Ю. А. Лукаш. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : ГроссМедиа : РОСБУХ, 2008. – 568 с.
6. Лукаш, А. Ю. Налоговое планирование как составляющая обеспечения безопасности и развития бизнеса : учебное пособие / Ю. А. Лукаш. – М. : ФЛИНТА, 2022. – 97 с.
7. Налоги и налогообложение : учебник для академического бакалавриата / под ред. М. В. Романовского, Н. Г. Ивановой. – М. : Издательство Юрайт, 2016. – 441 с.
8. Самитов, М. С. Налоги: оптимизируй или умри / М. С. Самитов. – М. : Феникс, 2022. – 271 с.
9. Мясников, О. А. Способы оптимизации налоговой нагрузки на бизнес / О. А. Мясников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : АйСи Групп, 2024. – 336 с.
10. Чудаков, А. В. Формирование системы налогового менеджмента на промышленном предприятии : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / А. В. Чудаков. – Екатеринбург, 2001. – 232 л.
11. Сергеева, Т. Ю. Методы и схемы оптимизации налогообложения / Т. Ю. Сергеева. – М. : Экзамен, 2015. – 285 с.
12. Налоговое планирование в бизнесе / под ред. Ф. Н. Филиной. – М. : ГроссМедиа: РОСБУХ, 2008. – 336 с.
13. Василевская, Т. И. Налогообложение организаций и оптимизация налоговых платежей: учеб.-метод. пособие / Т. И. Василевская. – Минск : Тетра-Системс, 2011. – 80 с.
14. Заяц, Н. Е. Теория налогов: учебник / Н. Е. Заяц. – Минск : Белорус. гос. экон. ун-т, 2002. – 220 с.
15. Киреева, Е. Ф. Налоги и налогообложение : учеб. пособие / Е. Ф. Киреева ; под ред. Е. Ф. Киреева. – Минск : Белорус. гос. экон. ун-т, 2012. – 447 с.

16. Лукьянова, И. А. Налоговая стратегия современного государства: теория, методология, практика : автореф. дис. ... д-ра экон. наук : 08.00.10 / И. А. Лукьянова ; Бел. гос. экон. ун-т. – Минск, 2022. – 51 с.
17. Лукьянова, И. А. Налоговые аспекты коммерциализации объектов интеллектуальной собственности в концепции трансфертного ценообразования / И. А. Лукьянова // Бел. экон. журнал. – 2024. – № 4. – С. 73–82.
18. Никитенко, П. Г. Антикризисная модель жизнедеятельности Беларуси / П. Г. Никитенко. – Минск : Право и экономика, 2009. – 377 с.
19. Шмарловская, Г. А. Бюджетно-налоговое регулирование / Г. А. Шмарловская. – Минск : Беларус. гос. экон. ун-т, 2001. – 80 с.
20. Социально-экономическая модель: становление и развитие: теория, методология, практика : в 2 кн. / под общ. ред. В. Г. Гусакова ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т экономики. – Минск : Беларус. навука, 2015. – Кн. 1. – 554 с.
21. Майбуров, И. А. Теория налогообложения. Продвинутый курс: учебник / И. А. Майбуров, А. М. Соколовская. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2020. – 591 с.
22. Дадалко, В. А. Налогообложение в системе международных экономических отношений: учеб. пособие / В. А. Дадалко, Е. Е. Румянцев, Н. Н. Демчук. – Минск : Армита – Маркетинг. Менеджмент, 2000. – 359 с.
23. Пригодич, И. А. Теоретические аспекты современных экосистем финансового сектора экономики / И. А. Пригодич // Экономика и банки. – 2024. – № 1. – С. 23–29.
24. Мировые финансы : учеб. пособие / И. Н. Жук, Н. С. Ананенко, Н. В. Годес [и др.]. – Минск : ИВЦ Минфина, 2022. – 376 с.
25. Wang, Xu. The main trends in the digital economy and finance that shape the current landscape and vector of development of industries / Wang Xu, A. V. Kievich // Экономика и банки. – 2024. – № 1. – С. 42–51.
26. Макроэкономические аспекты обеспечения сбалансированности национальной экономики / А. И. Лученок, О. Л. Шулейко, Е. В. Преснякова [и др.]; под общ. ред. А. И. Лученка. – Минск : Беларус. навука, 2015. – 371 с.
27. Уклонение от уплаты налогов. Проблемы и решения: монография для магистрантов, обучающихся по программам направления «Финансы и кредит» / И. А. Майбуров, Ю. Б. Иванов, Н. Н. Башкирова [и др.]; под ред. И. А. Майбурова, А. П. Киреев, Ю. Б. Иванова. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2018. – 383 с.
28. Майбуров, И. А. Факторы налогового поведения в сфере подоходного налогообложения / И. А. Майбуров, Ю. Е. Лабунец // Бел. экон. журнал. – 2021. – № 2. – С. 5–13.
29. Шелепов, А. В. Проект BEPS: глобальное сотрудничество в сфере налогообложения / А. В. Шелепов // Вестник международных организаций. – 2016. – Т. 11, № 4. – С. 36–59. – URL: <https://iorj.hse.ru/2016-11-4/198185128.html> (дата обращения: 12.03.2025).
8. Samitov, M. S. Nalogi: optimiziruj ili umri / M. S. Samitov. – M. : Feniks, 2022. – 271 s.
9. Myasnikov, O. A. Sposoby optimizacii nalogovoj nagruzki na biznes / O. A. Myasnikov. – 2-e izd., pererab. i dop. – M. : AjSi Grupp, 2024. – 336 s.
10. CHudakov, A. V. Formirovanie sistemy nalogovogo menedzhmenta na promyshlennom predpriyatii : dis. ... kand. ekon. nauk : 08.00.05 / A. V. CHudakov. – Ekaterinburg, 2001. – 232 l.
11. Sergeeva, T. YU. Metody i skhemy optimizacii nalogooblozheniya / T. YU. Sergeeva. – M. : Ekzamen, 2015. – 285 s.
12. Nalogovoe planirovanie v biznese / pod red. F. N. Filinoy. – M. : GrossMedia: ROSBUH, 2008. – 336 s.
13. Vasilevskaya, T. I. Nalogooblozhenie organizacii i optimizaciya nalogovykh platezhej: ucheb.-metod. posobie / T. I. Vasilevskaya. – Minsk : Tetra-Sistems, 2011. – 80 s.
14. Zayac, N. E. Teoriya nalogov: uchebnik / N. E. Zayac. – Minsk : Belorus. gos. ekon. un-t, 2002. – 220 s.
15. Kireeva, E. F. Nalogi i nalogooblozhenie : ucheb. posobie / E. F. Kireeva ; pod red. E. F. Kireeva. – Minsk : Belorus. gos. ekon. un-t, 2012. – 447 s.
16. Luk'yanova, I. A. Nalogovaya strategiya sovremennogo gosudarstva: teoriya, metodologiya, praktika : avtoref. dis. ... d-ra ekon. nauk : 08.00.10 / I. A. Luk'yanova ; Bel. gos. ekon. un-t. – Minsk, 2022. – 51 s.
17. Luk'yanova, I. A. Nalogovye aspekty kommercializacii ob'ektov intellektual'noj sobstvennosti v koncepcii transfertnogo cenoobrazovaniya / I. A. Luk'yanova // Bel. ekon. zhurnal. – 2024. – № 4. – С. 73–82.
18. Nikitenko, P. G. Antikrizisnaya model' zhiznedeyatel'nosti Belarusi / P. G. Nikitenko. – Minsk : Pravo i ekonomika, 2009. – 377 s.
19. SHmarlovskaya, G. A. Byudzhetho-nalogovoe regulirovanie / G. A. SHmarlovskaya. – Minsk : Belorus. gos. ekon. un-t, 2001. – 80 s.
20. Social'no-ekonomicheskaya model': stanovlenie i razvitie: teoriya, metodologiya, praktika : v 2 kn. / pod obsch. red. V. G. Gusakova ; Nac. akad. nauk Belarusi, In-t ekonomiki. – Minsk : Belarus. navuka, 2015. – Kn. 1. – 554 s.
21. Majburov, I. A. Teoriya nalogooblozheniya. Prodvinutyj kurs: uchebnik / I. A. Majburov, A. M. Sokolovskaya. – M. : YUNITI-DANA, 2020. – 591 s.
22. Dadalko, V. A. Nalogooblozhenie v sisteme mezhdunarodnykh ekonomicheskikh otnoshenij: ucheb. posobie / V. A. Dadalko, E. E. Rummyanceva, N. N. Demchuk. – Minsk : Armita – Marketing. Menedzhment, 2000. – 359 s.
23. Prigodich, I. A. Teoreticheskie aspekty sovremennykh ekosistem finansovogo sektora ekonomiki / I. A. Prigodich // Ekonomika i banki. – 2024. – № 1. – С. 23–29.
24. Mirovye finansy : ucheb. posobie / I. N. ZHuk, N. S. Ananenkov, N. V. Godes [i dr.]. – Minsk : IVC Minfina, 2022. – 376 s.
25. Wang, Xu. The main trends in the digital economy and finance that shape the current landscape and vector of development of industries / Wang Xu, A. V. Kievich // Ekonomika i banki. – 2024. – № 1. – С. 42–51.
26. Makroekonomicheskie aspekty obespecheniya sbalansirovannosti nacional'noj ekonomiki / A. I. Luchenok, O. L. SHulejko, E. V. Presnyakova [i dr.]; pod obsch. red. A. I. Luchenka. – Minsk : Belarus. navuka, 2015. – 371 s.
27. Uklonenie ot uplaty nalogov. Problemy i resheniya: monografiya dlya magistrantov, obuchayushchih'sya po programmam napravleniya «Finansy i kredit» / I. A. Majburov, YU. B. Ivanova, N. N. Bashkirova [i dr.]; pod red. I. A. Majburova, A. P. Kireenkov, YU. B. Ivanova. – M. : YUNITI-DANA, 2018. – 383 s.
28. Majburov, I. A. Faktory nalogovogo povedeniya v sfere podohodnogo nalogooblozheniya / I. A. Majburov, YU. E. Labunec // Bel. ekon. zhurnal. – 2021. – № 2. – С. 5–13.
29. SHelepov, A. V. Proekt BEPS: global'noe sotrudnichestvo v sfere nalogooblozheniya / A. V. SHelepov // Vestnik mezhdunarodnykh organizacij. – 2016. – Т. 11, № 4. – С. 36–59. – URL: <https://iorj.hse.ru/2016-11-4/198185128.html> (data obrashcheniya: 12.03.2025).

References

1. Vylkova, E. S. Nalogovoe planirovanie: uchebnik dlya magistrantov / E. S. Vylkova. – M. : Izdatel'stvo YUrajt, 2011. – 639 s.
2. Dukanich, L. V. Nalogi i nalogovyy menedzhment v Rossii / L. V. Dukanich. – Rostov n/D : Feniks, 2008. – 605 s.
3. Barulin, S. V. Nalogovyy menedzhment: uchebnik / S. V. Barulin, E. A. Ermakova, V. V. Stepanenko. – M. : Dashkov i K*, 2012. – 332 s.
4. Nalogovye reformy. Teoriya i praktika: monografiya dlya magistrantov / pod red. I. A. Majburova, YU. B. Ivanova. – M. : YUNITI-DANA, 2020. – 463 s.
5. Lukash, YU. A. Kak zakonno umen'shit' nalogi firmy. Plyusy i minusy razlichnykh skhem nalogovoy optimizacii / YU. A. Lukash. – 6-e izd., pererab. i dop. – M. : GrossMedia : ROSBUH, 2008. – 568 s.
6. Lukash, A. YU. Nalogovoe planirovanie kak sostavlyayushchaya obespecheniya bezopasnosti i razvitiya biznesa : uchebnoe posobie / YU. A. Lukash. – M. : FLINTA, 2022. – 97 s.
7. Nalogi i nalogooblozhenie : uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata / pod red. M. V. Romanovskogo, N. G. Ivanovoy. – M. : Izdatel'stvo YUrajt, 2016. – 441 s.

Материал поступил 29.01.2025, одобрен 15.06.2025, принят к публикации 16.06.2025

УДК 330.342

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНОГО ДЕФИЦИТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРСОНАЛА

О. Ю. Лукашкова¹, М. К. Жудро²

¹ Аспирант, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: o.lukashkova@mail.ru

² Д. э. н., профессор, профессор кафедры экономики и логистики, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: nv_mk@bntu.by

Реферат

Данная статья посвящена разработке методики анализа структурного дефицита использования персонала в организациях различных отраслей. В работе рассматриваются основные подходы к выявлению и оценке неэффективных аспектов распределения и использования кадровых ресурсов, а также их влияние на производительность и финансовые показатели предприятия. Авторы предлагают системный подход, включающий сбор и обработку данных о структуре персонала, анализе факторов, ограничивающих эффективное использование сотрудников. Структурный дефицит может проявляться в недостатке квалифицированных специалистов, неэффективном распределении задач или избыточном количестве сотрудников в определенном подразделении. Особое внимание уделяется методам количественного анализа, таким как расчет коэффициентов использования персонала. Практическая ценность работы заключается в возможности применения предложенной методики для повышения эффективности управления человеческими ресурсами, снижения издержек и повышения конкурентоспособности организации. В целом статья способствует развитию методов оценки и оптимизации использования персонала, что важно для стратегического планирования и повышения операционной эффективности предприятий различных сфер деятельности.

Статья будет полезна руководителям организаций, специалистам по управлению персоналом и исследователям в области трудовых отношений, стремящимся повысить эффективность работы своих команд и улучшить организационную структуру.

Ключевые слова: структурный дефицит, персонал, коэффициент текучести персонала, эффективность, методы анализа, оптимизация.

METHODOLOGY OF STUDYING STRUCTURAL DEFICIT OF STAFF USE

O. Y. Lukashkova, M. K. Zhudro

Abstract

This article is devoted to the development of a methodology for analyzing the structural deficit in the use of personnel in organizations in various industries. The paper considers the main approaches to identifying and assessing ineffective aspects of the distribution and use of human resources, as well as their impact on the productivity and financial performance of the enterprise. The authors propose a systematic approach that includes data collection and processing. On the structure of personnel, analysis of factors limiting the effective use of employees. Structural deficit can manifest itself in a lack of qualified specialists, ineffective distribution of tasks or an excess of employees in a particular department. Particular attention is paid to quantitative analysis methods, such as calculating personnel utilization rates. The practical value of the work lies in the possibility of applying the proposed methodology to improve the efficiency of human resource management, reduce costs and increase the competitiveness of the organization. In general, the article contributes to the development of methods for assessing and optimizing the use of personnel, which is important for strategic planning and improving the operational efficiency of enterprises in various fields of activity.

The article will be useful for executives of organizations, HR specialists and researchers in the field of labor relations seeking to improve the efficiency of their teams and improve the organizational structure.

Keywords: structural deficit, personnel, personnel turnover rate, efficiency, analysis methods, optimization.

Введение

В условиях динамично развивающейся экономики и постоянных изменений на рынке труда проблема структурного дефицита использования персонала становится все более актуальной. Особенно это касается таких отраслей, как транспорт, где квалифицированные кадры играют ключевую роль в обеспечении эффективной работы и конкурентоспособности организаций. Структурный дефицит кадров может проявляться в недостаточном количестве специалистов определенных профессий, а также в несоответствии квалификаций работников современным требованиям и вызовам отрасли.

Методика исследования структурного дефицита использования персонала направлена на выявление причин и последствий данной проблемы, а также на разработку рекомендаций по ее преодолению. В рамках исследования будут рассмотрены различные аспекты, включая анализ потребностей в кадрах, оценку квалификаций существующего персонала и выявление факторов, способствующих дефициту.

Цель данной статьи – представить методический подход к исследованию структурного дефицита, требующийся для оптимизации использования кадрового потенциала компании. В результате исследования предполагается разработка комплексного подхода, который позволит не только выявить существующие проблемы, но и предложить эффективные решения для их устранения, что в конечном итоге приведет к повышению эффективности работы организаций в транспортной сфере.

Исследование эффективности использования структуры персонала

Если рассмотреть понятие структурного дефицита на макроуровне, то можно сказать, что структурный дефицит – это состояние, при котором в экономике или системе наблюдается несоответствие между предложением и спросом либо между ресурсами и потребностями, происходящее на постоянной основе. Это явление может возникать в различных контекстах, включая бюджетное планирование, рынок труда [8], производство и другие сферы. Нести в себе экономический контекст, например, долгосрочные обязательства, социальные программы и т. д. Причинами такого дефицита могут быть изменения в технологиях, изменения в спросе, политические и экономические факторы. Все эти факторы на макроуровне приводят к экономической нестабильности, финансовым проблемам и имеют социальные последствия в виде высокого уровня безработицы, социального недовольства, увеличению преступности и снижению уровня жизни.

При изучении этой проблемы можно сделать вывод, что структурный дефицит – это ситуация, когда на рынке труда наблюдается несоответствие между спросом и предложением рабочей силы, что может быть вызвано различными факторами, такими как изменения в экономике, технологические инновации, демографические изменения и др. Для решения этой проблемы на макроуровне

можно использовать такие методы, как образование и подготовка кадров через модернизацию образовательных программ, создание курсов и тренингов для работников, которые хотят сменить профессию или повысить квалификацию; стимулирование миграции рабочей силы – упрощение визовых миграционных процедур для квалифицированных работников из других стран; поддержка предпринимательства; государственные программы – создание временных рабочих мест, поддержка молодежи; улучшение условий труда; анализ прогнозирования потребностей в рабочих кадрах [18, 20]. Эти методы можно использовать в комплексе для решения проблемы, что в свою очередь может способствовать экономическому росту и развитию общества [10, 15].

Дальнейшее исследование приводит к тому, что структурный дефицит в организации – это ситуация, когда в компании наблюдается нехватка квалифицированных работников, необходимых для выполнения определенных задач или достижения стратегических целей. Этот дефицит может возникать по различным причинам, включая изменения в технологиях, требованиях к квалификации, а также внутренние и внешние факторы. Структурный дефицит персонала в организации может возникать по различным причинам и иметь серьезные последствия для функционирования и развития организации.

Изменения в технологиях и методах работы, устаревание навыков, сотрудники могут не успевать за изменениями в отрасли, демография, неправильное планирование кадров, конкуренция на рынке труда – все это причины структурного дефицита персонала в организациях [6]. Решить эти проблемы можно при помощи анализа кадров, внедрения программ обучения для существующих сотрудников, создания систем менторства, привлечения новых талантов (привлекательные условия труда, использование различных каналов рекрутинга), гибких форм занятости, стимулирования внутреннего перемещения, внедрения систем управления талантами и аналитики данных для более эффективного управления персоналом и прогнозирования потребностей, адаптации рабочих мест. Важно не только привлекать новых сотрудников, но и удерживать существующих, создавая условия для их профессионального роста и удовлетворенности работой.

Структурный дефицит персонала [5] в транспортно-логистической компании может проявляться в различных формах, в зависимости от специфики бизнеса и текущих рыночных условий. Например, транспортно-логистическая компания сталкивается с дефицитом квалифицированных водителей грузовых автомобилей. Это может быть вызвано несколькими факторами: 1) увеличение объема перевозок, что требует большего числа водителей; 2) устаревание навыков у существующих водителей, которые не знакомы с новыми технологиями (например, системами GPS, электронными тахографами и т. д.); 3) высокая текучесть кадров, когда водители переходят в другие компании, предлагающие лучшие условия труда.

Или, например, нехватка специалистов по логистике. Компания испытывает трудности с наймом специалистов по логистике (менеджеров по цепям поставок или аналитиков); увеличением сложности логистических процессов из-за глобализации и роста объемов международных перевозок; нехваткой квалифицированных кадров на рынке, так как многие специалисты предпочитают работать в других отраслях или в крупных международных компаниях.

Нехватка IT-специалистов в транспортно-логистической организации может возникнуть в связи с цифровизацией процессов и внедрением новых технологий (например, систем управления транспортом, автоматизации складов), компания сталкивается с нехваткой IT-специалистов, способных поддерживать и развивать эти системы [17].

Необходимость в квалифицированных специалистах возрастает, однако недостаток подготовки в этой области и высокая ответственность могут затруднять привлечение таких кадров. Сложность и специфика работы инженеров и технических специалистов требуют наличия специализированных знаний и навыков, быстрые изменения в технологиях также требуют постоянного обучения и повышения квалификации, что может быть не всегда доступно.

Структурный дефицит персонала в транспортно-логистической компании может существенно повлиять на эффективность работы

и конкурентоспособность бизнеса [9]. Важно выявлять причины дефицита и разрабатывать стратегии для его устранения, чтобы обеспечить стабильное развитие компании и удовлетворение потребностей клиентов.

Рост бизнеса или новые проекты могут требовать большего количества сотрудников, чем имеется в наличии. Недостаток квалифицированных сотрудников может привести к снижению общей эффективности работы команды и увеличению нагрузки на оставшихся работников. Неполные команды и высокая нагрузка могут способствовать выгоранию сотрудников и их уходу из компании. Нехватка специалистов может негативно сказаться на качестве продукции или услуг, что в свою очередь может повлиять на репутацию компании [11, 14].

Методами решения структурного дефицита персонала могут быть опять же внедрение программ повышения квалификации и обучения для существующих сотрудников, разработка эффективных стратегий рекрутинга и улучшение условий труда. Могут помочь привлечь квалифицированных специалистов и одно из самых важных решений – регулярный анализ потребностей в кадрах и планирование кадровой политики, который поможет избежать возникновения структурного дефицита в будущем.

Для достижения поставленных целей необходимо перейти от теоретических знаний к практическим шагам, определяющим исследовательский процесс. Методика исследования структурного дефицита использования персонала – это последовательность этапов, направленных на понимание существующей ситуации в организации и выявление путей оптимизации кадрового потенциала [7].

Текучесть кадров [1] обычно определяется как процентное соотношение количества работников, покинувших организацию, к общему числу сотрудников. Она позволяет только в определенной мере измерить стабильность кадров. Однако данная формула не позволяет проанализировать конкретные причины увольнений. По результатам такого анализа можно сделать вывод о нарушении дисциплины и для устранения проблем с повышенной текучестью обосновать и рекомендовать мероприятия по усилению качества отбора персонала при приеме на работу. Еще одна рекомендация – рассмотреть возможность повышения заработной платы рабочего персонала либо дать другие рекомендации руководству организации.

Коэффициент текучести персонала показывает, насколько высока сменяемость сотрудников и насколько стабильно кадровое обеспечение в организации. Коэффициент зависит прямопропорционально от числа сотрудников, уволенных по своему желанию, и числа сотрудников, уволенных по инициативе нанимателя, и может быть количественно определен с помощью формулы

$$КТП = (ЧСЖт + ЧСАт) \times 100\% / СЧПт, \quad (1)$$

где КТП – коэффициент текучести персонала;

ЧСЖт – число сотрудников, уволенных по своему желанию за расчетный период;

ЧСАт – число сотрудников, уволенных по инициативе администрации за расчетный период;

СЧПт – среднесписочная численность персонала за расчетный период.

Среднесписочная численность персонала за i -й месяц определяется по формуле

$$ЧCi = \sum_{i=m}^n \frac{ЧCi + (ЧCi - ЧСУi)}{2}, \quad (2)$$

где $ЧCi$ – численность списочная персонала i -го месяца;

ЧСУ i – численность уволенных i -го месяца.

Списочную численность за год (ЧСгод) узнаем по формуле

$$ЧСгод = \frac{\sum_{i=1}^{12} ЧCi}{12}. \quad (3)$$

Подставив нужные значения в формулу и рассчитав коэффициент текучести персонала (КТП), можно сформулировать вывод о критичности значения для предприятия данного коэффициента. Также можно сделать вывод о приемлемости данного значения для организации и говорить о наличии либо отсутствии определенных проблем с персоналом организации, о стабильности/не стабильности коллектива.

Пример расчета коэффициента текучести персонала (КТП) приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет коэффициента текучести персонала (КТП)

	2024 год			2023 год			2022 год		
	ЧСi	ЧСУi	ЧСi расчетная	ЧСi	ЧСУi	ЧСi расчетная	ЧСi	ЧСУi	ЧСi расчетная
январь	66	1	65,5	66	4	64,0	70	1	69,5
февраль	65	2	64,0	62	0	62,0	70	2	69,0
март	64	0	64,0	63	1	62,5	68	1	67,5
апрель	64	1	63,5	64	0	64,0	69	0	69,0
май	65	0	65,0	67	0	67,0	70	0	70,0
июнь	66	0	66,0	68	1	67,5	70	2	69,0
июль	68	1	67,5	72	2	71,0	69	0	69,0
август	70	1	69,5	74	0	74,0	70	0	70,0
сентябрь	69	0	69,0	72	2	71,0	70	0	70,0
октябрь	69	1	68,5	72	0	72,0	69	1	68,5
ноябрь	69	0	69,0	71	1	70,5	66	3	64,5
декабрь	70	1	69,5	70,0	6	67,0	67,0	2	66,0
ЧСУт, чел.	–	8,00	–	–	17,00	–	–	12,00	–
СЧПт, чел.	67,08	–	66,75	68,42	–	67,71	69,00	–	68,50
КТП, %			11,99			25,11			17,52

Зависимость коэффициента текучести персонала (КТП) напрямую зависит от числа уволенных сотрудников за период (ЧСУт) (рис.

сунук 1) и чем больше людей увольняется, тем выше будет этот коэффициент.

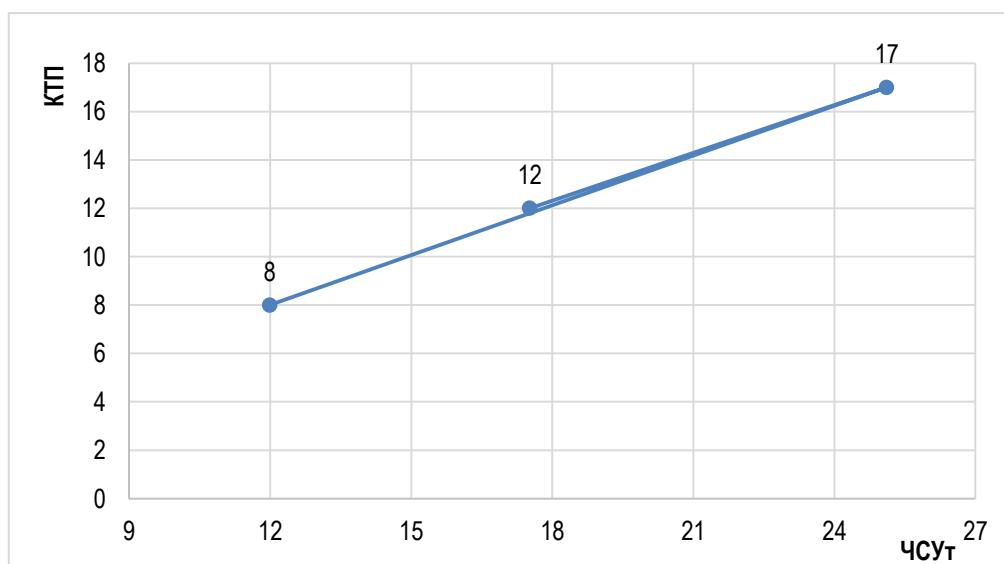


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента текучести персонала (КТП) от числа уволенных сотрудников за период (ЧСУт)

Анализ потребностей в кадрах – это систематический процесс, требующий сбора и анализа разнообразной информации. Результаты анализа помогут организации понять, какие шаги необходимо предпринять для оптимизации использования кадрового потенциала, а также обеспечат основу для разработки эффективной стратегии управления персоналом.

Коэффициент текучести кадров (КТП) измеряется в процентах, и его рейтинговая оценка может варьироваться в зависимости от отрасли, типа бизнеса и других факторов. Традиционно можно выделить некоторые общие ориентиры для оценки КТП: 0–5 % – низкий коэффициент текучести, указывает на высокую степень удовлетворенности сотрудников, стабильность в коллективе, что положительно сказывается на производительности и командном духе, в организации эффективны системы удержания кадров и благоприятные условия труда; 5–15 % – умеренный коэффициент текучести, может свидетельствовать о нормальной сменяемости, характерной для многих организаций, возможно наличие некоторых проблем, но они

не критичны, а также необходимость периодического анализа причин увольнений и улучшения условий труда; 15 % и выше – высокий коэффициент текучести, указывает на серьезные проблемы в компании, такие как неудовлетворенность сотрудников, низкая заработная плата, плохие условия труда или недостаток карьерного роста, говорит о необходимости пересмотра кадровой политики, улучшения условий труда и повышения уровня корпоративной культуры, может сигнализировать о необходимости более глубокого анализа причин текучести и разработки стратегий для ее снижения.

Прежде чем рассчитывать коэффициент текучести персонала, необходимо провести анализ потребностей в кадрах – это важный этап в исследовании структурного дефицита использования персонала. Этот процесс позволяет выявить, какие специалисты требуются организации в данный момент и в будущем, какие навыки и компетенции необходимы для достижения стратегических целей.

Мы же будем говорить о мультимодальной оценке коэффициента текучести персонала (КТП), которая подразумевает анализ не только

его абсолютных значений, но и распределения по различным категориям, таким как отделы, должности, возрастные группы сотрудников и т. д. Это позволит более глубоко понять динамику текучести и выявить специфические проблемы в разных сегментах организации.

Выделим несколько подходов к мультимодальной оценке КТП:

1. Анализ по отделам или подразделениям может выявить, где текучесть кадров выше или ниже среднего уровня, что поможет определить проблемные зоны, требующие внимания.

2. По должностям (например, руководящие, средний менеджмент, рабочие) может показать, где возникают наибольшие проблемы с удержанием сотрудников.

3. По возрастным и опытным группам или по стажу работы в компании может помочь понять, какие группы сотрудников более подвержены увольнениям и почему.

4. По причинам увольнения (например, по собственному желанию, по инициативе работодателя, выход на пенсию и т. д.) может дать более полное представление о факторах, влияющих на текучесть.

5. Сравнение с отраслевыми стандартами, сравнение с данными по аналогичным компаниям в отрасли может помочь оценить конкурентоспособность компании как работодателя.

6. Динамика во времени или изменение за несколько периодов (например, квартал или год) может показать тренды и помочь в прогнозировании будущих изменений.

Таким образом, мультимодальная оценка КТП позволит более детально и многогранно подойти к анализу текучести персонала, выявляя как общие тенденции, так и специфические проблемы, что в свою очередь помогает в разработке более эффективных стратегий управления персоналом.

Коэффициент текучести персонала (КТП) является одним из ключевых показателей, который предоставляет ценную информацию о состоянии кадрового управления в организации [4]. Причинами для его отслеживания и анализа может быть множество. Мы будем говорить о следующих:

1. Финансовые аспекты – расходы на рекрутинг и обучение, потеря доходов. Очевидно, что высокий коэффициент текучести влечет за собой значительные затраты на найм и обучение новых сотрудников. Каждое увольнение требует времени и ресурсов для поиска и обучения нового работника, а уход ключевых сотрудников может отрицательно сказаться на доходах компании, особенно если это приводит к снижению качества обслуживания клиентов или уменьшению эффективности работы команды.

2. Потеря знаний и опыта – упущенные возможности, время на адаптацию. Уход опытных сотрудников ведет к потере их знаний о процессах и культурных особенностях компании, что ограничивает возможности для дальнейшего развития, а новые кадры требуют времени на адаптацию, что может временно снизить общую продуктивность.

3. Удовлетворенность и моральный климат – влияние на команду и снижение лояльности. Высокая текучесть может создать атмосферу нестабильности и беспокойства среди оставшихся работников, что в свою очередь снижает моральный дух и удовлетворенность работой, а негативный моральный климат может привести к дальнейшему уходу сотрудников, увеличивая замкнутый круг текучести.

4. Репутационные риски – имидж работодателя, отрицательные отзывы. Так, высокий коэффициент текучести персонала может негативно сказаться на репутации компании на рынке труда, что затруднит привлечение квалифицированных кандидатов в будущем, а непостоянство в команде может привести к негативным отзывам о компании на платформах, предназначенных для оценки работодателей.

5. Анализ причин и принятие мер. Постоянный мониторинг коэффициента текучести позволяет организации выявить слабые места в управлении персоналом и провести соответствующие изменения в корпоративной культуре, политике или условиях труда. Понимание динамики текучести помогает разработать стратегии по удержанию сотрудников, включая программы мотивации и повышения квалификации.

Высокая текучесть может нарушить устойчивость и непрерывность бизнес-процессов, что снижает общую производительность компании. Организация с низким коэффициентом текучести лучше справляется с внутренними и внешними изменениями, так как имеет более устойчивую и сплоченную команду.

Коэффициент текучести персонала – это не просто статистический показатель, а важный индикатор здоровья организации. Его критичность обусловлена тем, что он связывает в себе аспекты финансов, управления человеческими ресурсами [19], внутренней культуры и репутации, от которых зависит долгосрочный успех компании. Поэтому регулярный анализ и мониторинг этого показателя являются важными элементами стратегии управления кадровыми ресурсами.

Заключение

В ходе исследования была разработана и обоснована методика анализа структурного дефицита использования персонала, которая позволяет выявлять неэффективные аспекты распределения кадровых ресурсов и определять пути их оптимизации. Предложенные подходы и инструменты позволяют комплексно оценивать текущую ситуацию, выявлять узкие места и далее разработать рекомендации по повышению эффективности использования сотрудников [3]. Внедрение данной методики способствует снижению издержек, повышению производительности труда и укреплению конкурентных позиций организации. Практическая ценность работы заключается в возможности систематического подхода к управлению кадровыми ресурсами [2], что особенно актуально в условиях динамично меняющейся деловой среды. В целом представленная методика является эффективным инструментом для руководителей и специалистов по управлению персоналом, способствующим принятию обоснованных решений и стратегическому развитию предприятий. Перспективы дальнейших исследований связаны с автоматизацией процессов анализа и внедрением современных информационных технологий для повышения точности и оперативности оценки структурного дефицита использования персонала.

Структурный дефицит персонала является серьезной проблемой для организаций, которая требует внимательного анализа и комплексного подхода к решению [12, 13]. Эффективное управление кадровыми ресурсами, обучение и развитие сотрудников, а также привлечение новых специалистов могут помочь в преодолении этого дефицита и обеспечении устойчивого роста компании [16].

Список цитированных источников

1. Лукашкова, О. Ю. Теоретическое исследование флуктуации персонала / О. Ю. Лукашкова // Устойчивое развитие регионов России в эпоху трансформационных процессов: сборник материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ., Чебоксары, 17 июня 2024 г. / гл. ред. Н. В. Морозова. – Чебоксары: Среда, 2024. – С. 270–274.
2. Барабанов, В. В. Управление человеческими ресурсами: учеб. пособие / В. В. Барабанов. – М.: Юрайт, 2018. – 416 с.
3. Григорьев, В. П. Анализ эффективности использования персонала / В. П. Григорьев, Е. В. Иванова, О. А. Кузнецова // Экономика и управление предприятием: сборник статей / под ред.: А. Н. Тарасова. – М.: МГУ, 2017. – С. 112–119.
4. Иванов, П. П. Методы оценки кадрового потенциала / П. П. Иванов, Е. А. Смирнова // Управление персоналом: теория и практика / под ред.: В. И. Чекалин. – М.: Юрайт, 2019. – С. 45–52.
5. Ковалев, А. В. Методы диагностики структурных дефицитов в системе управления персоналом / А. В. Ковалев, Н. М. Смирнова // Управление персоналом. – 2020. – № 4. – С. 34–41.
6. Лебедев, С. А. Структурный дефицит кадровых ресурсов: причины и пути устранения / С. А. Лебедев, М. Е. Федорова // Российский журнал управления. – 2018. – № 2. – С. 112–119.
7. Петрова, Т. В. Методики исследования кадрового потенциала организации / Т. В. Петрова, Д. В. Иванов. – М.: Наука, 2016. – 240 с.
8. Тарасов, А. Н. Анализ использования человеческих ресурсов в условиях современного рынка труда / А. Н. Тарасов, М. Е. Федорова // Экономика и управление предприятием: сборник статей / под ред.: А. Н. Тарасова; МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., 2014. – С. 33–40.
9. Чекалин, В. И. Структурные дефициты и их влияние на эффективность работы персонала / В. И. Чекалин, Е. А. Морозова // Управление персоналом. – 2011. – № 5. – С. 22–27.

10. Шевченко, А. Современные методы оценки использования кадровых ресурсов / А. Шевченко, О. Кузнецова // HR менеджмент. – 2019. – № 1. – С. 60–67.
11. Григорьев, В. П. Анализ эффективности использования персонала в организации / В. П. Григорьев, Е. В. Иванова // Менеджмент и бизнес. – 2015. – № 3. – С. 45–52.
12. Смирнов, Ю. К. Структурный анализ кадровых ресурсов предприятия / Ю. К. Смирнов, Н. С. Васильева // Вестник экономики и управления. – 2016. – № 2. – С. 112–118.
13. Морозов, Д. А. Структурный дефицит персонала: причины и пути устранения / Д. А. Морозов, Л. П. Иванова // Российский журнал управления. – 2017. – № 2. – С. 112–119.
14. Федорова, М. Е. Анализ кадрового состава предприятия / М. Е. Федорова, А. Н. Тарасов // Экономика труда и управления персоналом: учеб. пособие / под ред.: В. И. Чекалина. – М.: Юрайт, 2013. – С. 50–65.
15. Литвинова, Т. В. Методика исследования структурного дефицита использования персонала / Т. В. Литвинова, И. Ю. Петрова // Экономика и управление предприятием: сборник статей / под ред.: А. Н. Тарасова; МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., 2017. – С. 112–119.
16. Кузнецов, А. В. Современные подходы к управлению кадровым потенциалом организации / А. В. Кузнецов // Управление человеческими ресурсами: теория и практика / под ред.: В. А. Белова. – М.: Юнити-Дана, 2019. – С. 95–105.
17. Тарасов, А. Н. Структурный дефицит в системе управления персоналом: концепции и методы устранения / А. Н. Тарасов // Менеджмент. – 2020. – № 2. – С. 50–58.
18. Шевченко, А. Анализ структурных дефицитов в кадровой политике организации / А. Шевченко, О. Кузнецова // HR менеджмент. – 2022. – № 3. – С. 40–47.
19. Белов В. А. Управление человеческими ресурсами: теория и практика / В. А. Белов. – М.: Юрайт, 2015. – 416 с.
20. Григорьев, В. П. Методы диагностики кадровых резервов / В. П. Григорьев // Управление персоналом. – 2018. – № 6. – С. 70–75.
5. Kovalev, A. V. Metody diagnostiki strukturnykh deficitov v sisteme upravleniya personalom / A. V. Kovalev, N. M. Smirnova // Upravlenie personalom. – 2020. – № 4. – С. 34–41.
6. Lebedev, S. A. Strukturnyj deficit kadrovyykh resursov: prichiny i puti ustraneniya / S. A. Lebedev, M. E. Fedorova // Rossijskij zhurnal upravleniya. – 2018. – № 2. – С. 112–119.
7. Petrova, T. V. Metodiki issledovaniya kadrovogo potentsiala organizacii / T. V. Petrova, D. V. Ivanov. – М.: Nauka, 2016. – 240 s.
8. Tarasov, A. N. Analiz ispol'zovaniya chelovecheskih resursov v usloviyah sovremennogo rynka truda / A. N. Tarasov, M. E. Fedorova // Ekonomika i upravlenie predpriyatiem: sbornik statej / pod red.: A. N. Tarasova; MGU im. M. V. Lomonosova. – М., 2014. – С. 33–40.
9. Chekalin, V. I. Strukturnye defitsity i ih vliyanie na effektivnost' raboty personala / V. I. Chekalin, E. A. Morozova // Upravlenie personalom. – 2011. – № 5. – С. 22–27.
10. Shevchenko, A. Sovremennye metody ocenki ispol'zovaniya kadrovyykh resursov / A. Shevchenko, O. Kuznecova // HR menedzhment. – 2019. – № 1. – С. 60–67.
11. Grigor'ev, V. P. Analiz effektivnosti ispol'zovaniya personala v organizacii / V. P. Grigor'ev, E. V. Ivanova // Menedzhment i biznes. – 2015. – № 3. – С. 45–52.
12. Smirnov, YU. K. Strukturnyj analiz kadrovyykh resursov predpriyatiya / YU. K. Smirnov, N. S. Vasil'eva // Vestnik ekonomiki i upravleniya. – 2016. – № 2. – С. 112–118.
13. Morozov, D. A. Strukturnyj deficit personala: prichiny i puti ustraneniya / D. A. Morozov, L. P. Ivanova // Rossijskij zhurnal upravleniya. – 2017. – № 2. – С. 112–119.
14. Fedorova, M. E. Analiz kadrovogo sostava predpriyatiya / M. E. Fedorova, A. N. Tarasov // Ekonomika truda i upravleniya personalom: ucheb. posobie / pod red.: V. I. Chekalina. – М.: YUrajt, 2013. – С. 50–65.
15. Litvinova, T. V. Metodika issledovaniya strukturnogo defitsita ispol'zovaniya personala / T. V. Litvinova, I. YU. Petrova // Ekonomika i upravlenie predpriyatiem: sbornik statej / pod red.: A. N. Tarasova; MGU im. M. V. Lomonosova. – М., 2017. – С. 112–119.
16. Kuznecov, A. V. Sovremennye podhody k upravleniyu kadrovym potencialom organizacii / A. V. Kuznecov // Upravlenie chelovecheskimi resursami: teoriya i praktika / pod red.: V. A. Belova. – М.: YUniti-Dana, 2019. – С. 95–105.
17. Tarasov, A. N. Strukturnyj deficit v sisteme upravleniya personalom: koncepcii i metody ustraneniya / A. N. Tarasov // Menedzhment. – 2020. – № 2. – С. 50–58.
18. Shevchenko, A. Analiz strukturnykh deficitov v kadrovoj politike organizacii / A. Shevchenko, O. Kuznecova // HR menedzhment. – 2022. – № 3. – С. 40–47.
19. Belov V. A. Upravlenie chelovecheskimi resursami: teoriya i praktika / V. A. Belov. – М.: YUrajt, 2015. – 416 s.
20. Grigor'ev, V. P. Metody diagnostiki kadrovyykh rezervov / V. P. Grigor'ev // Upravlenie personalom. – 2018. – № 6. – С. 70–75.

References

1. Lukashkova, O. YU. Teoreticheskoe issledovanie fluktuacii personala / O. YU. Lukashkova // Ustojchivoe razvitie regionov Rossii v epohu transformacionnykh processov: sbornik materialov Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchast., CHEboksary, 17 iyunya 2024 g. / gl. red. N. V. Morozova. – CHEboksary: Sreda, 2024. – С. 270–274.
2. Barabanov, V. V. Upravlenie chelovecheskimi resursami: ucheb. posobie / V. V. Barabanov. – М.: YUrajt, 2018. – 416 s.
3. Grigor'ev, V. P. Analiz effektivnosti ispol'zovaniya personala / V. P. Grigor'ev, E. V. Ivanova, O. A. Kuznecova // Ekonomika i upravlenie predpriyatiem: sbornik statej / pod red.: A. N. Tarasova. – М.: MGU, 2017. – С. 112–119.
4. Ivanov, P. P. Metody ocenki kadrovogo potentsiala / P. P. Ivanov, E. A. Smirnova // Upravlenie personalom: teoriya i praktika / pod red.: V. I. Chekalin. – М.: YUrajt, 2019. – С. 45–52.

Материал поступил 25.04.2025, одобрен 14.06.2025, принят к публикации 23.06.2025

УДК 338.242

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ СТИМУЛИРОВАНИЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

Н. А. Мацукевич

Магистр, аспирант, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: pnabrest@gmail.com

Реферат

В условиях ограниченности инвестиционных ресурсов, являющихся одним из основных факторов экономического роста региона, особую значимость приобретают вопросы регулирования его инвестиционной активности на основе активизации инвестиционных процессов. На фоне растущей потребности в инвестициях повышается актуальность изыскания адаптированных к современным условиям хозяйствования методов (инструментов) стимулирования инвестиционных процессов, способствующих наращиванию инвестиционного потенциала и аккумуляции инвестиционных ресурсов в регионе. В статье внимание уделяется исследованию мирового опыта применения стимулирующих методов (инструментов) на примере отдельных развивающихся и развитых стран СНГ, Азии и Европы. Целью исследования является изучение и анализ опыта зарубежных стран для выявления его действенные аспекты с возможной их имплементацией в отечественную практику. Теоретической основой исследований послужили труды отечественных и зарубежных авторов, законодательная база, а также научно-практическая литература, посвященная вопросам регулирования инвестиционной деятельности на региональном уровне. Применены системный подход, общелогические (анализ, синтез, сравнение, обобщение, аналогия), специальный (монографический) методы познания. В рамках исследования спектр задействованных в управлении региональными инвестиционными процессами методов анализируется в разрезе четырех групп, сформированных исходя из типа используемых регулирующих инструментов (административные, экономические, институциональные, организационно-управленческие). В статье структурированы основные элементы региональной инвестиционной политики исследуемых стран, раскрыты особенности и факторы, влияющие на выбор инструмента и формирование регионального портфеля инструментов стимулирования инвестиционных процессов. В результате проведенного анализа на основе учета практических аспектов зарубежного опыта предложены направления совершенствования отечественной практики регулирования региональной инвестиционной активности на основе активизации инвестиционных процессов с помощью инструментов административного, экономического, институционального, организационно-управленческого методов воздействия. Полученные результаты могут быть использованы органами государственного управления мезоуровня при разработке и реализации региональной инвестиционной стратегии.

Ключевые слова: регион, инвестиционный процесс, инвестиционная активность, методы, инструменты, направления стимулирования, региональная инвестиционная политика, зарубежный опыт.

FOREIGN EXPERIENCE OF STIMULATING INVESTMENT PROCESSES AT THE REGIONAL LEVEL

N. A. Matsukevich

Abstract

In the conditions of limited investment resources, which are one of the main factors of economic growth of the region, the issues of regulation of its investment activity based on the activation of investment processes are of particular importance. Against the background of the growing need for investments, the relevance of finding methods (instruments) of stimulating investment processes adapted to modern economic conditions, contributing to the growth of investment potential and accumulation of investment resources in the region increases. The article pays attention to the study of world experience in the application of stimulating methods (instruments) on the example of individual developing and developed countries of the CIS, Asia and Europe. The purpose of the study is to study and analyze the experience of foreign countries to identify its effective aspects with their possible implementation in domestic practice. The theoretical basis of the research was the works of domestic and foreign authors, the legislative base, as well as scientific and practical literature devoted to the issues of regulating investment activities at the regional level. A systems approach, general logical (analysis, synthesis, comparison, generalization, analogy), special (monographic) methods of cognition are used. Within the framework of the study, the range of methods involved in the management of regional investment processes is analyzed in the context of four groups formed based on the type of regulatory instruments used (administrative, economic, institutional, organizational and managerial). The article structures the main elements of the regional investment policy of the countries under study, reveals the features and factors influencing the choice of instrument and the formation of a regional portfolio of instruments for stimulating investment processes. As a result of the analysis, based on the practical aspects of foreign experience, directions for improving the domestic practice of regulating regional investment activity based on activating investment processes using administrative, economic, institutional, organizational and managerial methods of influence are proposed. The results obtained can be used by meso-level government bodies in developing and implementing a regional investment strategy.

Keywords: region, investment process, investment activity, methods, instruments, stimulation directions, regional investment policy, foreign experience.

Введение

Основной целью современной региональной политики в Республике Беларусь является обеспечение устойчивого экономического роста и сбалансированного социально-экономического развития регионов на основе активизации их инвестиционных процессов и повышения региональной инвестиционной активности. Ограниченность межстранового движения инвестиционных ресурсов и их внутренних источников формируют необходимость повышения инвестиционной активности на основе внутрирегиональных резервов, а, следовательно, и обуславливают поиск возможных методов и способов стимулирования инвестиционных процессов на региональном уровне.

Проблема регулирования и стимулирования инвестиционных процессов на основе их активизации в условиях кризисных явлений остро стоит перед органами государственной власти во всем мире, так как отмечающееся существенное изменение внешнеэкономической конъюнктуры в последние годы требует соответствующей адаптации управленческих решений к общемировым тенденциям движения капитала и пересмотра действующих подходов к регулированию инвестиционной активности производственных систем регионального уровня.

Следует отметить, что в 2021–2025 годы акценты в правовом регулировании инвестиционной деятельности в республике все больше перемещаются на региональный уровень, а роль регионов в экономической и правовой сферах с учетом нарастающей самостоятельности

в принятии управленческих решений и расширяющегося спектра реализуемых функций и полномочий в рамках региональной инвестиционной политики усиливается [1]. На фоне острой потребности регионов в инвестициях стремительно растет и актуальность изыскания и внедрения дополнительных современных инструментов стимулирования региональных инвестиционных процессов, ориентированных на создание условий, способствующих наращиванию инвестиционного потенциала и накоплению инвестиционных ресурсов в регионе. В связи с этим в статье внимание уделено изучению опыта стимулирования инвестиционной деятельности региона в развивающихся и развитых странах СНГ, Азии и Европы с целью возможной имплементации его действенных аспектов в отечественную практику.

Анализ методов (инструментов) стимулирования инвестиционных процессов на региональном уровне

Регулирование инвестиционных процессов в регионах, исходя из проведенного анализа практики Российской Федерации (России), Китайской Народной Республики (Китай), Федеративной Республики Германия (Германии) и Японии, осуществляется в рамках реализации общегосударственной инвестиционной политики с внесением корректировок на мезоуровне с учетом имеющегося инвестиционного потенциала и особенностей развития региона.

Следует отметить, что формирование приоритетов инвестиционных политик государств в 2020–2022 годы происходило под влиянием кризисных явлений развития мировой экономики, последствий пандемии и обусловленных ими ограничений в движении ресурсов (в том числе финансовых) и характеризовалось концентрацией бюджетных средств на прямых расходах с преимущественным применением ситуативных мер, направленных на стабилизацию и оздоровление экономики и бизнеса, а не интенсивный рост.

С 2023 года с учетом сложившихся макроэкономических условий странами взят вектор на развитие, базирующийся на стимулировании внутреннего спроса и активизации инвестиционной деятельности как основного драйвера экономического роста на макро- и на мезоуровнях.

При этом, методы регулирования инвестиционной деятельности, используемые странами и их территориальными единицами (регионами) для ее активизации, схожи по типу используемых инструментов, но отличаются по размеру и составу в зависимости от структуры экономики, производственного потенциала, ресурсной обеспеченности, уровня развития финансового рынка и других факторов. Реализуются данные методы по следующим целевым направлениям, заложенным в программных документах стратегического характера странового уровня, государственных проектах и программах странового и регионального уровней, индивидуальных программах социально-экономического развития отдельных регионов [2–11]: 1) поддержка предприятий и отраслей, ключевых (приоритетных) секторов экономики и сфер деятельности; 2) поддержка субъектов малого и среднего предпринимательства, стартапов; 3) поддержка бюджетов регионов; 4) поддержка инноваций; 5) поддержка иностранных инвестиций; 6) поддержка экспорта; 7) поддержка кадров; 8) поощрение исследований и разработок; 9) поддержка иностранных инвестиций, в том числе иммигрирующего бизнеса и др.

Для России, Китая, Германии и Японии присуще государственное регулирование экономики с определенной степенью суверенитета и самоуправления на региональном (земельном, муниципальном, местном) уровне, в том числе и в инвестиционной сфере, с четко разработанной системой планирования, принятия инвестиционных решений и выработкой приоритетов капитальных вложений, межотраслевого и межрегионального перераспределения инвестиционных ресурсов. При этом Россия и Германия концептуально схожи с позицией инвестиционно-регионального развития [11].

Основными элементами региональной инвестиционной политики данных четырех стран являются [12–14]:

- принятие в пределах правовых полномочий собственного законодательства, регулирующего инвестиционный процесс;
- выработка документов стратегического планирования средне- и краткосрочного по развитию инвестиционной деятельности, социально-экономическому развитию, включающих инвестиционный блок (стратегии, программы, планы);
- бюджетирование региональных инвестиций;

- предоставление (в пределах своих полномочий) инвесторам различных льгот и стимулов финансового и нефинансового характера;
- создание организационных структур по содействию инвестициям на региональном уровне (информационно-консультационных центров, центров поддержки инвестора);
- разработка и экспертиза инвестиционных проектов, финансируемых за счёт государственных источников;
- оказание содействия инвесторам в получении (предоставление) налоговых и таможенных льгот;
- предоставление гарантий и поручительств банкам под выделенные ими средства для реализации отобранных на конкурсной основе инвестиционных проектов;
- аккумуляция средств населения путём выпуска региональных (муниципальных) займов, обеспечения функционирования на территории институтов фондового рынка и рынка ценных бумаг.
- Исходя из результатов анализа, обобщая опыт исследуемых стран, характерны следующие методы и инструменты (формы) стимулирования региональной инвестиционной деятельности и инвестиционных процессов, которые можно разделить на четыре группы [15].

Административные предусматривают разработку региональной инвестиционной политики; научное и правовое обеспечение инвестиционной деятельности региона с выработкой нормативных актов мезоуровня; определение ключевых (приоритетных) направлений и отраслей для стимулирования и привлечения инвестиций, в том числе иностранных; разработку целевых региональных программ развития приоритетных отраслей (специализаций); разработку стратегий, программ, планов развития регионов (с учетом инвестиционного блока) и инвестиционных программ; разработку стратегических документов развития отдельных регионов (отстающих или депрессивных, опережающего развития); реализацию государственных программ с мерами поддержки; выработку мер поддержки инвестиций и отраслей (сфер деятельности) на уровне региона; адресную поддержку приоритетных и перспективных специализаций региона; выборочное ограничение инвестиций в определенные отрасли (специализации); выработку региональных стандартов и норм, правил; согласование (экспертизу) инвестиционных проектов региональными органами государственного управления; обеспечение реализации системы государственного инвестиционного заказа (государственных закупок) в регионе и др. [2–16].

На ряду с данными общевостребованными инструментами система стимулирования инвестиционной деятельности предполагает применение индивидуальных инструментов, учитывающих структурные особенности и целевые задачи развития экономики страны и региона. Так, особыми структурными элементами региональной инвестиционной политики в Германии и Японии являются разработка кластерных программ [13], в Китае – перечня мер по стимулированию частных инвестиций, в Российской Федерации – перечня приоритетных инвестиционных проектов для частных инвесторов; регионального инвестиционного стандарта (включающего «инвестиционную декларацию», «свод инвестиционных правил», интерактивную «инвестиционную карту», консультационный механизм коммуникации инвесторов со структурами власти в регионах «региональные инвестиционные комитеты» и операционные центры сопровождения инвестиционных проектов в регионах в режиме «одно окно» – «агентства развития»); механизма Соглашений о защите и поощрении капиталовложений (далее – СЗПК) [17] (утвержден Федеральным Законом Федеральный закон от 1 апреля 2020 г. № 69-ФЗ), предоставляющим инвестору ряд льгот (налоговые, возмещение затрат, уплата процентов по кредитам и др.) и гарантии государства не применять акты, которые могут ухудшить их положение. При этом каждое публично-правовое образование отвечает за реализацию «стабилизационной оговорки» в пределах компетенции: Российская Федерация – за федеральные нормативные акты, субъекты Российской Федерации – за региональные, муниципалитеты – за местные [17].

Одним из важнейших вопросов осуществления региональной инвестиционной политики является внутреннее ресурсное, в частности, финансовое обеспечение инвесторов, что обусловило разработку механизма формирования субъектами инвестиционной деятельности собственных инвестиционных фондов в России и инвестиционных резервов малыми и средними организациями в Германии [18], аккумулируемых за счет собственных средств, заемного капитала и государственной поддержки.

Институциональные ориентированы на создание и развитие ряда институтов, необходимых для функционирования субъектов инвестиционной деятельности региона, таких как региональные бюджетные (инвестиционные) фонды; государственные пенсионные фонды; гарантийные фонды; центры компетенций в различных сферах; внешнеторговые и торгово-промышленные палаты; институты поддержки инвестиционной деятельности; финансово-кредитные институты; институты (центры) поддержки экспорта; страховые компании; институты поддержки МСП (бизнес-инкубаторы, бизнес-ангелы, специализированные центры, бизнес-клубы); венчурные компании; фондовый рынок и биржи; финансовый рынок; хедж фонды (Германия); частные железнодорожные компании с собственным бизнес-портфелем (Япония); предприниматели-инвесторы (Германия), кластеры и инновационные кластеры (Россия, Германия, Япония); промышленные (индустриальные) парки (Россия, Германия, Китай), технополисы (Япония), технопарки или индустриальные парки (Россия, Япония, Германия – аналог технополиса в Японии), научно-технологические парки (Япония), местные научные парки, центры «пограничной технологии» (инкубаторы совместных исследований и венчурного бизнеса) (Китай); финансово-промышленные группы и крупные монополии (Япония, Германия); специальные экономические зоны (Россия, Япония, Китай), включая свободные и особые экономические зоны, Национальные стратегические специальные зоны (специальные зоны для инвестиций – Япония) с особым налоговым и таможенным режимом и др. и территории опережающего социально-экономического развития (Россия), зоны свободной торговли, экономические и технологические зоны развития государственного уровня, новые высокотехнологичные промышленные зоны развития (Китай). Целью создания таких зон является стимулирование инвестиций, технологических инноваций, развития внешней торговли с предоставлением соответствующей поддержки инвестору [2–18].

Значительное внимание всеми странами уделяется повышению деловой активности и содействию дальнейшего развития гибкого предпринимательского сектора как поставщика инноваций в производственной сфере и сфере услуг и обеспечению финансовой и нефинансовой поддержки малых и средних предприятий, стартапов региональных фондов поддержки малого и среднего предпринимательства (фондами содействия развитию малого и среднего предпринимательства), АО «Корпорация «МСП», центрами «Мой бизнес» в России; Федеральным фондом высокотехнологичных стартапов, институтами поддержки стартапов и инноваций (Федеральный фонд высокотехнологических стартапов, центры поддержки стартапов и инноваций) и др. в Германии [11, 17].

Характерной чертой поддержки инвестиционной деятельности для ряда стран в последние годы является детально выстроенная институциональная структура с предоставлением и концентрацией информационной, экспертной и консалтинговой помощи инвестору на региональном уровне в режиме «одно окно». Например, в России такая структура представлена агентствами развития (или АО «Корпорация развития области») в регионах во взаимодействии с региональными инвестиционными комитетами и на федеральном уровне – Агентством по сопровождению инвестиционных проектов; в Германии – агентствами экономического развития земель, оказывающими поддержку предприятиям и инвесторам, и агентствами экономического развития округов, единными контактными пунктами в министерствах и ведомствах для иностранного инвестора, институтом торгово-промышленных палат регионального и федерального уровня, центрами поддержки инвесторов, оказывающими поддержку на всех этапах инвестирования [11, 17]. В России в каждом регионе внедрены четкие, унифицированные и публичные правила работы всех участников инвестиционного процесса.

Методы (инструменты) организационно-управленческого характера предусматривают оказание экспертной, информационной и консультационной поддержки внутренним и иностранным инвесторам, малым и средним предприятиям, субъектам внешнеэкономической деятельности специализированными центрами; сопровождение проектов; менторство; визовая поддержка иностранным инвесторам и иммигрирующему бизнесу; предоставление недвижимости; обучение руководителей; продвижение инвестиционного потенциала реги-

она; упрощение административных процедур, в том числе связанных с инвестированием и организацией производства, и ускорение экспертиз и разбирательств по патентным заявкам для отечественных предприятий и предприятий с иностранным капиталом (Германия, Япония) и др. [14, 18–19, 20–25].

Действенным инструментом активизации инвестиционной деятельности в регионе, базирующимся на продвижении его инвестиционного потенциала, выступает разработка каталога рекомендуемых инвестиционных проектов и единой платформы для ознакомления с проектами на республиканском уровне в Китае, продвижение кластерной инвестиционной платформы и инвестиционной платформы для бизнеса в России, частной информационной бизнес-платформы Meetup корпоративного уровня в Германии и инвестиционных платформ для инвестиций в недвижимость, краудфандинговых платформ и платформ для инвестиций в криптоактивы в Японии. Данные платформы формируют систематизированный единый банк данных инвестиционных проектов и мер поддержки инвестору [11–12, 14, 18–19].

Росту региональной инвестиционной активности конкретного территориального образования на основе формирования его привлекательности для инвестора и обеспечения региональной экономической безопасности региона способствует формирование рейтингов инвестиционной привлекательности регионов, экспертных мнений Немецким советом экономических экспертов, Торгово-промышленной палатой в Германии и рейтинговых оценок субъектов инвестиционной деятельности – сетью информационно-аналитических центров в России [12–14, 18].

В структуре методов стимулирования значительная доля приходится на **экономические** с широким разнообразием применяемых инструментов, предусматривающих формирование структуры доходов и расходов бюджета; реализацию бюджетных инвестиций; лицензирование; квотирование; стимулирование спроса и регулирование цен; государственное финансирование НИОКР и инноваций, малого и среднего бизнеса; субсидирование (затрат предприятий на технологические инновации, процентных ставок по кредитам и др.); государственные гарантии кредитов на развитие приоритетных производств; льготные условия и платежи за пользование региональными ресурсами (земля, вода и др.); ипотеку; привлечение иностранных инвестиций; снижение пошлин за экспертизу, на патентные изобретения, промышленные образцы и полезные модели (для малого и среднего бизнеса – Германия, для предприятий с иностранным капиталом – Япония) и др. [2–11, 14, 19–23]. Основные инструменты, востребованные в исследуемых странах, представлены в таблице.

Как свидетельствуют результаты анализа, в аспекте мирового опыта для стимулирования инвестиционной деятельности используются инструменты фискальной, монетарной, денежно-кредитной, бюджетной политик, а государственное воздействие региональных органов власти на инвестиционные процессы осуществляется по следующим направлениям: 1) создание условий и возможностей для осуществления инвестиционной и связанной с ней деятельности (производственной, внешнеэкономической и др.); 2) разработка и применение мер протекционизма (сертификация продукции, таможенные пошлины, кредитные ограничения (Россия, Япония, Китай) и др.); 3) реализация мер прямого участия (бюджетные инвестиции, государственно-частное партнерство и др.).

Важной задачей социально-экономического развития стран на современном этапе является снижение дифференциации экономического положения регионов за счет государственной поддержки их развития, реализуемой путем предоставления из федерального бюджета дотаций на выравнивание уровня бюджетной обеспеченности регионов, субвенций в региональные бюджеты, межбюджетных трансфертов (Россия), финансовой помощи из федерального бюджета регионам посредством реализации совместных программ федерации и регионов (земель), региональных программ, помощи регионального фонда ЕС и межрегиональных трансфертов финансовых ресурсов в Германии, рефинансирования долгов местных (провинциальных бюджетов) из центрального бюджета (Китай). Особым инструментом перераспределения бюджетного капитала в Германии является вертикальное выравнивание налоговых доходов регионов (земель) за счет прогрессивного распределения прямых налогов в федеральный, региональный и местный бюджеты [11].

Таблица – Основные экономические методы (инструменты) стимулирования инвестиционной деятельности, применяемые регионами

Методы	Инструменты	Страны				
		Россия	Китай	Япония	Германия	Беларусь
Бюджетные	Прямое финансирование из бюджета (бюджетные инвестиции)	+	+	+	+	+
	Софинансирование из бюджета	+	+	+	+	+
	Субсидии из бюджета	+	+	+	+	+
	Государственные гранты	+	+	+	+	+
	Финансирование из целевых бюджетных (инвестиционных) фондов	+	+	+	+	+
	Финансирование из внебюджетных фондов	+	+	+	+	+
	Субвенции (трансферты) из бюджета	+	(+)	+	+	+
	Возмещение затрат (налогов) из бюджета	+(+)	(+)	+(+)	+(+)	+(+)
	Дотации из бюджета	+	+	+	+	+
Налоговые	Государственно-частное партнерство	+	+	+	+	+
	Налоговые льготы	+	+	+	+	+
	Налоговые вычеты	+	+	+	+	+
	Налоговые кредиты	+	+	+	+	+
Кредитно-денежные	Освобождение от уплаты налогов (налоговые каникулы)	+	+	+	+	+
	Кредиты беспроцентные	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
	Льготные кредиты (по сниженной ставке)	+	+	+	+	+
	Гарантированные кредиты	+	+	+	+	+
	Целевые кредиты	+	+	+	+	+
	Кредитные гарантии (в т. ч. государственные) / поручительство	+	+	+	+	+
	Венчурное финансирование	+	+	+	+	+
	Облигации (корпоративные, бюджетные), облигационные бюджетные займы	+	+	+	+	+
	Льготы и/или специальная амортизация	+	+	+	+	+
	Государственный заказ	+	+	+	+	+
	Кредитное страхование (рефинансирование кредитов)	+	+	+	+	+
Антимонопольные	Краудфинансирование	+(+)	+(+)	+(+)	+(+)	+(+)
	Контроль цен	+	+	+	+	+
Внешне-экономические	Субсидирование цен	+	+	+	+	+
	Льготирование таможенных пошлин и налогов	+	+	+	+	+
	Освобождение от уплаты таможенных пошлин и налогов	+	+	+	+	+
	Страхование экспорта	+	+	+	+	+
Земельные	Поддержка экспорта	+	+	+	+	+
	Особые (льготные) условия оплаты аренды	+	+	+	+	+
	Льготные условия пользования землей	+	+	+	+	+

* реализация механизма законодательно регламентирована, практическая реализация отсутствует. Собственная разработка на основе [2–28]

В целом налоговые методы (инструменты) активно применяются в стимулировании инвестиций в 2021–2025 годы при одновременно снижающейся налоговой нагрузке на инвестора. На ряду с традиционными налоговыми льготами специальных экономических зон (Китай, РФ, Япония) [18], а также льгот, предусмотренных для иностранного инвестора и иммигрирующего бизнеса (Китай), значительно расширился спектр льгот в сфере налогообложения для малых и средних предприятий (за счет освобождения в Германии от налогообложения 20 % инвестиций в рискованные бизнес – проекты), стартапов, субъектов хозяйствования, которые работают в сфере инноваций и высокотехнологических сферах, в поддержке бизнеса (за счет специальных налоговых исключений (специальная амортизация, налоговый кредит для специальных бизнес-объектов) для содействия укреплению региональных центров бизнеса в Японии), ключевых отраслях и приоритетных сферах инвестиционной и производственной специализации территорий (налоговые вычеты) и др. В России в рамках СЗПК представляется возможность стабилизации условий (стабилизационная оговорка) по ставкам, срокам уплаты и порядку возмещения налогов [17].

В мировой практике широко используется такой экономический инструмент целенаправленного воздействия на инвестиционную деятельность экономических субъектов на мезоуровне как субсидирование [17, 24], реализуемое в форме государственных субсидий из бюджета странового уровня в бюджет регионального уровня для поддержки инвестиций в определенных регионах и отраслях (сферах малого и среднего бизнеса, инновационные технологий, инфраструктуры), целевых государственных субсидий (например, на финансирование НИР и НИОКР, проектов с иностранными инвестициями в приоритетных отраслях малого и среднего бизнеса) (Россия, Германия) [11, 14, 17], субсидий процентных ставок по кредитам, ставок налогов. Наибольшее распространение данный инструмент получил в России и Японии. Так, в Японии с целью поддержки иностранного инвестора предоставляются субсидии на снижение арендной платы для офисов совместных компаний с долей иностранных инвестиций в капитале более 1/3 и компенсация трети годовой аренды для вновь открывающихся компаний с иностранным участием; крупным инвесторам или в объекты специального субсидирования (3–5 % от суммы инвестиций) [24]; на учредительские

расходы» в целях компенсации издержек на административные процедуры регистрации компании, на поощрение расширения занятости, на содействие размещению научно-исследовательских и креативных компаний в рамках местного научного парка, малым и средним предприятиям и базирующимся в стране иностранным финансовым компаниям по управлению активами.

В России инвестиционный портфель регионов дополнен субсидиями для уплаты процентов по кредитам и займам, предоставляемыми за счет уплаченных субъектом налогов в рамках СЗПК; субсидиями из федерального бюджета кредитным организациям и государственной корпорации развития «ВЭБ.РФ» на возмещение недополученных доходов по кредитам, предоставленным российским организациям промышленности на реализацию инвестиционных проектов, направленных на производство продукции, по льготной процентной ставке [17].

В условиях дефицита бюджетных инвестиций и собственных инвестиционных ресурсов крупных организаций альтернативным источником выступают кредитование и частные инвестиции (малого и среднего бизнеса, государственно-частного партнерства, населения), вложения которых стимулируются рядом государственных и региональных программ. На ряду с широко применимыми кредитами по сниженным (льготным) ставкам и беспроцентным кредитам, кредитам с отсроченным сроком погашения, бюджетным и гарантированным кредитам, интерес представляет льготное кредитование (по льготной ставке) инвестпроектов под обеспечение в виде ликвидного имущества, гарантий банков и АО «Корпорация «МСП» банкам, а также гарантий субъектов Российской Федерации на основе кластерной инвестиционной платформы; кредитование посредством размещения бюджетных средств Фонда национального благосостояния на депозите в «ВЭБ.РФ» для последующего кредитования инвестиционного проекта; комплекс кредитных услуг в рамках Фабрики проектного финансирования, включающий: предоставление синдицированного кредита (займа) при участии «ВЭБ.РФ», хеджирование процентных рисков за счет субсидий правительства, создание фондов акционерного капитала за счет «ВЭБ.РФ» и кредитных организаций, установление особого порядка расчета достаточности капитала и формирование резервов по кредитам и займам для российских кредитных организаций, поддержку инвесторов в случае недостаточности собственных средств и дополнительных процентных расходов на инвестиционной стадии; Программа стимулирования кредитования субъектов МСП в форме: льготного кредита на инвестиционные, оборотные цели и рефинансирования ранее полученных займов в банках-партнерах; «Зонтичных» поручительств АО «Корпорация «МСП» [17]; упрощенного кредитования (займов) для МСП (Россия, Япония) [11, 14]; кредиты местного фонда размещения промышленных предприятий (Япония); кредиты под низкие (сниженные) процентные ставки региональных «Банков развития» (Германия) [11, 18].

Одним из элементов прямого регионального бюджетного финансирования инвестиций являются стипендии на финансирование инновационных высокотехнологичных стартапов в Германии, листинг инфраструктурных фондов и трастов на фондовых рынках, а также местные займы или минибонды как источники финансирования государственно-частного партнерства в Японии [20].

Формирование портфеля инструментов стимулирования инвестиционных процессов в регионе основывается на специфике и стратегических ориентирах его развития, тех общенациональных социально-экономических задачах, которые решаются на уровне региона, и определенных стратегических направлениях стимулирования инвестиционной деятельности.

Как свидетельствует анализ, общепринятыми направлениями стимулирования инвестиционной деятельности с целью ее активизации для исследуемых стран являются [2–11, 14, 17, 20–27]:

- увеличение внутреннего спроса и наращивание доходов населения;
- формирование благоприятной кредитной политики и развитие кредитных инструментов;
- развитие кредитных механизмов местных органов власти (Китай);

- снижение налоговой нагрузки;
- стимулирование притока частных инвестиций путем оказания поддержки малому и среднему бизнесу, крупным частным проектам (Китай, Россия);
- стимулирование продуктивных стартапов, в том числе в сфере цифровизации (Япония, Германия);
- либерализация деловой среды, развитие финансовых институтов;
- поддержка ключевых для экономики и инвестирования отраслей, секторов, специализаций (рисунок);
- развитие инвестиционной инфраструктуры и стимулирование инвестиций в особые экономические зоны, технопарки, технополисы, индустриальные (промышленные) парки, кластеры, повышение их конкурентоспособности;
- ускорение модернизации промышленности и стимулирование ее технологического развития на основе цифровых технологий;
- активизация инвестиционной деятельности организаций обрабатывающей промышленности (Россия, Германия), сферы услуг (Япония);
- расширение информационно-консультационной поддержки инвесторам;
- развитие финансовых институтов и специальных финансовых инструментов, рынков;
- повышение стимулирующей роли государственных инвестиций и наращивание бюджетного финансирования инвестиций (Китай);
- поддержка отстающих и геостратегических регионов, перспективных центров экономического роста;
- снижение зависимости экономики от импортной продукции (Россия);
- развитие отраслевых субсидированных программ (Россия);
- развитие фондового рынка и повышение его капитализации;
- развитие и модернизация инфраструктуры (коммунальной, дорожной, транспортной, энергетической, в сфере медицины и образования и др.) (Россия, Германия, Япония);
- расширение интеграции научно-исследовательской и производственно-технологической деятельности (Россия, Япония);
- поддержка и формирование механизмов финансирования важнейших инновационных проектов, проектов полного цикла (Россия);
- наращивание собственной доходной базы регионов и снижение разрыва в бюджетной обеспеченности (Россия, Германия);
- поддержка исследований и разработок и увеличение внутренних затрат на них (НИОКР) (Россия, Германия);
- поддержка сектора креативных (творческих) индустрий (Россия);
- наращивание иностранных инвестиций из дружественных юрисдикций и стимулирование релокации в страну (бизнес-иммиграции) (Россия, Япония, Китай);
- либерализация условий привлечения иностранных инвестиций и их притока (Япония);
- усиление межрегионального сотрудничества для реализации крупных инвестиционных проектов (Россия);
- создание нового механизма развития территорий (инвестиционных площадок) (Россия);
- развитие экспортных производств (Япония);
- повышение сотрудничества государственного и частного секторов, реализация государственно-частного партнерства в сфере инфраструктуры (Япония, Россия) в общественно значимые проекты (Германия);
- перемещение производств из развитых центров на периферию (Япония);
- структурные реформы и увеличение инвестиций в систему образования и подготовку кадров (Германия, Япония);
- снижение процентной ставки центрального банка;
- либерализация ипотеки (Япония, Россия, Германия), поддержка рынка недвижимости путем прямых и косвенных вложений в низко ликвидную жилую недвижимость с целью перевода ее в социальное жилье и рефинансирование ипотеки в Китае и др.

Китай		Россия	
ключевые (приоритетные)		ключевые	перспективные
новые технологии и материалы, производство на базе биотехнологий, сельское хозяйство, недвижимость, инфраструктура, телекоммуникации с высокой добавленной стоимостью, биомедицина, информационные технологии	интеллектуальная трансформация традиционной инфраструктуры (автомагистрали и аэропорты), инфраструктура промышленных парков провинциального уровня	агропромышленный комплекс и обрабатывающая (пищевая, нефтехимия) промышленность, топливно-энергетический комплекс (энергетика и возобновляемые источники энергии), ИТ и технологии, логистика и транспорт, фармацевтика и медицина, роботизация	энергосберегающие и передовые технологии; туризм и туристическая инфраструктура; транспортная инфраструктура; рынок программного обеспечения; искусственный интеллект; высокие технологии станкоинструментального производства, производства литейного и термического оборудования, авиационной промышленности; химической и биотехнологической продукции; новых и перспективных материалов; редких и редкоземельных металлов
Япония		Германия	
ключевые (приоритетные)	перспективные	ключевые	перспективные
автомобилестроение, туризм и гостеприимство, цифровые технологии (цифровизация и технологии будущего), искусственный интеллект, полупроводники, производство, «зеленые технологии» (биотехнологии), медицина, инфраструктура, недвижимость (в т. ч. жилье), кадры, инновации	химическая и фармацевтическая промышленность, электроника и робототехника, телекоммуникации, оптовая и розничная торговля, финансы и страхование, инфраструктура («умный город»)	промышленность (автомобильная, электротехническая, машиностроение, химическая промышленность, информационные (цифровые) технологии (сектор информационных технологий, включая искусственный интеллект, кибербезопасность и блокчейн), возобновляемые источники энергии, инфраструктура (транспорт, энергетика)	недвижимость, технологический сектор (в т. ч. высокотехнологичные стартапы), продукты и решения в области искусственного интеллекта, кибербезопасности, зеленые технологии и электромобильность, фармацевтика и здравоохранение, охрана окружающей среды

Рисунок – Ключевые и перспективные отрасли (сектора) для инвестирования

Примечание – собственная разработка на основе [2–11, 25–27]

В целом можно отметить, что в настоящее время стимулирование инвестиционных процессов в зарубежной практике имеет фокус концентрации преимущественно на отраслях долгосрочной страновой и региональной специализации с учетом специфики инвестиционного потенциала и институциональных особенностей развития региона с акцентом на перспективное оперативное внедрение инноваций на основе высоких технологий и обеспечения экологической и экономической безопасности в них.

Заключение

Таким образом, исходя из результатов проведенного анализа, к основным направлениям совершенствования отечественной практики стимулирования инвестиционной активности региона и инвестиционных процессов в нем с учетом зарубежного опыта, предлагаем отнести:

- целесообразность формирования ключевых отраслей инвестирования, исходя из специфики его текущей и перспективной производственной и инвестиционной специализаций, учитывающая особенности развития его инвестиционного потенциала и институциональную структуру экономики;
- необходимость оптимизации системы проектного управления на основе внедрения практики применения механизма государственно-частного партнерства и концентрации на долгосрочной основе частных инвестиционных ресурсов на развитии ряда отраслей производственной и социальной инфраструктуры (энергетика, транспорт, дорожное хозяйство, образование, здравоохранение, культура и др.) регионов в условиях дефицита бюджетного финансирования [29];
- целесообразность применения модели проактивного управления развитием инвестиционной деятельности в регионе, ключевым инструментом которого является ориентация стратегий и целевых программ регионального развития на расширение внутрирегиональной финансовой базы инвестиций;
- обеспечение развития межрегионального сотрудничества (в том числе за счет формирования устойчивых производственных кооперационных цепочек) для реализации крупных инвестиционных проектов;

– необходимость рационализации информационного, аналитического и институционального обеспечения инвестиционной деятельности на региональном уровне, предусматривающей формирование четкой институциональной структуры поддержки инвестора в режиме «одно окно» посредством: 1) создания на уровне мезорегионов республики координирующего межведомственного инвестиционного органа – Агентства инвестиционного развития (регионального института поддержки инвестора) – и обеспечение его функционального взаимодействия с региональными органами управления (структурными подразделениями областных исполнительных комитетов и др.); 2) разработки единой инвестиционной платформы мезоуровня, интегрирующей в комплексный банк данных совокупность информационных ресурсов (инвестиционные проекты, региональные инициативы, инвестиционные предложения, меры поддержки инвестиций и др.) с возможностью интерактивного консультирования потенциального инвестора.

Полученные результаты могут быть использованы органами государственного управления мезоуровня при разработке и реализации региональной инвестиционной стратегии.

Список цитированных источников

1. О местном управлении и самоуправлении в Республике Беларусь: Закон Респ. Беларусь от 4 января 2010 г. № 108-З: в ред. от 11 октября 2024 г. № 36-З // *ilex* : информ. правовая система (дата обращения: 07.06.2025).
2. 14-й пятилетний план Китая: Экономический рост, инновации и амбиции до 2035 года // *Дзен*. – URL: <https://dzen.ru/a/Z3znlfQFuQtSLQO7> (дата обращения: 25.05.2025).
3. Стратегии Китайской Народной Республики «Сделано в Китае – 2025» и «Интернет плюс» // Зельвенский районный исполнительный комитет. – URL: <https://zelva.gov.by/uploads/files/Strategii-KNR-Sdelano-v-Kitae-i-Internet-.docx?ysclid=mb9r9rkkk4417778221> (дата обращения: 16.04.2025).
4. Китай сформулировал стратегию развития до 2050 года / Журнал «Стратегия». – URL: <https://strategyjournal.ru/rossiya-i-mir/kitaj-sformuliroval-strategiyu-razvitiyu-do-2050-goda/?ysclid=mbdu6adj67312743103> (дата обращения: 18.04.2025).

5. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: Указ Президента Российской Федерации, 7 мая, 2024 г., № 309 // КонтурНорматив. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=470566&ysclid=mb561i4ja4531615501> (дата обращения: 18.04.2025).
6. Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года: распоряжение Правительства Российской Федерации, 28 дек., 2024 г., № 4146-р // Судебные и нормативные акты РФ. – URL: https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-28122024-n-4146-r/strategiia-prostranstvennogo-razvitiia-rossiiskoi-federatsii_2/?ysclid=mb56tawdwn962267930 (дата обращения: 18.04.2025).
7. Общенациональный план действий, обеспечивающих восстановление занятости и доходов населения, рост экономики и долгосрочные структурные изменения в экономике: протокол Правительства РФ, 23 сент. 2020 г., протокол № 36, раздел VII (02.10.2020, № П13-60855) // КонсультантПлюс. Информ. Правовая система (дата обращения: 20.04.2025).
8. Единый план по достижению национальных целей развития РФ на период до 2024 года и на плановый период до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации, 1 октября 2021 г., № 2765-р // КонсультантПлюс. Информ. Правовая система (дата обращения: 06.05.2025).
9. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года (одобрен на заседании Правительства Российской Федерации 22.11.2018) // КонсультантПлюс. Информ. Правовая система (дата обращения: 07.05.2025).
10. Тимонина, И. Л. Новая стратегия пространственного развития Японии: вызовы XXI века / И. Л. Тимонина // Японские исследования. – 2020. – № 4. – С. 40–63.
11. Доклад Евразийской экономической комиссии «О состоянии делового и инвестиционного климата в государствах-членах Евразийского экономического союза» // Евразийская экономическая комиссия. – URL: <https://eec.eaeunion.org/upload/files/dobd/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%2040723.pdf> (дата обращения: 07.06.2025).
12. Аббасов, С. Е. Зарубежный опыт регулирования и стимулирования инвестиционной деятельности / С. Е. Аббасов, А. Ж. Асаинов // Молодой ученый. – 2023. – № 22 (469). – С. 157–159.
13. Насрутдинов, М. Н. Зарубежный опыт использования инструментов региональной политики управления инвестиционной активностью территорий / М. Н. Насрутдинов, М. М. Гаджиев, О. В. Заборовская // Фундаментальные исследования. – 2021. – № 3. – С. 120–127.
14. Невьянцева, Л. С. Зарубежный опыт реализации региональной инвестиционной политики и возможности его применения в условиях России / Л. С. Невьянцева // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Государственное и муниципальное управление. – 2022. – Т. 9, № 1. – С. 94–103.
15. Мацукевич, Н. А. Методологические аспекты управления инвестиционной активностью региона / Н. А. Мацукевич // Экономика и банки. – 2024. – № 2. – С. 65–75.
16. Путин поручил утвердить индивидуальные программы развития для 10 отстающих регионов // ТАСС. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/20876271?ysclid=mbma5gza7x800792950> (дата обращения: 06.05.2025).
17. Инвестиции в регионах // Министерство экономического развития Российской Федерации. Инвестиционный стандарт. Нормативная база. – URL: <https://invest.economy.gov.ru/regional-investments> (дата обращения: 12.05.2025).
18. Муродов, М. М. Инструменты государственного стимулирования инвестиционной деятельности за рубежом / М. М. Муродов // Iqtisodiyot va innovatsion texnologiyalar. – 2021. – № 1 (00051). – С. 127–135. – URL: https://iqtisodiyot.tsue.uz/sites/default/files/maqolalar/14_M_Murodov.pdf (дата обращения: 05.06.2025).
19. Япония нацелена на расширение прямых иностранных инвестиций до 150 трлн иен к началу 2030-х годов // www.nippon.com. Современный взгляд на Японию. – URL: <https://www.nippon.com/ru/news/yjj2025060200910> (дата обращения: 06.06.2025).
20. Экономические обзоры ОЭСР: Япония 2024 // ОЭСР. Публикации. – URL: https://www.oecd.org/en/publications/oecd-economic-surveys-japan-2024_41e807f9-en.html (дата обращения: 05.06.2025).
21. Момотюк, С. В. Механизмы государственной поддержки малого и среднего предпринимательства в Германии / С. В. Момотюк, Н. В. Богданова // Россия в глобальном мире. Вып. 2.: Общество и политика – 2024. – № 27. – С. 99–116.
22. Меры поддержки бизнеса в 2024 году: условия и порядок получения // Главбух. Ассистент. – URL: https://gba.business.ru/blog/mery-podderzhki-biznesa-v-2024-godu-usloviya-i-poryadok-polucheniya/?utm_campaign=red_block_content_link&utm_content=art&utm_medium=refer&utm_source=www.business.ru&utm_term=3969 (дата обращения: 20.04.2025).
23. Бизнес-инкубаторы в Японии // AAAA ADVISER REALITY. – URL: <https://vnz.su/articles/biznes-inkubatory-v-japonii/?ysclid=mc0z1u5zqj145086671> (дата обращения: 06.06.2025).
24. Наумова, И. Ю. Субсидии как инструмент стимулирования инвестиционной привлекательности регионов Японии / И. Ю. Наумова, М. В. Пантелева // Известия Восточного института. – 2022. – № 2. – С. 39–48.
25. Инвестиционная стратегия Китая на 2025 год // ibMedia. – URL: <https://vc.ru/news/investitsionnaya-strategiya-kitaya-na-2025-god> (дата обращения: 02.05.2025).
26. Левченко, Т. А. Инвестиционная политика Китая: основные особенности и приоритеты / Т. А. Левченко // Фундаментальные исследования. – 2023. – № 7. – С. 39–44.
27. Топ-5 вариантов для инвестиций в Германии // vc.ru. – URL: <https://vc.ru/id2410926/893211-top-5-variantov-dlya-investicii-v-germanii> (дата обращения: 07.06.2025).
28. Гид по мерам государственной поддержки бизнеса в Республике Беларусь // Национальное агентство инвестиций и приватизации. – URL: https://investinbelarus.by/upload/medialibrary/048/69gb2t2hq2ccppzd2j3qsz1c6qldjud/State_Support_may.pdf (дата обращения: 07.06.2025).
29. Мацукевич, Н. А. Государственно-частное партнерство в управлении инвестиционной активностью региона / Н. А. Мацукевич, В. А. Коврей // Наука и инновации. – 2023. – № 2 (240). – С. 49–55.

References

1. O mestnom upravlenii i samoupravlenii v Respublike Belarus': Zakon Resp. Belarus' ot 4 yanvarya 2010 g. № 108-Z: v red. ot 11 oktyabrya 2024 g. № 36-Z // illex : inform. pravovaya sistema (data obrashcheniya: 07.06.2025).
2. 14-j pyatiletnij plan Kitaya: Ekonomicheskij rost, innovacii i ambicii do 2035 goda // Dzen. – URL: <https://dzen.ru/a/Z3znfQFuQtSLQO7> (data obrashcheniya: 25.05.2025).
3. Strategii Kitajskoj Narodnoj Respubliki «Sdelano v Kitae – 2025» i «Internet plus» // Zel'venskij rajonnyj ispolnitel'nyj komitet. – URL: <https://zelva.gov.by/uploads/files/Strategii-KNR-Sdelano-v-Kitae-i-Internet.docx?ysclid=mb9r9rkkk4417778221> (data obrashcheniya: 16.04.2025).
4. Kitaj sformuliroval strategiyu razvitiya do 2050 goda / ZHurnal «Strategiya». – URL: <https://strategyjournal.ru/rossiya-i-mir/kitaj-sformuliroval-strategiyu-razvitiyu-do-2050-goda/?ysclid=mbdu6adj67312743103> (data obrashcheniya: 18.04.2025).
5. O nacional'nyh celyah razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda i na perspektivu do 2036 goda: Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii, 7 maya, 2024 g., № 309 // KonturNormativ. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=470566&ysclid=mb561i4ja4531615501> (data obrashcheniya: 18.04.2025).
6. Strategiya prostranstvennogo razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda s prognozom do 2036 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii, 28 dek., 2024 g., № 4146-r // Sudebnye i normativnye akty RF. – URL: https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-28122024-n-4146-r/strategiia-prostranstvennogo-razvitiia-rossiiskoi-federatsii_2/?ysclid=mb56tawdwn962267930 (data obrashcheniya: 18.04.2025).

7. Obshchenacional'nyj plan dejstvij, obespechivayushchih vosstanovlenie zanyatosti i dohodov naseleniya, rost ekonomiki i dolgosrochnye strukturnye izmeneniya v ekonomike: protokol Pravitel'stva RF, 23 sent. 2020 g., protokol № 36, razdel VII (02.10.2020, № P13-60855) // Konsul'tantPlyus. Inform. Pravovaya sistema (data obrashcheniya: 20.04.2025).
8. Edinyj plan po dostizheniyu nacional'nyh celej razvitiya RF na period do 2024 goda i na planovyj period do 2030 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii, 1 oktyabrya 2021 g., № 2765-r // Konsul'tantPlyus. Inform. Pravovaya sistema (data obrashcheniya: 06.05.2025).
9. Prognoz social'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2036 goda (odobren na zasedanii Pravitel'stva Rossijskoj Federacii 22.11.2018) // Konsul'tantPlyus. Inform. Pravovaya sistema (data obrashcheniya: 07.05.2025).
10. Timonina, I. L. Novaya strategiya prostranstvennogo razvitiya Yaponii: vyzovy XXI veka / I. L. Timonina // YAponskie issledovaniya. – 2020. – № 4. – S. 40–63.
11. Doklad Evrazijskoj ekonomicheskoy komissii «O sostoyanii delovogo i investicionnogo klimata v gosudarstvakh-chlenah Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza» // Evrazijskaya ekonomicheskaya komissiya. – URL: <https://eec.eaeunion.org/upload/files/dobd/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%2040723.pdf> (data obrashcheniya: 07.06.2025).
12. Abbasov, S. E. Zarubezhnyj opyt regulirovaniya i stimulirovaniya investicionnoj deyatel'nosti / S. E. Abbasov, A. ZH. Asainov // Molodoy uchenyj. – 2023. – № 22 (469). – S. 157–159.
13. Nasrutdinov, M. N. Zarubezhnyj opyt ispol'zovaniya instrumentov regional'noj politiki upravleniya investicionnoj aktivnost'yu territorij / M. N. Nasrutdinov, M. M. Gadzhiev, O. V. Zaborovskaya // Fundamental'nye issledovaniya. – 2021. – № 3. – S. 120–127.
14. Nev'yanceva, L. S. Zarubezhnyj opyt realizacii regional'noj investicionnoj politiki i vozmozhnosti ego primeneniya v usloviyah Rossii / L. S. Nev'yanceva // Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Seriya: Gosudarstvennoe i municipal'noe upravlenie. – 2022. – T. 9, № 1. – S. 94–103.
15. Macukevich, N. A. Metodologicheskie aspekty upravleniya investicionnoj aktivnost'yu regiona / N. A. Macukevich // Ekonomika i banki. – 2024. – № 2. – S. 65–75.
16. Putin poruchil utverdit' individual'nye programmy razvitiya dlya 10 otstayushchih regionov // TASS. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/20876271?ysclid=mbma5gza7x800792950> (data obrashcheniya: 06.05.2025).
17. Investicii v regionah // Ministerstvo ekonomicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii. Investicionnyj standart. Normativnaya baza. – URL: <https://invest.economy.gov.ru/regional-investments> (data obrashcheniya: 12.05.2025).
18. Murodov, M. M. Instrumenty gosudarstvennogo stimulirovaniya investicionnoj deyatel'nosti za rubezhom / M. M. Murodov // Iqtisodiyot va innovatsion texnologiyalar. – 2021. – № 1 (00051). – S. 127–135. – URL: https://iqtisodiyot.tsue.uz/sites/default/files/maqolalar/14_M_Murodov.pdf (data obrashcheniya: 05.06.2025).
19. YAponiya nacelena na rasshirenie pryamyh inostrannyh investicij do 150 trln jen k nachalu 2030-h godov // www.nippon.com. Sovremennyy vzglyad na YAponiyu. – URL: <https://www.nippon.com/ru/news/yj/2025060200910> (data obrashcheniya: 06.06.2025).
20. Ekonomicheskie obzory OESR: YAponiya 2024 // OESR. Publikacii. – URL: https://www.oecd.org/en/publications/oecd-economic-surveys-japan-2024_41e807f9-en.html (data obrashcheniya: 05.06.2025).
21. Momotyuk, S. V. Mekhanizmy gosudarstvennoj podderzhki malogo i srednego predprinimatel'stva v Germanii / S. V. Momotyuk, N. V. Bogdanova // Rossiya v global'nom mire. Vyp. 2.: Obshchestvo i politika – 2024. – № 27. – S. 99–116.
22. Mery podderzhki biznesa v 2024 godu: usloviya i poryadok polucheniya // Glavbuh. Assistent. – URL: https://gba.business.ru/blog/mer-y-podderzhki-biznesa-v-2024-godu-usloviya-i-poryadok-polucheniya/?utm_campaign=red_block_content_link&utm_content=art&utm_medium=refer&utm_source=www.business.ru&utm_term=3969 (data obrashcheniya: 20.04.2025).
23. Biznes-inkubatory v YAponii // AAA ADVISER REALITY. – URL: <https://vnz.su/articles/biznes-inkubatory-v-japonii/?ysclid=mcoz1u5zqj145086671> (data obrashcheniya: 06.06.2025).
24. Naumova, I. YU. Subsidii kak instrument stimulirovaniya investicionnoj privilekatel'nosti regionov YAponii / I. YU. Naumova, M. V. Panteleeva // Izvestiya Vostochnogo instituta. – 2022. – № 2. – S. 39–48.
25. Investicionnaya strategiya Kitaya na 2025 god // ibMedia. – URL: <https://ibmedia.by/news/investitsionnaya-strategiya-kitaya-na-2025-god> (data obrashcheniya: 02.05.2025).
26. Levchenko, T. A. Investicionnaya politika Kitaya: osnovnye osobennosti i priority / T. A. Levchenko // Fundamental'nye issledovaniya. – 2023. – № 7. – S. 39–44.
27. Top-5 variantov dlya investicij v Germanii // vc.ru. – URL: <https://vc.ru/id2410926/893211-top-5-variantov-dlya-investicii-v-germanii> (data obrashcheniya: 07.06.2025).
28. Gid po meram gosudarstvennoj podderzhki biznesa v Respublike Belarus' // Nacional'noe agentstvo investicij i privatizacii. – URL: https://investinbelarus.by/upload/medialibrary/048/69gb2t2hq2ccppzd2j3qsz1c6qljdjud/State_Support_may.pdf (data obrashcheniya: 07.06.2025).
29. Macukevich, N. A. Gosudarstvenno-chastnoe partnerstvo v upravlenii investicionnoj aktivnost'yu regiona / N. A. Macukevich, V. A. Kovrej // Nauka i innovacii. – 2023. – № 2 (240). – S. 49–55.

Материал поступил 15.06.2025, одобрен 16.06.2025, принят к публикации 16.06.2025

МАКРОЭКОНОМИЧЕСКАЯ РЕЙТИНГОВАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ

В. Л. Мучинский

Магистр экономических наук, аспирант кафедры экономики и логистики, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: vladislavmucinskiy@gmail.com

Реферат

В условиях глобальных экономических трансформаций и усиливающейся межстрановой конкуренции вопрос объективности оценки конкурентоспособности национальной экономики становится критически важной задачей для любого государства. Существующие методологии зачастую не учитывают влияние ряда макроэкономических факторов, имеющих значительное влияние на уровень конкурентоспособности, что формирует необходимость в их экспертном анализе. В данной статье проведена углубленная макроэкономическая рейтинговая оценка факторов, влияющих на конкурентоспособность национальной экономики. Проведенное исследование позволяет систематизировать данные, оценить влияние каждой детерминанты и выявить ключевые взаимосвязи, способствующие объективной оценке конкурентных позиций. Комплексный подход позволил выработать теоретико-методологические рекомендации, способствующие оптимизации национальной экономической политики и значительно повысить точность прогнозирования конкурентоспособности национальной экономики. Практическая значимость исследования заключается в его способности обеспечить комплексное применение результатов для совершенствования управленческих стратегий, рационализации распределения ресурсов и создания стимулов для развития современных экономических секторов. Выявленные детерминанты предоставляют аналитическую базу для корректировки стратегических приоритетов, способствуя укреплению национального потенциала и повышению конкурентоспособности на международном уровне. На основе проведенного анализа выработан инструментарий, направленный на совершенствование существующих подходов оценки конкурентоспособности национальной экономики. Рекомендации позволят обеспечить эффективное распределение ресурсов, а также сформировать систему динамического контроля ключевых макроэкономических показателей с учетом глобальных трендов. Таким образом, выполненная макроэкономическая рейтинговая оценка факторов предоставляет всестороннее понимание состояния национальной экономики и перспектив ее развития. Применение выработанного рекомендаций способно укрепить конкурентные позиции государства и закладывает фундамент для долгосрочного экономического благополучия и устойчивого развития.

Ключевые слова: конкурентоспособность, макроэкономический анализ, факторы, корреляция, транспортно-логистический бизнес.

MACROECONOMIC ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING NATIONAL COMPETITIVENESS

V. L. Muchinsky

Abstract

In the context of global economic transformations and increasing intercountry competition, the issue of objectivity in assessing the competitiveness of the national economy is becoming a critical task for any state. Existing methodologies often do not take into account the influence of a number of macroeconomic factors that have a significant impact on the level of competitiveness, which creates the need for their expert analysis. This article provides an in-depth macroeconomic rating assessment of the factors affecting the competitiveness of the national economy. The conducted study allows us to systematize the data, assess the influence of each determinant and identify key relationships that contribute to an objective assessment of competitive positions. An integrated approach made it possible to develop theoretical and methodological recommendations that contribute to the optimization of national economic policy and significantly improve the accuracy of forecasting the competitiveness of the national economy. The practical significance of the study lies in its ability to ensure a comprehensive application of the results to improve management strategies, rationalize resource allocation and create incentives for the development of modern economic sectors. The identified determinants provide an analytical basis for adjusting strategic priorities, helping to strengthen national potential and increase competitiveness at the international level. Based on the analysis, a toolkit has been developed aimed at improving existing approaches to assessing the competitiveness of the national economy. The recommendations will ensure efficient resource allocation, as well as form a system of dynamic control of key macroeconomic indicators taking into account global trends. Thus, the performed macroeconomic rating assessment of factors provides a comprehensive understanding of the state of the national economy and its development prospects. The application of the developed recommendations can strengthen the competitive position of the state and lay the foundation for long-term economic well-being and sustainable development.

Keywords: competitiveness, macroeconomic analysis, factors, correlation, transport and logistics business.

Введение

В условиях современных глобальных трансформаций, характеризующихся ускоренной цифровизацией, разработкой инновационных технологий и перестройкой международных экономических связей, вопрос идентификации и оценки конкурентоспособности национальной экономики приобретает критическую значимость. Для решения данной задачи незаменимым инструментарием выступает макроэкономическая рейтинговая оценка. Во-первых, определение наиболее значимых факторов является абсолютной необходимостью при формировании наиболее эффективных экономических стратегий, направленных на улучшение инфраструктуры и стимулирование инноваций в той области, где это востребовано. Во-вторых, результаты макроэкономической рейтинговой оценки предоставляют бизнесу актуальную информацию, необходимую для оптимизации деятельности. Например, компании транспортно-логистического бизнеса могут использовать полученные данные при

совершенствовании управления цепочками поставок и, как следствие, повышать уровень своей конкурентоспособности на региональном, а в отдельных случаях и мировом рынках, что в свою очередь благоприятно сказывается на развитии национальной экономики.

Современные методики, такие как представленные Всемирным экономическим форумом и Международным институтом управленческого развития (далее IMD), служат основными инструментариями идентификации и оценки конкурентоспособности национальной экономики. Методология Всемирного экономического форума базируется на оценке двенадцати фундаментальных столпов (от институциональных условий до технологической готовности), что позволяет создать широкий портрет национальной экономики. Однако данная модель, несмотря на свою комплексность, в значительной мере опирается на традиционные макроэкономические индикаторы, что может ограничивать её чувствительность к новым драйверам развития, таким как цифровиза-

ция и эффективность транспортно-логистического бизнеса. В свою очередь, модель IMD характеризуется многофакторным и модульным подходом, который совмещает формализованные количественные показатели с эмпирически обоснованными качественными оценками, полученными на основе обширных бизнес-опросов. Такой интегрированный подход позволяет достичь более глубокого уровня аналитики и адаптировать процесс оценки конкурентоспособности национальной экономики под условия современного технологического прогресса, что особенно ценно в контексте необходимости учитывать влияние цифровых технологий и совершенствование транспортно-логистического бизнеса. Благодаря своей гибкости методика IMD предоставляет возможность для динамического пересмотра весовых коэффициентов и последующей интеграции дополнительных индикаторов, способных отразить современные тренды развития экономики.

Таким образом, можно констатировать, что в современной экономике сформировалась необходимость в уточнении и совершенствовании подходов определения конкурентоспособности национальной экономики, поскольку существующие методики в недостаточной степени отражают влияние современных факторов и имеют ограниченную адаптивность. Выбор методологии IMD для проведения экспертной оценки обоснован её структурной комплексностью, возможностью интегрирования как количественных, так и качественных данных, а также высоким потенциалом для дальнейшей модификации в соответствии с актуальными вызовами, характерными современному этапу развития экономики.

Макроэкономическая рейтинговая оценка факторов, влияющих на конкурентоспособность национальной экономики

Понимание детерминант валового внутреннего продукта (ВВП) является фундаментальной задачей для разработки эффективных макроэкономических стратегий и повышения конкурентоспособности национальной экономики. В данном исследовании проведен корреляционный анализ между уровнем ВВП и различными макроэкономическими факторами. Методологический подход основывался на использовании коэффициента корреляции Пирсона, имеющий следующий вид:

$$r_{xy} = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 * \sum(Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (1)$$

где X_i и Y_i – значения переменных;

$\bar{X}$ и $\bar{Y}$ – их средние значения.

Это статистический метод, который позволяет оценить степень линейной зависимости между двумя переменными. Выбранные для исследования факторы охватывают широкий спектр экономических аспектов: от экспортной активности и инновационного потенциала до налоговой политики и индикаторов социального благополучия. Полученные значения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты корреляционного анализа влияния исследуемых факторов на уровень ВВП

Показатель	Коэффициент корреляции с ВВП (r)
Население, млн чел.	0,89
Глобальный индекс экспорта, млн дол. США	0,96
Уровень ВНД на душу населения, дол. США	0,83
Общий бал LPI	0,75
Рейтинг мировой конкурентоспособности	0,53
Индекс развития цифровой экономики	0,47
Глобальный инновационный индекс	0,45
Глобальный индекс цифровизации	0,50
Индекс развития электронного правительства	0,42
Рейтинг качества жизни	0,30
Оценка B-READY	0,28
Удельный вес логистики в ВВП (%)	-0,05
Налог на доходы физических лиц (%)	-0,10
Корпоративный налог (%)	-0,15
Налог с продаж (%)	-0,08

Проведенный корреляционный анализ показал, что существует **сильная положительная корреляция** между уровнем ВВП и **значением глобального индекса экспорта** ($r = 0,96$). Это свидетельствует о том, что экспорт является одним из ключевых драйверов роста национальной экономики. Экспортоориентированные страны демонстрируют значительный прирост ВВП, что подчёркивает необходимость стимулирования отраслей, формирующих экспортный потенциал.

Демографический фактор также продемонстрировал **сильную положительную корреляцию** ($r = 0,89$). Густонаселенные страны достигают большего объема ВВП, что обуславливается укрупненными масштабами производства и потребления. Данная зависимость указывает, что для повышения **производительности труда** и устойчивого экономического развития необходимы инвестиции в **человеческий капитал**, например повышение уровня образования и здравоохранения. Уровень **валового национального дохода на душу населения (ВНД)** имеет тесную взаимосвязь с ВВП, что выражается в **высокой положительной корреляции** ($r = 0,83$). Можно утверждать, что экономическое благосостояние граждан напрямую связано с уровнем ВВП.

Совокупный индекс эффективности логистики (LPI) также выявил **значимую положительную корреляцию** ($r = 0,75$). Именно развитие транспортно-логистического бизнеса способствует повышению **операционной эффективности**, снижению **транзакционных издержек** и ускорению процессов торговли. **Инвестиции в транспортно-логистический бизнес** и внедрение передовых технологий управления цепями поставок являются критически важными для повышения уровня конкурентоспособности национальной экономики любой страны.

Рейтинг мировой конкурентоспособности продемонстрировал **умеренную положительную корреляцию** с ВВП ($r = 0,53$). Это свидетельствует о том, что страны с высоким уровнем конкурентоспособности национальной экономики должны продолжать **разработку и реализацию стратегий**, направленных на улучшение **институциональной среды**, защиту прав собственности и снижение регуляторных барьеров.

Глобальный индекс цифровизации и индекс развития цифровой экономики показали **слабую положительную корреляцию** ($r = 0,50$ и $r = 0,47$ соответственно). Несмотря на сравнительно низкие коэффициенты, цифровизация и инновационные технологии играют всё более значимую роль в современной экономике, способствуя внедрению **инноваций** и, соответственно, повышению производительности в целом. **Инвестиции в цифровизацию, развитие экосистемы стартапов и поддержка научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР)** способны в долгосрочной перспективе оказать положительный эффект на темпы роста национальной экономики.

Индекс развития электронного правительства продемонстрировал **слабую положительную зависимость** с ВВП ($r = 0,42$). Развитие электронного правительства способствует повышению **эффективности государственного управления** и снижению **административных издержек**, что впоследствии может положительно сказаться на экономической активности.

Индикаторы социального благополучия, такие как **рейтинг качества жизни** и **B-READY**, оказали менее существенное влияние на ВВП с коэффициентами корреляции $r = 0,30$ и $r = 0,28$ соответственно. Хотя влияние этих показателей менее выражено, они остаются важными для поддержания **социальной стабильности и устойчивости**. Фокусирование на **социальных программах**, улучшение **системы социального обеспечения** и инициатив по повышению качества жизни населения может способствовать **устойчивому развитию** и формированию **человеческого капитала**.

Особого внимания заслуживает тот факт, что показатели налоговой нагрузки продемонстрировали **слабую отрицательную корреляцию**. Это указывает на обратную зависимость между высокими ставками налогообложения и темпами экономического роста. **Пересмотр налоговой политики** с целью оптимизации налоговой нагрузки на бизнес и стимулирование инвестиционной активности может способствовать повышению уровня ВВП.

В связи с тем, что конкурентоспособность национальной экономики имеет фундаментальное значение для экономического развития и укрепления позиции страны на мировой арене, используя вышеупомянутую методологию, проведем исследование факторов, имеющих наибольшую зависимость с конкурентоспособностью. Итоговые значения проведенного исследования отображены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты корреляционного анализа влияния исследуемых факторов на конкурентоспособность

Показатель	Коэффициент корреляции с конкурентоспособностью (r)
Глобальный индекс цифровизации	0,85
Индекс развития цифровой экономики	0,82
Глобальный инновационный индекс	0,78
Индекс развития электронного правительства	0,75
Валовый национальный доход на душу населения	0,75
Рейтинг качества жизни	0,7
Общий балл LPI (Logistics Performance Index)	0,7
Оценка Business Ready (B-READY)	0,65
Валовый внутренний продукт (ВВП)	0,53
Глобальный индекс экспорта	0,5
Население	0,4
Налог на доходы физических лиц (%)	-0,2
Корпоративный налог (%)	-0,25
Налог с продаж (%)	-0,15

Экспертная оценка представленных данных показывает, что наиболее сильная положительная корреляция наблюдается у глобального индекса цифровизации ($r = 0,85$), индекса развития цифровой экономики ($r = 0,82$) и глобального инновационного индекса ($r = 0,78$). Данная зависимость свидетельствует о том, что страны с высоким уровнем цифровой трансформации и инновационной активности обладают значительным преимуществом в вопросе повышения конкурентоспособности национальной экономики. Интеграция цифровых технологий ускоряет обмен информацией, повышает эффективность производства и открывает новые возможности для развития бизнеса.

Индекс развития электронного правительства также имеет высокий коэффициент корреляции ($r = 0,75$), что подчёркивает важность эффективного государственного управления и предоставления электронных услуг с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики. Электронное правительство способствует снижению административных барьеров, повышает прозрачность и эффективность взаимодействия между государством, бизнесом и гражданами, что создаёт благоприятные условия для устойчивого экономического роста.

Значение коэффициента корреляции $r = 0,75$ у валового национального дохода (ВНД) на душу населения демонстрирует, что уровень благосостояния населения тесно связан с конкурентоспособностью национальной экономики. Высокий ВНД на душу населения не только отражает экономическое развитие страны, но и способствует привлечению квалифицированных кадров, стимулирует внутренний спрос и инвестирует в человеческий капитал, что в свою очередь повышает инновационный потенциал и продуктивность.

Рейтинг качества жизни и Общий балл LPI (Logistics Performance Index) имеют коэффициенты корреляции $r = 0,70$. Это указывает на то, что высокое качество жизни и эффективность транспортно-логистического бизнеса являются одними из ключевых факторов, влияющими на конкурентоспособности национальной экономики. Высокоразвитый транспортно-логистический бизнес способствует повышению эффективности и скорости проведения торговых операций, тем самым снижая издержки и повышая скорость и надёжность доставки товаров и оказания услуг, что критически важно в вопросе повышения конкурентоспособности национальной экономики.

Оценка BusinessReady (B-READY) с коэффициентом корреляции $r = 0,65$ указывает, что благоприятная бизнес-среда, характеризующаяся простотой ведения бизнеса, защитой прав собственности и прозрачной регуляторной системой, значительно влияет на конкурентоспособность национальной экономики. Это стимулирует предпринимательскую активность, привлекает иностранные инвестиции и способствует развитию инновационной деятельности.

Валовый внутренний продукт (ВВП) и глобальный индекс экспорта демонстрируют умеренную положительную корреляцию с конкурентоспособностью ($r = 0,53$ и $r = 0,50$ соответственно).

Это свидетельствует о том, что масштаб экономики и внешнеторговая активность хотя и важны, но не являются определяющими факторами конкурентоспособности без сочетания с качественными аспектами, такими как инновации и транспортно-логистический бизнес.

Население имеет слабую положительную корреляцию ($r = 0,40$), тем самым указывая на то, что численность населения сама по себе не гарантирует высокого уровня конкурентоспособности национальной экономики. Ключевым фактором здесь является «качество» человеческого капитала, его образование, навыки, способность создавать инновационные решения, эффективные транспортно-логистические системы и другие.

Как в случае с ВВП, негативная корреляция наблюдается с налоговыми ставками: налог на доходы физических лиц ($r = -0,20$), корпоративный налог ($r = -0,25$) и налог с продаж ($r = -0,15$). Это может указывать на то, что высокие налоговые ставки могут сдерживать экономическую активность, снижать привлекательность страны для инвестиций и ограничивать возможности бизнеса для роста и инноваций.

Полученные результаты макроэкономической рейтинговой оценки указывают, что уровень конкурентоспособности национальной экономики напрямую зависит от степени развитости цифровизации, инноваций и транспортно-логистического бизнеса. Высокий уровень цифровизации ускоряет обмен информацией, повышает производительность и открывает новые рынки. Инновационная деятельность стимулирует создание новых продуктов и услуг, улучшает технологические процессы и повышает эффективность использования ресурсов. А высокоразвитый транспортно-логистический бизнес способствует повышению эффективности и скорости проведения торговых операций, тем самым снижая издержки и повышая скорость и надёжность доставки товаров и оказания услуг.

Используемый на современном этапе инструментарий идентификации и оценки конкурентоспособности национальной экономики

В настоящее время наиболее авторитетными и популярными методами определения конкурентоспособности национальной экономики являются: 1. «TheGlobalCompetitivenessReport» от Всемирного экономического форума. 2. «WorldCompetitivenessReport», рассчитанный Центром мировой конкурентоспособности (IMD). В рамках текущего исследования была выбрана методика IMD. Методология данного рейтинга основана на комплексном анализе множества факторов, которые влияют на способность страны создавать и поддерживать среду, способствующую развитию бизнеса и, как следствие, повышению уровня жизни населения.

Методология основана на двух основных принципах:

- **Комбинация статистических и опросных данных**, источниками которых являются: для статистических данных – показатели, полученные из международных, национальных и региональных источников; международных организаций (ОЭСР, Всемирный банк, Международный валютный фонд и др.); национальных статистических служб, центральных банков; опросные данные предполагают ежегодный опрос более 6000 бизнес-руководителей, по вопросам касающимся бизнес-среды, государственной политики и тому подобных, позволяющие объективно оценить те данные, которые не учитываются статистически.

- **Многофакторный анализ**, который состоит из четырех подфакторов:

1. **Экономическое развитие** – оценивает макроэкономические показатели страны, её интеграцию в мировую экономику, инвестиционный климат и динамику рынка труда (внутренняя экономика, международная торговля, международные инвестиции, занятость, цены);

2. **Эффективность правительства** – отражает качество политики, проводимой государством и институтами власти, а также их способность формировать условия для устойчивого роста национальной экономики (общественные финансы, фискальная политика, институциональные ограничения, бизнес-законодательство, социальная структура);

3. **Эффективность бизнеса** – показывает, насколько национальный бизнес эффективно использует ресурсы, адаптирован к флуктуациям и внедрению инноваций (производительность и эффективность, рынок труда, финансы, управленческие практики, отношения и ценности);

4. **Инфраструктура** – демонстрирует наличие и качество инфраструктуры, обеспечивающую функционирование бизнеса и экономики в целом (основная, технологическая и научная инфраструктура, здоровье и окружающая среда, образование).

Данными для подфакторов выступают: ВВП на душу населения, рост ВВП, инфляция, торговый баланс, государственный долг, бюджетный дефицит/профицит, лёгкость ведения бизнеса, доступ к финансированию, предпринимательский дух, качество дорог, доступ к Интернету, уровень образования, расходы на науку и исследования и другие. Получив все необходимые показатели, в целях обеспечения сопоставимости данных стран с разными экономическими масштабами их нормализуют по шкале от 0 до 100. Затем проводится расчёт среднего значения для каждого из 20 подфакторов, объединяя соответствующие нормализованные критерии, и вычисляется среднее значение каждого из четырёх факторов. Итоговый результат и формирует рейтинг конкурентоспособности национальной экономики.

В современном экономическом дискурсе рейтинг IMD выступает в качестве авторитетного индикатора конкурентоспособности национальной экономики. Тем не менее, учитывая динамические трансформации глобальной экономики, обусловленные повышением темпов цифровизации и развитием транспортно-логистического бизнеса, возникает необходимость реинжиниринга методологических подходов данного рейтинга. Экспертный анализ существующей методики IMD, выявляет её методологические лимитации, тем самым формируя необходимость в её усовершенствовании посредством интеграции дополнительных детерминантов конкурентоспособности, с акцентом на транспортно-логистический бизнес и цифровую экономику.

Деглобализация и технологические инновации существенно трансформировали параметры конкурентоспособности национальных экономик. Методология IMD является недостаточно чувствительной к изменениям, что приводит к искажению реальной картины конкурентных преимуществ государств. В контексте четвёртой промышленной революции (Индустрия 4.0) критически важно пересмотреть методологические основания рейтинговых систем, чтобы они адекватно отражали влияние цифровизации и эффективности работы транспортно-логистического бизнеса на макроэкономические показатели.

Замечания к существующей методологии:

- **Не объективность отражения современного экономического ландшафта** (текущая методология может быть устаревшей в контексте стремительных технологических изменений и не отражать новых реалий цифровой экономики).

- **Недостаточная чувствительность к качественным изменениям** (фокус на количественных показателях игнорирует качественные трансформации в экономике, связанные с инновационной культурой, цифровой грамотностью и эффективностью бизнес-моделей).

- **Недостаточная интеграция логистических индикаторов** (транспортно-логистический бизнес как ключевой фактор глобальных цепочек добавленной стоимости имеет непосредственное влияние на эффективность внутренней и внешней торговли, а соответственно и конкурентоспособность национальной экономики, но представлена минимально).

- **Ограниченное включение цифровых метрик** (цифровая трансформация экономики и общества отражается в недостаточной степени, несмотря на её растущее значение в контексте конкурентоспособности национальной экономики).

- **Фокус на количественных, а не качественных индикаторах** (существующая методология может недооценивать такие критические аспекты, как инновационная культура, уровень цифровой компетентности и адаптивность к технологическим изменениям).

Теоретико-методологические рекомендации повышения эффективности оценки национальной конкурентоспособности, проводимой Международным институтом управленческого развития (IMD WorldCompetitivenessRanking)

Учитывая указанные методологические рекомендации, предлагается интеграция следующих элементов в методологию IMD:

1. Инкорпорация расширенных логистических индикаторов.

Предлагаемые индикаторы:

- **Удельный вес логистики в ВВП (%)**: отражает экономическую значимость транспортно-логистического бизнеса.

- **Совокупный индекс логистической эффективности (LPI)**: предоставляет комплексную оценку логистической инфраструктуры, таможенных процедур и качества логистических услуг.

2. Усиление цифровых метрик в оценочной модели.

Предлагаемые индикаторы:

- **Индекс цифровой конкурентоспособности**: измеряет способность страны интегрировать и использовать цифровые технологии в экономике.

- **Глобальный индекс киберграмотности**: оценивает уровень цифровых навыков населения и готовность к цифровой трансформации.

3. Ревизия весовых коэффициентов в моделировании.

Предлагаемые изменения:

- Увеличение весовых коэффициентов для логистических и цифровых показателей.

- Дифференциация весов в зависимости от уровня экономического развития и специфики стран.

4. Моделирование взаимодействующих эффектов.

Предлагаемые подходы:

- Включение специализированных эконометрических моделей, учитывающих взаимодействия между переменными.

- Использование индексов композитного характера для оценки комплексного влияния.

На основе предложений формируется обновлённая методология с акцентом на современные детерминанты конкурентоспособности:

1. Экономическая эффективность:

- ВВП на душу населения.
- Индекс развития человеческого потенциала.
- **Индекс логистической деятельности.**
- **Совокупный индекс логистической эффективности (LPI).**

2. Эффективность государственного управления:

- Индекс восприятия коррупции.
- Фискальная стабильность.
- **Индекс развития электронного правительства (EGDI).**
- Качество институциональных механизмов.

3. Бизнес-эффективность:

- **Индекс цифровой конкурентоспособности.**
- **Глобальный инновационный индекс (GII).**
- Доступность финансовых ресурсов.
- Уровень предпринимательской активности.

4. Инфраструктура и технологическое развитие:

- **Глобальный индекс киберграмотности.**
- Инвестиции в НИОКР.
- Качество образовательной системы.
- Технологическая инфраструктура.

Обоснование предложенных изменений

Транспортно-логистический бизнес как стратегический фактор: в условиях глобальных цепочек поставок эффективность логистики определяет скорость и стоимость движения товаров и услуг, существенно влияя на конкурентоспособность национальной экономики. Интеграция логистических индикаторов позволит более точно оценить потенциал стран в международной торговле.

Цифровая экономика и инновации: быстрая цифровизация и развитие технологий требуют от стран высокой адаптивности и инвестиций в цифровую инфраструктуру. Увеличение веса цифровых индикаторов отразит реальное влияние этих факторов на экономический рост и конкурентоспособность национальной экономики.

Мультидисциплинарный подход: учитывая сложность современных экономических систем, методология должна интегрировать междисциплинарные показатели, отражающие социальные, технологические и институциональные аспекты.

Рекомендации по внедрению и апробации усовершенствованной методологии:

- **Пилотное внедрение:** проведение пилотных исследований на выборке стран для тестирования предложенной модели и выявления возможных методологических проблем.

- **Академическое и экспертное рецензирование:** привлечение к обсуждению научного сообщества и специалистов в области транспортно-логистического бизнеса, цифровой экономики и статистического анализа.

- **Международное сотрудничество:** взаимодействие с международными организациями, такими как Всемирный банк и ОЭСР, для согласования и стандартизации методологии.

Заключение

Современная экономика находится в состоянии постоянной трансформации под влиянием цифровых технологий и развития глобального транспортно-логистического бизнеса. Одним из инструментов оценки конкурентоспособности национальной экономики может служить макроэкономическая рейтинговая оценка факторов, влияющих на нее. Методология оценки конкурентоспособности должна быть динамичной и отражать эти изменения для предоставления релевантных и точных оценок. Используемый в данном исследовании комплексный анализ таких показателей, как ВВП, индекс логистической эффективности, уровень цифровизации, инновационный потенциал и другие, демонстрирует, что устойчивый экономический рост возможен только при синергии усилий государства, бизнеса и общества. Инвестиции в транспортно-логистический бизнес, цифровую экономику, инновации и человеческий капитал являются ключевыми элементами стратегии, направленной на критически важные аспекты процесса повышения конкурентоспособности национальной экономики.

Список цитированных источников

- Смит, А. Исследование о природе и причинах богатства народов : монография / А. Смит. – М. : Соцэкгиз, 1962. – 686 с.
- Рикардо, Д. Начала политической экономии и налогового обложения : монография / Д. Рикардо. – М. : Эксмо, 2007. – 953 с.
- Милль, Дж. Основы политической экономии : в 3 т. / Дж. Милль. – М. : Прогресс, 1980. – Т. 1. – 457 с.
- Маршалл, А. Принципы экономической науки : в 3 т. / А. Маршалл. – М. : Прогресс, 1993. – Т. 1. – 414 с.
- Чемберлин, Э. Теория монополистической конкуренции : монография / Э. Чемберлин. – М. : Экономика, 1996. – 349 с.
- Робинсон, Дж. Экономическая теория несовершенной конкуренции : монография / Дж. Робинсон. – М. : Прогресс, 1986. – 471 с.
- Полусмакова, Н. С. Развитие концепций конкуренции: эволюционный подход / Н. С. Полусмакова // Вестник Волгоградского государственного университета. Сер. 3: Экономика. Экология. – 2011. – № 1. – С. 13–19.
- Надеин, Н. В. Теоретические исследования формирования и развития конкурентоспособности организаций / Н. В. Надеин // Вестник Самарского государственного университета. – 2015. – № 2. – С. 157–163.
- Портер, М. Е. Конкуренция : монография / М. Е. Портер. – М. : Вильямс, 2005. – 608 с.
- Томпсон, А. А. мл. Стратегический менеджмент: концепции и ситуации : учебник для вузов / А. А. мл. Томпсон, А. Дж. III Стрикленд. – М. : ИНФРА-М, 2000. – 412 с.
- Понятие и сущность теории М. Портера о конкуренции. – URL: <https://baribar.kz/student/22814/ponyatie-i-sushchnost-teorii-m-portera-o-konkurentssii> (дата обращения: 23.10.2023).
- Портер, Майкл. Международная конкуренция: Конкурентные преимущества стран: монография / Майкл Портер. – М. : Международные отношения, 1993. – 895 с.
- Ойкен, В. Основные принципы экономической политики / В. Ойкен. – М. : Прогресс, 1995. – 426 с.
- Михненко, О. Е. Стратегическая конкурентоспособность транспортной компании как объект управления / О. Е. Михненко, М. Ю. Подкопаев // ЭТАП: Экономическая теория, анализ, практика. – 2014. – № 2. – С. 100–106.
- Тетерин, Т. А. Экономика и управление предприятий (организаций) АПК: ресурсы, резервы, развитие : учебно-методическое пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности 1-74 01 01 Экономика и организация производства в отраслях АПК / Т. А. Тетерин; Минсельхозпрод РБ, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет». – Минск : БГАТУ, 2019. – 736 с.
- Ивуть, Р. Б. Теоретические и прикладные основы совершенствования конкурентоспособности предприятий сельскохозяйственного машиностроения и их трансформация к условиям глобального рынка / Р. Б. Ивуть, И. В. Емельянович. – Минск : БНТУ, 2014. – 308 с.
- Портер, М. Конкуренция: пер. с англ. / М. Портер. – М. : Издательство «Вильямс», 2021. – 608 с.
- Иванов, А. А. Новые формы рыночной конкуренции в цифровой экономике / А. А. Иванов // Экономика и управление. – 2022. – № 4. – С. 25–31.
- Кузнецов, М. П. Использование больших данных в оценке конкурентоспособности транспортно-логистических компаний / М. П. Кузнецов // Информационные технологии в экономике. – 2023. – № 1. – С. 40–47.
- Сидорова, Е. М. Экологическая ответственность в логистике как фактор конкурентоспособности / Е. М. Сидорова // Устойчивое развитие экономики. – 2022. – № 3. – С. 55–62.

References

- Smit, A. Issledovanie o prirode i prichinah bogatstva narodov : monografiya / A. Smit. – M. : Socekgiz, 1962. – 686 s.
- Rikardo, D. Nachala politicheskoy ekonomii i nalogovogo oblozheniya : monografiya / D. Rikardo. – M. : Eksmo, 2007. – 953 s.
- Mill', Dzh. Osnovy politicheskoy ekonomii : v 3 t. / Dzh. Mill'. – M. : Progress, 1980. – T. 1. – 457 s.
- Marshall, A. Principy ekonomicheskoy nauki : v 3 t. / A. Marshall. – M. : Progress, 1993. – T. 1. – 414 s.
- CHemberlin, E. Teoriya monopolisticheskoy konkurencii : monografiya / E. CHemberlin. – M. : Ekonomika, 1996. – 349 s.
- Robinson, Dzh. Ekonomicheskaya teoriya nesovershennoy konkurencii : monografiya / Dzh. Robinson. – M. : Progress, 1986. – 471 s.
- Polusmakova, N. S. Razvitiye koncepcij konkurencii: evolyucionnyy podhod / N. S. Polusmakova // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 3: Ekonomika. Ekologiya. – 2011. – № 1. – S. 13–19.
- Nadein, N. V. Teoreticheskie issledovaniya formirovaniya i razvitiya konkurentosposobnosti organizacij / N. V. Nadein // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2015. – № 2. – S. 157–163.
- Porter, M. E. Konkurenciya : monografiya / M. E. Porter. – M. : Vil'yams, 2005. – 608 s.
- Tompson, A. A. ml. Strategicheskij menedzhment: koncepcii i situacii : uchebnik dlya vuzov / A. A. ml. Tompson, A. Dzh. III Striklend. – M. : INFRA-M, 2000. – 412 s.
- Ponyatie i sushchnost' teorii M. Portera o konkurencii. – URL: <https://baribar.kz/student/22814/ponyatie-i-sushchnost-teorii-m-portera-o-konkurentssii> (data obrashcheniya: 23.10.2023).
- Porter, Majkl. Mezhdunarodnaya konkurenciya: Konkurentnye preimushchestva stran: monografiya / Majkl Porter. – M. : Mezhdunarodnye otnosheniya, 1993. – 895 s.
- Ojken, V. Osnovnye principy ekonomicheskoy politiki / V. Ojken. – M. : Progress, 1995. – 426 s.
- Mihnenko, O. E. Strategicheskaya konkurentosposobnost' transportnoj kompanii kak ob'ekt upravleniya / O. E. Mihnenko, M. YU. Podkopaev // ETAP: Ekonomicheskaya teoriya, analiz, praktika. – 2014. – № 2. – S. 100–106.
- Teterinec, T. A. Ekonomika i upravlenie predpriyatij (organizacij) APK: resursy, rezervy, razvitiye : uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov vuzov, obuchayushchihya po special'nosti 1-74 01 01 Ekonomika i organizaciya proizvodstva v otraslyah APK / T. A. Teterinec; Minsel'hozprod RB, UO «Belorusskij gosudarstvennyj agrarnyj tekhnicheskij universitet». – Minsk : BGATU, 2019. – 736 s.
- Ivut', R. B. Teoreticheskie i prikladnye osnovy sovershenstvovaniya konkurentosposobnosti predpriyatij sel'hozmashinostroeniya i ih transformaciya k usloviyam global'nogo rynka / R. B. Ivut', I. V. Emel'yanovich. – Minsk : BNTU, 2014. – 308 s.
- Porter, M. Konkurenciya: per. s angl. / M. Porter. – M. : Izdatel'stvo «Vil'yams», 2021. – 608 s.
- Ivanov, A. A. Novye formy rynochnoj konkurencii v cifrovoj ekonomike / A. A. Ivanov // Ekonomika i upravlenie. – 2022. – № 4. – S. 25–31.
- Kuznecov, M. P. Ispolzovanie bol'shih dannyh v ocenke konkurentosposobnosti transportno-logisticheskikh kompanij / M. P. Kuznecov // Informacionnye tekhnologii v ekonomike. – 2023. – № 1. – S. 40–47.
- Sidorova, E. M. Ekologicheskaya otvetstvennost' v logistike kak faktor konkurentosposobnosti / E. M. Sidorova // Ustoichivoe razvitiye ekonomiki. – 2022. – № 3. – S. 55–62.

Материал поступил 03.04.2025, одобрен 01.05.2025, принят к публикации 29.05.2025

УДК 339.137.2(075.8)

ИННОВАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬЮ УВО

Н. В. Немогай¹, Н. В. Бонцевич², С. Д. Колесников³

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры экономики и информационных технологий, Гомельский филиал Международного университета «МИТСО», Гомель, Беларусь, e-mail: niknemogay@tut.by

² Д. э. н., профессор, профессор кафедры экономики и информационных технологий Гомельский филиал Международного университета «МИТСО», Гомель, Беларусь, e-mail: nvbont@mail.ru

³ К. э. н., доцент, директор, Гомельский филиал Международного университета «МИТСО», Гомель, Беларусь, e-mail: gf@mitso.by

Реферат

Одним из перспективных направлений повышения эффективности отечественных учреждений высшего образования (УВО) в современных кризисных условиях является создание инновационной модели системы управления конкурентоспособностью УВО (ИСУКсп УВО).

Исследования осуществлялись по отработанным методическим рекомендациям в рамках выполнения комплексных исследовательских сквозных заданий (КИСЗ), практических занятий студентов, работы студенческих научных кружков, курсов подготовки (переподготовки) специалистов.

В результате выполненных исследований разработана и модифицирована под существующие внешние условия модель ИСУКсп УВО, направленная на активизацию деятельности управляемого объекта и обладающая высоким уровнем инновационной активности для преодоления существующих геополитических вызовов. Она включает два взаимосвязанных компонента, которые взаимодействуют между собой.

Первый компонент – внешнее окружение, который включает входные данные, выходные результаты, обратную связь и связь с внешней средой. В работе проведена детальная декомпозиция и анализ компонентов внешнего окружения модели ИСУКсп УВО в соответствии с современными реалиями.

Второй компонент, известный как «черный ящик», представляет собой внутреннюю структуру, которая включает в себя взаимосвязанные компоненты, обеспечивающие воздействие субъектов управления на объект, преобразование входных данных в выходные и достижение целей модели ИСУКсп УВО. Данный компонент также включает модифицированные подсистемы (измененные под современные реалии): научное сопровождение, целевую, обеспечивающую, управляемую и управляющую подсистемы.

Таким образом, разработанная модель ИСУКсп УВО основывается на взаимосвязанных компонентах внешнего окружения и внутренней структуры, предоставляя возможность более эффективного управления и достижения целей в условиях современных вызовов.

Статья является логическим продолжением работы авторов «Innovative system of training and maintenance decision-making», опубликованной в третьем издании Вестника БрГТУ за 2024 г.

Ключевые слова: геополитическая нестабильность, УВО, инновационная модель, конкурентоспособность (Ксп), система управления конкурентоспособностью УВО (СУКсп УВО), составляющая, подсистема, научное сопровождение, целевая, обеспечивающая, управляемая, управляющая.

AN INNOVATIVE MODEL OF THE HEA COMPETITIVENESS MANAGEMENT SYSTEM

N. V. Nemogai, N. V. Bontsevich, S. D. Kolesnikov

Abstract

One of the promising areas for increasing the efficiency of domestic higher education institutions (HEIs) in the current crisis conditions is the creation of an innovative model of the HEI competitiveness management system (IMCS HEI).

The research was carried out according to proven methodological recommendations within the framework of the implementation of complex research end-to-end tasks (CRCT); practical classes for students; the work of student research circles; and courses for training (retraining) specialists.

As a result of the research, the ICS HEI model was developed and modified to suit the existing external conditions, aimed at activating the activities of the managed object and possessing a high level of innovative activity to overcome existing geopolitical challenges. It includes two interconnected components that interact with each other.

The first component is the external environment, which includes input data, output results, feedback and communication with the external environment. The work provides a detailed decomposition and analysis of the components of the external environment of the ICS HEI model in accordance with modern realities.

The second component, known as the "black box", is an internal structure that includes interconnected components that ensure the impact of management entities on the object, the transformation of input data into output data and the achievement of the goals of the ICS HEI model. This component also includes modified subsystems (changed to suit modern realities): scientific support, target, supporting, managed and control subsystems, which will be developed in more detail in subsequent publications.

Thus, the developed model of the ISUKsp UVO is based on the interconnected components of the external environment and internal structure, providing the opportunity for more effective management and achieving goals in the face of modern challenges.

The article is a logical continuation of the authors' work "Innovative system of training and maintenance decision-making", published in the 3rd edition of 2024 of the Vestnik of BrSTU.

Keywords: geopolitical instability, UVO, innovative model, competitiveness (Ksp), competitiveness management system of UVO (CUCSp UVO), component, subsystem, scientific support, target, supporting, managed, control.

Введение

Обеспечение выживаемости в рыночных условиях существующей глобальной геополитической нестабильности – одна из важнейших задач современной экономики Беларуси, России и содружества независимых стран (СНГ), которую необходимо решать посред-

ством обеспечения конкурентоспособности базовых социально-политических, производственных и технических объектов, одними из первых в ряду которых являются профессиональные кадры (персонал), формирование которых осуществляют учреждения высшего образования (УВО) [1]. Исследования осуществлялись по отрабо-

Экономика

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-137-2-213-216>

танным методическим рекомендациям в рамках выполнения комплексных исследовательских сквозных заданий (КИСЗ), практических занятий студентов, работы студенческих научных кружков, курсов подготовки (переподготовки) специалистов.

Анализ исследований в указанной области показывает, что для повышения качества образовательного процесса в системе высшего образования могут быть применены два подхода. Первый подразумевает сертификацию текущих систем управления качеством по международным стандартам и создание системы качественного менеджмента (СМК) [2–6]. Однако практика показывает, что ожидаемых улучшений пока не достигнуто [3, 4].

Исходя из системного подхода, который применяется в известных исследованиях [5, 7, 8], можно предположить, что параллельно с методологией управления качеством также следует разработать методологию управления системой, то есть конкурентоспособностью в системе высшего образования. Таким образом, создание системы

управления конкурентоспособностью УВО (СУКспУВО) [9–15] в системе высшего образования будет целесообразным подходом.

С учетом вышеизложенного и инновационного подхода мы ставили своей целью рассмотрение основ повышения конкурентоспособности УВО путем создания соответствующей инновационной модели инновационной СУКспУВО, адаптированной к глобальной геополитической нестабильности, а также анализа ее элементов, ответственных за методологию подготовки современных специалистов.

Разработка модели инновационной системы управления конкурентоспособностью УВО (ИСУКсп УВО)

Анализ исследований в указанной области показал, что применительно к Беларуси, России и СНГ модель ИСУКсп УВО может быть представлена в виде двух взаимодействующих между собой (прямыми и обратными связями) блоков, представленных на рисунке 1 [8].

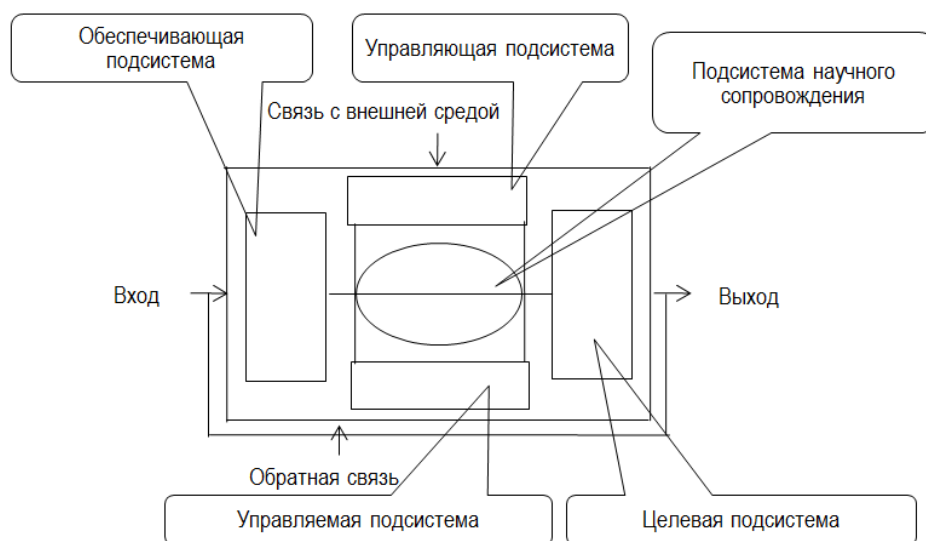


Рисунок 1 – Модель инновационной системы управления конкурентоспособностью УВО (ИСУКсп УВО)

1) Первый блок – внешнее окружение – включает взаимодействующие между собой (прямыми и обратными связями) четыре компонента: вход; выход; обратная связь; связь с внешней средой.

2) Второй компонент, известный как "черный ящик", представляет собой внутреннюю структуру модели ИСУКсп УВО. Этот компонент включает в себя элементы, которые взаимодействуют между собой с помощью прямых и обратных связей и реализуют процессный подход к управлению. Внутренняя структура обеспечивает воздействие субъектов управления на объект, преобразование входных данных в выходные и достижение целей системы управления конкурентоспособностью (включает подсистемы: научного сопровождения, целевую, обеспечивающую, управляемую и управляющую).

К компонентам внешнего окружения (первого блока) модели ИСУКсп УВО принадлежат: вход, выход, обратная связь, коммуникация с внешней средой.

К входу ИСУКсп УВО относятся: а) трудовые, материальные, информационные, финансовые и другие ресурсы; б) процедура профессионального приема абитуриентов, имеющих представление (ознакомленных) о будущей специальности.

К элементам результатов или выхода, определяющим ожидания рынка от системы высшего образования, относятся выпускники, обладающие конкурентоспособными навыками и преимуществами по сравнению с другими специалистами. Эти навыки включают умение разрабатывать системы управления конкурентоспособностью заданного объекта и способность управлять коллективом для достижения поставленных целей. Кроме того, можно также рассматривать следующие компоненты: доля трудоустроенных выпускников, среднемесячный доход выпускников в первый год после окончания образования, а также процент выпускников, обратившихся в систему высшего образования для получения дополнительного образования

(продолжение обучения, магистратура, аспирантура и т. д.). Основные условия выхода:

- высококачественные маркетинговые исследования и обоснованные нормативы конкурентоспособности будущих специалистов;
- обеспечение параметров конкурентоспособности входа модели ИСУКсп;
- обеспечение параметров конкурентоспособности в процессе образования;
- применение эффективных стратегий рекламы, каналов распределения студентов и других инструментов рыночного механизма.

К компонентам обратной связи ИСУКсп относятся:

- а) отзывы (рекламации) и предложения потребителей (заказчиков) УВО о конкурентоспособности его выпускников;
- б) число и конкурентоспособность результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ (НИОКР) УВО;
- в) число и престижность полученных УВО премий, призов, и др.

К внешней среде модели ИСУКсп, определяющей кто и как воздействует на УВО со стороны, относятся макросреда, мезосреда или инфраструктура региона и микросреда. Эти компоненты и их влияние на УВО подробно рассматривались в первой нашей статье.

Факторами конкурентоспособности УВО выступают: уровень конкурентоспособности специалистов (выпускников), а также конкурентный потенциал УВО. Последний представляет собой интегральный показатель, сочетающий организационно-технический уровень учебно-образовательного процесса (качество процессов) и уровень менеджмента (качество управления) УВО. Задача руководства УВО сводится к тому, чтобы, учитывая представленные факторы, обеспечить конкурентоспособного входа, затем – конкурентоспособного процесса («черный ящик»), что позволит и «выход» системы получить конкурентоспособным и достичь цели [5, 8].

Краткая характеристика внутренней структуры модели ИСУКсп УВО

Внутренняя структура модели ИСУКсп УВО, или «черный ящик», состоит из взаимодействующих между собой (прямыми и обратными связями) подсистем: научного сопровождения, целевой, обеспечивающей, управляемой и управляющей [7–11].

Составная часть научного сопровождения модели ИСУКсп УВО включает в себя различные инструменты, которые основаны на концепциях и принципах конкурентоспособной экономики. Эти инструменты включают методологические и методические основы, а также научные принципы и методы управления конкурентоспособностью системы высшего образования, которые адаптированы под современные условия.

Результаты этой подсистемы включают методологические подходы, направленные на повышение конкурентоспособности системы высшего образования. Также рассматриваются взаимосвязи между целями конкурентоспособности системы высшего образования, ее конкурентными преимуществами, а также целями конкурентоспособности и конкурентными преимуществами национальной экономики. Кроме того, изучается взаимосвязь и взаимодействие конкурентоспособности системы высшего образования с рынками государства, а также с мировой экономикой [14–21].

Целевая подсистема модели ИСУКсп УВО определяет цели и стратегии, направленные на обеспечение конкурентоспособности системы высшего образования в настоящем и будущем. Это достигается через конкурентоспособность учебно-образовательных услуг, которая определяется их качеством, ценой, затратами на образовательный процесс и размещением маркетинговых активностей. Также важным фактором является конкурентный потенциал системы высшего образования, который определяется качеством учебно-образовательных процессов и эффективностью управления.

Основные результаты целевой подсистемы включают стратегию по повышению конкурентоспособности системы высшего образования, которая соответствует целям социально-экономического развития страны, конкурентоспособности национальной экономики [15–17].

Обеспечивающая подсистема модели ИСУКсп УВО основана на нескольких основных компонентах: правовом, методическом, ресурсном и информационном [16–21]. В современных условиях она также должна включать защитный (охранный) компонент для обеспечения безопасности.

Информационное обеспечение в этой подсистеме рекомендуется осуществлять с использованием CALS-технологий, которые предполагают эффективное использование компьютерных и информационных технологий для максимального сбора, обмена и анализа данных [19].

Таким образом, обеспечивающая подсистема состоит из нескольких компонентов, включая правовые, методические, ресурсные и информационные, при этом акцент ставится на необходимости включения охранного компонента и использования CALS-технологий. В частности, к числу основных аспектов, определяющих эффективность применения CALS-технологий, для практической реализации концепции «конкуренция – конкурентоспособность» в УВО относятся:

- компьютерная автоматизация, позволяющая повысить производительность основных процессов и операций создания информации;
- информационная интеграция процессов, обеспечивающая минимизацию числа вспомогательных операций и многократное использование одних и тех же данных, а также управление качеством услуг и ресурсов.

Цель данной подсистемы заключается в обеспечении нормального функционирования системы высшего образования и повышении ее конкурентоспособности. Продуктами этой подсистемы являются научно обоснованные ресурсы, включающие информационные, трудовые, основные и оборотные средства, а также материальные и нематериальные ресурсы. Эффективное использование этих ресурсов обеспечивает конкурентоспособный результат.

Управляемая подсистема модели ИСУКсп УВО включает разработку мероприятий (продуктов), которые направлены на достижение стратегических и тактических целей по повышению конкурентоспособности управляемого объекта. Эти мероприятия основаны на принципах расширенного воспроизводства и инвестиционного развития, реализации маркетинговой политики, инновационного, финансового и антикризисного менеджмента.

В современных условиях важным дополнением этих мероприятий являются ресурсо-энергосберегающий и экологический компоненты, которые направлены на эффективное использование ресурсов и соблюдение экологических требований [15–17].

При детализации и декомпозиции управляемой подсистемы модели ИСУКсп УВО рекомендуется рассматривать функции стратегического маркетинга в сочетании с функциями стратегической логистики, а также дополнять функции тактического маркетинга функциями тактической логистики. Это позволит учесть весь комплекс маркетинго-логистической деятельности при управлении конкурентоспособностью системы высшего образования.

Управляющая подсистема модели ИСУКсп УВО включает: задачи, формы, методы и функции управления конкурентоспособностью УВО; государственное регулирование и создание условий для повышения конкурентоспособности УВО; формирование конкурентных преимуществ УВО; воспроизводственную, организационную, техническую, технологическую и социальную структуру управления, ориентированные на достижение стратегических и тактических целей повышения конкурентоспособности УВО; бизнес-планы повышения конкурентоспособности и развития УВО, его структурных и функциональных компонентов. Продукты подсистемы – прогнозы, планы, структуры, результаты анализа, оценки и стимулирования повышения конкурентоспособности УВО, в том числе за счет использования механизма равноправного государственно-частного партнерства (ГЧП).

По нашему мнению, большой практический интерес представляет возможность использования методики разработки модели ИСУКсп УВО в качестве комплексного исследовательского сквозного задания (КИСЗ), выполняемого при подготовке конкурентоспособных кадров (человеческих ресурсов: персонала, специалистов, руководителей и государственных служащих, преподавателей, студентов) экономической, юридической и инженерной направленности, активно разрабатываемого в Гомельском филиале Международного университета «МИТСО» [7, 8]. Без них в условиях жесткой конкуренции бесполезно надеяться на решение каких-либо крупных (комплексных, системных) социально-экономических проблем. Именно поэтому персонал стоит на первом месте в ряду объектов конкурентоспособности предприятия.

Выводы

Представлены методологические подходы к формированию двухкомпонентной инновационной модели системы управления конкурентоспособностью (СУКсп) учреждения высшего образования (УВО), предусматривающей устранение (нивелирование) существующих геополитических вызовов.

Первый компонент – внешнее окружение, который включает входные данные, выходные результаты, обратную связь и связь с внешней средой, которые были детально разработаны. Второй компонент, или «черный ящик», представляет собой внутреннюю структуру, которая включает в себя взаимосвязанные компоненты, обеспечивающие воздействие субъектов управления на объект, преобразование входных данных в выходные и достижение целей модели ИСУКсп УВО. Данный компонент также включает модифицированные подсистемы (измененные под современные реалии): научное сопровождение, целевую, обеспечивающую, управляемую и управляющую подсистемы.

В частности, составная часть научного сопровождения включает в себя различные инструменты, которые основаны на концепциях и принципах конкурентоспособной экономики: методологические и методические основы, а также научные принципы и методы управления конкурентоспособностью. Целевая подсистема определяет цели и стратегии, направленные на обеспечение конкурентоспособности системы высшего образования в настоящем и будущем, что достигается через конкурентоспособность учебно-образовательных услуг. Управляемая подсистема включает разработку мероприятий (продуктов), которые направлены на достижение стратегических и тактических целей по повышению конкурентоспособности управляемого объекта, основанных на принципах расширенного воспроизводства и инвестиционного развития, реализации маркетинговой политики, инновационного, финансового и антикризисного менеджмента. Управляющая подсистема, в частности, включает: задачи, формы, методы и функции управления; государственное регулиро-

вания и формирование конкурентных преимуществ воспроизводственную, организационную, техническую, технологическую и социальную структуру управления УВО.

Настоящие исследования является логическим продолжением нашей статьи «Innovative system of training and maintenance decision-making», опубликованной в третьем издании Вестника БрГТУ за 2024 г.

Список цитированных источников

1. Концепция национальной безопасности Республики Беларусь. – URL: https://www.mil.by/ru/military_policy/basic/koncept (дата обращения: 10.01.23).
2. Шимов, В. Н. Перспективы развития высшей школы Беларуси: поиск ответов на новые вызовы / В. Н. Шимов, Л. М. Крюков // Бел. эконом. журнал. – 2015. – № 3. – С. 79–103.
3. Ровба, Е. А. Инновационная бизнес-модель для классического университета: стратегия успеха как ответ на вызовы современности / Е. А. Ровба // Выш. школа. – 2016. – № 4. – С. 29–33.
4. Оценка качества образования: кто, как, когда и для кого может и должен его оценивать / Е. А. Ровба, Е. Л. Разова, С. Н. Щербинин, Ю. Л. Федосова // Выш. школа. – 2015. – № 2. – С. 13–17.
5. Фатхутдинов, Р. А. Управление конкурентоспособностью вуза / Р. А. Фатхутдинов // Высш. образов. в России. – 2006. – № 9. – С. 37–41.
6. Головачёв, А. С. Конкурентоспособность организации: учеб. пособие / А. С. Головачёв. – Минск : Выш. шк., 2012. – 319 с.
7. Немогай, Н. В. Конкурентоспособность предприятия: учебник / Н. В. Немогай, Н. В. Бонцевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – Минск : РИВШ, 2023. – 524 с.
8. Немогай, Н. В. Модель системы управления конкурентоспособностью предприятия / Н. В. Немогай, С. Д. Колесников // Стандарты и качество. – 2020. – № 6. – С. 88–93.
9. Колесников, С. Д. Конкурентоспособность учреждения образования: системно-процессный подход / С. Д. Колесников, Н. В. Немогай // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А. А. Куляшова. – 2020. – № 1 (55). – С. 24–30.
10. Колесников, С. Д. Конкурентоспособность учреждения образования: системно-процессный подход, подсистема научного обоснования / С. Д. Колесников, Н. В. Немогай // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А. А. Куляшова. – 2020. – № 1 (55). – С. 34–40.
11. Немогай, Н. В. Роль обеспечивающей подсистемы в управлении конкурентоспособностью предприятия / Н. В. Немогай, С. Д. Колесников // Стандарты и качество. – 2023. – № 1. – С. 98–103.
12. Фатхутдинов, Р. А. Управление конкурентоспособностью организации: учебник / Р. А. Фатхутдинов. – М. : Маркет ДС, 2008. – 432 с.
13. Философова, Т. Г. Конкуренция. Инновации. Конкурентоспособность / Т. Г. Философова, В. А. Бакон. – М. : Юнити-Дана, 2013. – 296 с.
14. Новикова, И. Государственно-частное партнёрство-мода или тренд / И. Новикова // Эконом. Беларуси. – 2013. – № 1. – С. 48–54.
15. Шимов, В. Н. Движущие силы инноваций и «ловушки развития». Инновационное развитие экономики Беларуси: движущие силы и рациональные приоритеты / В. Н. Шимов, Л. М. Крюков. – Минск : БГЭУ, 2014. – 276 с.
16. Шимова, О. С. Экологические проблемы и жизненные условия / О. С. Шимова // Беларусь: выбор пути. Национальный отчет о человеческом развитии 2000. – Минск : UNDP, 2000. – С. 76–83.
17. Шарловская, Г. А. Конкурентоспособность Республики Беларусь в мировой экономике / Г. А. Шарловская // Бел. эконом. журнал. – 2016. – № 1. – С. 22–41.
18. Экономика организации (предприятия): учеб. пособие / Л. Н. Нехорошева, Е. С. Романова, Э. Хостилович, А. П. Морова ; под ред. Л. Н. Нехорошевой. – Минск : БГЭУ, 2014. – 573 с.
19. Экономический механизм развития предприятия: учеб. пособие : в 2 ч. / С. А. Пелих, И. В. Бачило, Ф. Ф. Иванов, С. И. Прокопченко ; под общ. ред. С. А. Пелиха. – Минск : Академия управления при Президенте Респ. Беларусь, 2006. – Ч. 2: Организационно-экономический механизм рыночной адаптации предприятиями. – 271 с.
20. Юданов, А. Ю. Конкуренция: теория и практика: учеб. пособие / А. Ю. Юданов. – М. : Гром-Пресс, 2002. – 365 с.
21. Яшева, Г. А. Методология формирования и оценки системы управления конкурентоспособностью / Г. А. Яшева // Маркетинг. Реклама и сбыт. – 2003. – № 8. – С. 21–30.

References

1. Konceptsiya nacional'noj bezopasnosti Respubliki Belarus'. – URL: https://www.mil.by/ru/military_policy/basic/koncept (data obrashcheniya: 10.01.23).
2. SHimov, V. N. Perspektivy razvitiya vysshej shkoly Belarusi: poisk otvetov na novye vyzovy / V. N. SHimov, L. M. Kryukov // Bel. ekonom. zhurnal. – 2015. – № 3. – S. 79–103.
3. Rovba, E. A. Innovacionnaya biznes-model' dlya klassicheskogo universiteta: strategiya uspekha kak otvet na vyzovy sovremennosti / E. A. Rovba // Vysh. shkola. – 2016. – № 4. – S. 29–33.
4. Ocenka kachestva obrazovaniya: kto, kak, kogda i dlya kogo mozhet i dolzhen ego ocenivat' / E. A. Rovba, E. L. Razova, S. N. SHcherbinin, YU. L. Fedosova // Vysh. shkola. – 2015. – № 2. – S. 13–17.
5. Fathutdinov, R. A. Upravlenie konkurentosposobnost'yu vuza / R. A. Fathutdinov // Vyssh. obrazov. v Rossii. – 2006. – № 9. – S. 37–41.
6. Golovachyov, A. S. Konkurentosposobnost' organizacii: ucheb. posobie / A. S. Golovachyov. – Minsk : Vysh. shk., 2012. – 319 s.
7. Nemogaj, N. V. Konkurentosposobnost' predpriyatiya: uchebnik / N. V. Nemogaj, N. V. Boncevich. – 3-e izd., pererab. i dop. – Minsk : RIVSH, 2023. – 524 s.
8. Nemogaj, N. V. Model' sistemy upravleniya konkurentosposobnost'yu predpriyatiya / N. V. Nemogaj, S. D. Kolesnikov // Standarty i kachestvo. – 2020. – № 6. – S. 88–93.
9. Kolesnikov, S. D. Konkurentosposobnost' uchrezhdeniya obrazovaniya: sistemno-processnyj podhod / S. D. Kolesnikov, N. V. Nemogaj // Vesnik Magilyoyskaga dzyarzhaynaga universiteta imya A. A. Kulyashova. – 2020. – № 1 (55). – S. 24–30.
10. Kolesnikov, S. D. Konkurentosposobnost' uchrezhdeniya obrazovaniya: sistemno-processnyj podhod, podsistema nauchnogo obosnovaniya / S. D. Kolesnikov, N. V. Nemogaj // Vesnik Magilyoyskaga dzyarzhaynaga universiteta imya A. A. Kulyashova. – 2020. – № 1 (55). – S. 34–40.
11. Nemogaj, N. V. Rol' obespechivayushchej podsistemy v upravlenii konkurentosposobnost'yu predpriyatiya / N. V. Nemogaj, S. D. Kolesnikov // Standarty i kachestvo. – 2023. – № 1. – S. 98–103.
12. Fathutdinov, R. A. Upravlenie konkurentosposobnost'yu organizacii: uchebnik / R. A. Fathutdinov. – M. : Market DS, 2008. – 432 s.
13. Filosofova, T. G. Konkurenciya. Innovacii. Konkurentosposobnost' / T. G. Filosofova, V. A. Bakov. – M. : YUniti-Dana, 2013. – 296 s.
14. Novikova, I. Gosudarstvenno-chastnoe partnyorstvo-moda ili trend / I. Novikova // Ekonom. Belarusi. – 2013. – № 1. – S. 48–54.
15. SHimov, V. N. Dvizhushchie sily innovacij i «lovushki razvitiya». Innovacionnoe razvitie ekonomiki Belarusi: dvizhushchie sily i racional'nye priority / V. N. SHimov, L. M. Kryukov. – Minsk : BGEU, 2014. – 276 s.
16. SHimova, O. S. Ekologicheskie problemy i zhiznennye usloviya / O. S. SHimova // Belarus': vybor puti. Nacional'nyj otchet o chelovecheskom razvitii 2000. – Minsk : UNDP, 2000. – S. 76–83.
17. SHmarlovskaya, G. A. Konkurentosposobnost' Respubliki Belarus' v mirovoj ekonomike / G. A. SHmarlovskaya // Bel. ekonom. zhurnal. – 2016. – № 1. – S. 22–41.
18. Ekonomika organizacii (predpriyatiya): ucheb. posobie / L. N. Nekhorosheva, E. S. Romanova, E. Hostilovich, A. P. Morova ; pod red. L. N. Nekhoroshevoj. – Minsk : BGEU, 2014. – 573 s.
19. Ekonomicheskij mekhanizm razvitiya predpriyatiya: ucheb. posobie : v 2 ch. / S. A. Pelihi, I. V. Bachilo, F. F. Ivanov, S. I. Prokopnenko ; pod obshch. red. S. A. Pelihi. – Minsk : Akademiya upravleniya pri Prezidente Resp. Belarus', 2006. – CH. 2: Organizacionno-ekonomicheskij mekhanizm rynochnoj adaptacii predpriyatiyami. – 271 s.
20. YUdanov, A. YU. Konkurenciya: teoriya i praktika: ucheb. posobie / A. YU. YUdanov. – M. : Grom-Press, 2002. – 365 s.
21. YAsheva, G. A. Metodologiya formirovaniya i ocenki sistemy upravleniya konkurentosposobnost'yu / G. A. YAsheva // Marketing. Reklama i sbyt. – 2003. – № 8. – S. 21–30.

Материал поступил 23.06.2025, одобрен 15.07.2025, принят к публикации 15.07.2025

УДК 332.1

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СТРУКТУР УПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВОМ

Н. В. Носко

Старший преподаватель кафедры менеджмента, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,
e-mail: хана1998@mail.ru

Реферат

На сегодняшний день важным для развития конкурентоспособной экономики Республики Беларусь является вопрос, связанный с модернизацией системы экономических отношений и эффективным управлением на всех территориальных уровнях на основе использования интеграции субъектов хозяйствования, который нашел свое отражение в государственной политике республики и в ряде принятых программных документах на средне- и долгосрочную перспективу. В этой связи актуальным является проблема эффективного управления строительством, связанная с формированием и развитием региональных интегрированных структур.

В статье представлена разработанная концептуальная модель формирования региональных интегрированных структур управления строительством, базирующаяся на следующих принципах организации производственных систем в строительстве: концентрации, специализации, неразрывности, пропорциональности, непрерывности, ритмичности, кооперирования, комбинирования.

В концептуальной модели выделено три ключевые фазы формирования региональных интегрированных структур: фаза операционной деятельности организации, фаза оценки потребности в реструктуризации, фаза реструктуризации. Фаза операционной деятельности организации включает анализ органической взаимосвязи трех подсистем: технологии строительного производства, управления строительством, организационной структуры. Фаза оценки потребности в реструктуризации основана на оценке соответствия организационных форм и структур управления требованиям строительного производства. Сформулированы основные критерии оценки соответствия организационных форм и структур управления производственными процессами требованиям строительного производства. Фаза реструктуризации состоит из ряда этапов, детализирующих процесс формирования региональных интегрированных структур.

Предложенная концептуальная модель в отличие от существующей практики позволяет создать теоретико-методическую основу для новых инструментов формирования региональных интегрированных структур, что способствует повышению эффективности управления строительством.

Ключевые слова: концептуальная модель, региональные интегрированные структуры, управление строительством, строительные организации, реструктуризация, организационные формы и структуры управления.

CONCEPTUAL MODEL OF FORMING REGIONAL INTEGRATED STRUCTURES FOR CONSTRUCTION MANAGEMENT

N. V. Nosko

Abstract

As of today, an important issue for the development of a competitive economy in the Republic of Belarus is the question related to the modernization of the system of economic relations and effective management at all territorial levels based on the integration of business entities, which has been reflected in the state policy of the republic and in a number of adopted program documents for the medium-term and long-term perspective. In this regard, the problem of effective management of construction, related to the formation and development of regional integrated structures, is relevant.

The article presents a developed conceptual model for the formation of regional integrated construction management structures, based on the following principles of organizing production systems in construction: concentration, specialization, continuity, proportionality, continuity, rhythm, cooperation, combination.

The conceptual model highlights three key phases in the formation of regional integrated structures: the phase of operational activity of the organization, the phase of assessing the need for restructuring, and the restructuring phase. The phase of operational activity of the organization includes an analysis of the organic relationship among three subsystems: construction production technology, construction management, and organizational structure. The phase of assessing the need for restructuring is based on evaluating the compliance of organizational forms and management structures with the requirements of construction production. The main criteria for assessing the compliance of organizational forms and management structures with the requirements of construction production have been formulated. The restructuring phase consists of a series of stages detailing the process of forming regional integrated structures.

The proposed conceptual model, unlike the existing practice, allows for the creation of a theoretical and methodological basis for new tools for forming regional integrated structures, which contributes to the increased efficiency of construction management.

Keywords: conceptual model, regional integrated structures, construction management, construction organizations, restructuring, organizational forms and management structures.

Введение

Одним из приоритетных направлений стратегического развития строительной сферы деятельности в Республике Беларусь является совершенствование системы управления строительным комплексом, предусматривающее оптимизацию структуры организаций строительного комплекса и на региональном уровне [1]. В современных условиях динамичного рынка проблемы роста гибкости и адаптивности к внутренней и внешней среде строительных организаций становятся все более актуальными, так как выживают, в первую очередь, организации, осуществляющие постоянное развитие потенциала во всех сферах своей деятельности. Это приводит к необходимости изменения подходов к организационно-правовым формам управления строительными организациями, интеграции и взаимодействию субъектов хозяйствования.

Формирование региональных интегрированных структур управления строительством на основе концептуальной модели

Методологической основой организационных преобразований, связанных с совершенствованием регионального управления строительством, а именно, с созданием концептуальной модели формирования региональных интегрированных структур управления строительством является системный подход.

Данная концептуальная модель основывается на следующих принципах организации производственных систем в строительстве: концентрации, специализации, неразрывности, пропорциональности, непрерывности, ритмичности, кооперирования, комбинирования.

Концептуальная модель исследования базируется на органическом сочетании результатов информационно-логического (методы экспертного анализа) и экономико-математического обоснования

(организационное моделирование – модель массового обслуживания), что позволяет проследить основные причинно-следственные зависимости процесса структуризации подсистем и элементов си-

стемы [2], дает возможность наиболее полно учитывать конкретные особенности рассматриваемых систем и повышает научную обоснованность рекомендаций (рисунок 1).

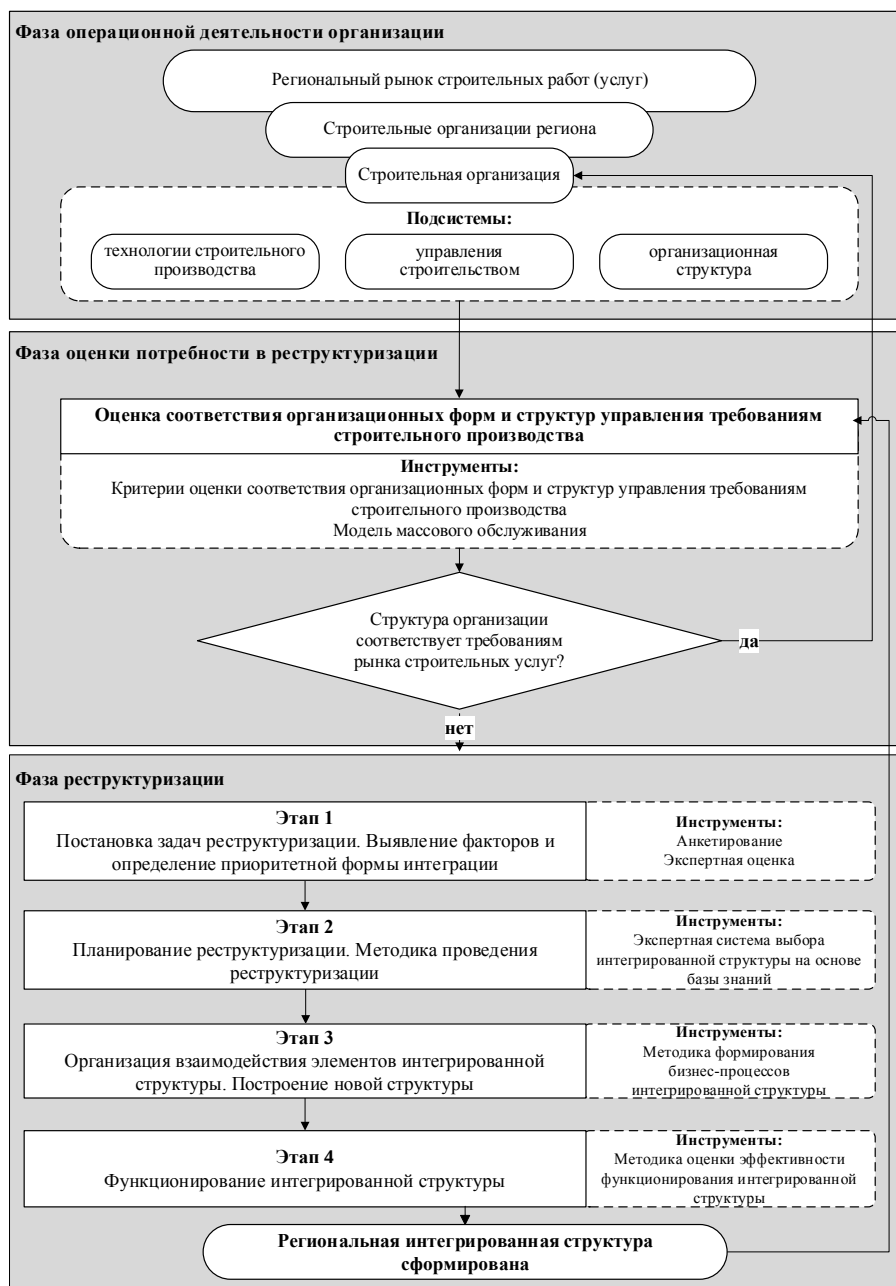


Рисунок 1 – Концептуальная модель формирования региональных интегрированных структур

Примечание – Источник: собственная разработка автора

В концептуальной модели предлагается выделить в качестве ключевого субъекта – строительные организации региона, функционирование которых зависит от потребностей регионального рынка строительных работ (услуг).

Предложенная концептуальная модель включает анализ организационной взаимосвязи трех подсистем: технологии строительного производства, управления строительством, организационной структуры и определяет комплексный подход к формированию интегрированных структур с учетом отраслевых и региональных особенностей.

Определяющее воздействие подсистемы технологии строительного производства проявляется через последовательность и объемы строительных процессов. На основании этого устанавливаются рациональный способ ведения работ (подрядный, хозяйственный или «под ключ») и состав участников строительного цикла. В подсистеме исследуются: характеристика проектных решений, продолжительность строительства

объекта, виды и объемы строительно-монтажных работ, обеспеченность трудовыми и материально-техническими ресурсами.

При проектировании каждого конкретного объекта необходимо учитывать ряд факторов, основные из которых: схема несущих конструкций (с продольными несущими стенами, с поперечными несущими перегородками, каркасно-панельная и т. д.); материал конструкции здания (кирпичный, сборный, из монолитного бетона и др.); этажность; протяженность и конфигурацию в плане; объем работ; заданные сроки строительства; сезонные условия производства работ; сложившийся уровень технологии и организации работ; степень специализации.

Данные факторы являются основными организационно-технологическими параметрами объектов и, в то же время, важными характеристиками для формирования организационной структуры строительных организаций, осуществляющих возведение объектов [3, с. 73].

Воздействие подсистемы управления строительством на структуризацию организаций выражается прежде всего в поиске рациональных форм организации строительного производства, установлении внутренних и внешних производственно-хозяйственных связей, улучшении методов управления, что, в свою очередь, требует создания и развития соответствующих организационных форм управления. При этом существенную роль играет организационно-правовой статус организации, виды и масштабы осуществляемой деятельности, степень подчинения структурных подразделений и др.

Вместе с тем, благодаря широкому распространению западной теории управления проектами, в зарубежной и российской практике получило развитие проектно-ориентированное управление. Внедрение в практику положений теории управления проектами позволяет повысить эффективность использования всех ресурсов организации. Управление проектом охватывает весь инвестиционный процесс и соединяет усилия отдельных его участников (организационных структур). В Своде знаний по управлению проектами PMBOK (Project Management Body of Knowledge), публикуемый Институтом управления проектами США (Project Management Institute, сокращенно PMI) под управлением проектом понимается «применение знаний, навыков, инструментов и техник при выполнении проектной деятельности для достижения требований проекта и запланированных результатов» [4, с. 4].

В строительстве в первую очередь стали использовать положения теории управления инвестиционно-строительными проектами и внедрять новые методики и инструменты управления проектами. Особенности управления инвестиционно-строительными проектами описывает в своих работах В. А. Заренков, рассматривая управление проектом как «управление комплексом мер, дел и действий, направленное на достижение целей проекта» [5, с. 12]. Таким образом, в строительной сфере управление проектами обуславливает высокую динамичность состава участников и повышение гибкости структур управления, которые должны соответствовать характеру конкретной стройки, объемам работ и срокам строительства и является одним из значимых факторов эффективности.

В целом, в подсистеме управления строительством на уровне организации анализируются: процессы линейного управления (управление основным и вспомогательным строительным производством, подготовкой производства, обеспечением производства); процессы функционального управления (планирование, организация, мотивация, регулирование, учет, контроль); процессы обслуживания управления (обслуживание управленческого персонала, средств управленческого труда, защита прав и законных интересов), процессы формализованной обработки данных (обработка и хранение данных, передача данных и связь).

Целевое назначение подсистемы организационной структуры управления заключается в обеспечении устойчивого развития и целостности социально-экономической системы организации «посредством формирования, сохранения и совершенствования способов взаимосвязи и взаимодействия системы с внешней средой и внутреннего взаимодействия элементов системы» [6, с. 60].

К тому же, подсистема организационной структуры влияет на результативность работы организации. Организация строительного производства определяется в основном его организационной структурой. Кроме того, организационная структура организации является одним из ключевых факторов эффективного управления проектом. Особенности строительного производства требуют гибкости и динамичности организационных структур, ориентации их на потребности заказчиков.

Существует взаимосвязь между технологией и проектированием организационной структуры. В целом при выборе организационной структуры наиболее значимыми, считают О. С. Виханский и А. И. Наумов [7], являются следующие факторы: размер и степень разнообразия деятельности, присущие организации; географическое размещение организации; технология; отношение руководителей и сотрудников к организации; динамизм внешней среды; стратегия, реализуемая организацией.

На сегодняшний день мероприятия по перестройке системы управления строительством Республики Беларусь недостаточно подкреплены научными разработками, учитывающими особенности современных экономических условий. Такое положение можно объяснить изолированностью существующих методов обоснования структур управления от особенностей технологии строительного производства, динамики хозяйственного механизма и общей концеп-

ции развития системы управления. При реорганизации строительных организаций слабо учитывался такой фактор, как технология. В этой связи формирование организационных структур в строительстве осуществляется на основе хозяйственного опыта, в большинстве случаев без комплексного учета конкретных организационно-технологических условий функционирования [8, с. 185; 9, с. 176].

Одними из первых исследовали взаимосвязи между технологией и организационной структурой Э. Чепл и Л. Сэйлс. Они считают, «что тип технологии (определенной как последовательность потока работ) должен быть основным критерием при проектировании организационной структуры и что такое проектирование должно осуществляться скорее снизу вверх, чем сверху вниз. Под технологией здесь понимается последовательность выполняемых работниками трудовых операций или кто и что делает, за кем, когда, где и как часто» [10, с. 101].

В промышленности в результате многочисленных исследований (Дж. Вудворд, Ч. Перроу, Д. Томпсона, Р. Скотта) было установлено влияние типа производства на организационную структуру управления на основе взаимосвязи производственных технологий и организационных структур [10–13].

В результате, одна из гипотез о связи между технологией и организационной структурой является «гипотеза о зависимости организационной структуры от «технической сложности» производственного процесса. Согласно этой гипотезе, для каждого типа технологии существует свой наиболее подходящий тип организационной структуры» [13, с. 91].

Разновидностью этой гипотезы является «гипотеза о зависимости организационной структуры от степени «гибкости» технологии», а не от «технической сложности» производственного процесса. Данная характеристика учитывает, как внешнюю форму технологии, так и ее изменчивость. Эта гипотеза сформулирована в [14], где приводятся результаты обследования 43 американских промышленных фирм для ее проверки.

Согласно этой гипотезе, А. И. Рубахов констатирует: «если рассмотреть задачу достижения высокой технологичности строительных решений, то организационная увязка возможна только при интеграции в одной структуре всех звеньев, где она обеспечивается, начиная от проектирования и заканчивая технологическими операциями на стройплощадке. В связи с этим и возникает задача создания такой организационной структуры, в которой можно было бы обеспечить достижение одной из научно-производственных целей – повышение технологичности строительных решений» [15, с. 377].

Это свидетельствует о том, что данные гипотезы на основе изучения в качестве аналога структурных систем, действующих в промышленности, могут быть применимы и в строительной сфере.

Таким образом, стратегия организации не может быть успешной без соответствующей структуры, а она в свою очередь связана с технологией, оказывающей определяющее воздействие на формирование исходных вариантов региональных интегрированных структур.

Процедура проведения любого процесса должна указать последовательность этапов (шагов), которые необходимо выполнить, чтобы его реализовать.

Реструктуризация как любое мероприятие должна быть запланирована, организована, выполнена и проконтролирована. Поскольку это особый вид действий, вызванный необходимостью или желанием изменения условий развития организации, он должен представлять собой процесс решения проблем. Поэтому процедура проведения процесса реструктуризации должна включать в себя сбор информации о ситуации объекта, разработку на этой основе допустимых возможностей решений проблемы, выбор наиболее подходящего с точки зрения принятых критериев, его обоснование и внедрение.

Однако прежде чем приступить к реструктуризации организаций, следует установить ее необходимость. Следовательно, предварительным этапом подготовки и реализации процесса реструктуризации организаций является оценка соответствия организационных форм и структур управления требованиям строительного производства (рисунок 1) и определение причин существующей ситуации.

На основе экономических законов сформулируем основные критерии оценки соответствия организационных форм и структур управления производственными процессами требованиям строительного производства [16–18]:

– возможность обеспечения наивысших технико-экономических результатов при наименьших затратах материальных, финансовых, трудовых и топливно-энергетических ресурсов,

при этом прибыль играет важнейшую роль как критерий оптимальности принимаемых решений, направленных на повышение эффективности деятельности строительного производства;

- возможность создания условий для быстрого внедрения техники, технологии, рациональных методов организации и производства работ;

- возможность быстрого реагирования на изменения внутренней и внешней среды с наименьшими затратами, то есть обладание свойством гибкости;

- возможность установления наиболее согласованных рациональных производственных связей с другими участниками строительства;

- возможность обеспечения роста производительности труда за счет более полного использования имеющихся трудовых, материальных и технических ресурсов;

- возможность роста темпов технического развития производства за счет инновационного развития новых технологий управления в строительстве: в первую очередь активное использование современных методов управления проектами, систем ERP;

- возможность создания наилучших условий труда персонала, ведущих к снижению усталости работников, выполнению заданий в кратчайший срок при наименьших затратах, выпуску строительной продукции высшего качества;

- возможность повышения оперативности в маневрировании производственными ресурсами;

- возможность интеграции и совершенствования организационной структуры управления;

- возможность восприимчивости к внедрению новых информационных технологий: быстрый обмен достоверной информацией между различными производственными процессами для увязки ритмичного хода выполнения работ и согласования их последовательности, что требует четкой координации деятельности взаимосвязанных производственных процессов в строительных организациях.

Представленные критерии характеризуют возможность организационной формы и структуры управления повысить эффективность строительного производства за счет сокращения сроков строительства объектов, ритмичности строительного производства, роста производительности труда, снижения незавершенного производства, увеличения объемов внедрения новой техники, снижения издержек производства.

Для проведения оценки соответствия организационной структуры организации требованиям регионального рынка строительных работ (услуг) за основу взята организационная модель массового обслуживания. Применение модели массового обслуживания в данном исследовании позволяет выяснить, удовлетворяет ли строительная организация поступающий спрос на работы (услуги). На основе использования данной модели можно определить, достаточно ли бригад для выполнения поступающего количества заказов или же напротив бригады простаивают. Использование модели массового обслуживания в условиях ограниченности ресурсов позволяет найти оптимальное решение и разработать методологические принципы моделирования и проектирования схем организационной структуры производственной системы под заданный объем работ с учетом организационно-технологических факторов [19].

Оценка соответствия организационных форм и структур управления требованиям строительного производства является важным предварительным этапом, так как является основой всего процесса реструктуризации и обуславливает правильность действий. Важна она также с той точки зрения, что ее результаты покажут: организационная структура строительной организации соответствует требованиям регионального рынка строительных работ (услуг) или же нужна реструктуризация.

Если структура организации не соответствует требованиям регионального рынка строительных работ (услуг), то требуется формирование новой региональной интегрированной структуры и принимается решение о необходимости проведения реструктуризации. Проведение данного процесса включает в себя ряд основных этапов (рисунок 1).

На первом этапе реструктуризации – процесса формирования новой региональной интегрированной структуры, после проведения оценки соответствия организационной структуры организации требованиям регионального рынка строительных работ (услуг) необходимо уточнить стратегические цели деятельности организации, сформулировать задачи реструктуризации, выявить и оценить факторы, влияющие на выбор интегрированной структуры и определить

приоритетную форму интеграции в строительстве. Оценка факторов, влияющих на выбор интегрированной структуры и выбор приоритетной формы интеграции участников инвестиционно-строительного процесса, производится с помощью метода экспертных оценок.

На втором этапе с учетом выявленных факторов, влияющих на выбор интегрированной структуры, производится планирование реструктуризации и разрабатывается методика ее проведения, представляющая собой обеспечение поиска оптимальных решений при выборе эффективных региональных интегрированных структур управления строительством с применением экспертных систем на основе баз знаний. Разработка экспертных систем является одним из приоритетных направлений в исследованиях по искусственному интеллекту. В результате происходит научно-обоснованный выбор интегрированной структуры с учетом конкретных ситуаций и условий деятельности организаций.

На третьем этапе осуществляется организация взаимодействия элементов интегрированной структуры, производится построение новой структуры. Для этого разрабатывается методика формирования бизнес-процессов интегрированной структуры с учетом взаимодействия участников инвестиционно-строительного процесса.

Четвертый этап определяет функционирование интегрированной структуры и предусматривает разработку методики оценки эффективности ее деятельности. Оценка производится на основе экономико-математической модели влияния факторов производства на критерийные показатели эффективности работы интегрированной структуры [20].

Заключение

Таким образом, концептуальная модель позволяет сформировать основу для дальнейшей разработки методического комплекса по формированию региональных интегрированных структур управления строительством и во многом решить задачу эффективного управления строительством и консолидирует следующие направления: совершенствование подходов к оценке соответствия организационной структуры организации требованиям регионального рынка строительных работ (услуг); применение в управлении автоматизированных информационных систем (АИС) связанных с широким использованием достижений искусственного интеллекта.

Список цитированных источников

1. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года : протокол заседания Президиума Совета Министров Республики Беларусь от 02.05.2017 № 10. – URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf> (дата обращения: 18.01.2024).
2. Носко, Н. В. Обоснование формирования интегрированных структур управления строительством в регионе / Н. В. Носко // Инженерный бизнес : сборник материалов II Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 19-й Международной научно-технической конференции БНТУ «Наука – образованию, производству и экономике» Минск, 01–03 декабря 2021 г. / редкол.: О. С. Голубова [и др.]; сост.: Н. А. Пашкевич. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 214–219.
3. Носко, Н. В. Влияние объемно-планировочных, конструктивных и технологических решений основных типов объектов на организацию управления строительством / Н. В. Носко // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Экономика. – 2020. – № 3. – С. 71–75. – DOI: 10.36773/1818-1212-2020-121-3-71-75.
4. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство РМВОК®). – Седьмое издание и стандарт по управлению проектами. – Project Management Institute, 2021. – 14 Campus Boulevard Newtown Square, Pennsylvania, USA.
5. Заренков, В. А. Управление проектами / В. А. Заренков. – 2-е изд. – М. : Изд-во АСВ ; СПб. : СПбГАСУ, 2006. – 312 с.
6. Менеджмент в сервисе : (Бакалавриат) / М. В. Виноградова, О. В. Каурова, А. Н. Малолетко [и др.]; под ред. д-ра экон. наук, проф. Н. А. Платоновой. – М. : КНОРУС, 2017. – 248 с.
7. Виханский, О. С. Менеджмент / О. С. Виханский, А. И. Наумов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Магистр, НИЦ ИНФРА-М, 2019. – 656 с.

8. Носко, Н. В. Технология как наиболее значимый фактор при моделировании организационных форм и структур управления строительством / Н. В. Носко // Молодежь и научно-технический прогресс : Сборник докладов XIV международной научно-практической конференции : в 2 т. / сост.: Е. Н. Иванцова, В. М. Уваров [и др.]. – Губкин ; Старый Оскол : ООО «Ассистент плюс», 2021. – Т. 2. – С. 184–187.
9. Носко, Н. В. Влияние технологий на выбор организационных форм и структур управления строительством / Н. В. Носко, Т. В. Дашкевич // Экономика и управление: социальный, экономический и инженерный аспекты : сборник научных статей IV Международной научно-практической конференции, Брест, 25–26 ноября 2021 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет, Кафедра менеджмента ; редкол.: И. М. Гарчук [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2021. – С. 175–179.
10. О'Шонесси, Дж. Принципы организации управления фирмой / Дж. О'Шонесси ; пер. Л. А. Базилевич, Г. Г. Сузаев, А. М. Филиппов. – М. : Прогресс, 1979. – 420 с.
11. Дафт, Р. Менеджмент / Р. Дафт ; пер. с англ. С. Жильцов ; под ред. Е. Н. Строганова. – 6-е изд. – СПб. : Питер, 2006. – 864 с.
12. Woodward, Joan. Industrial Organizations : Theory and Practice / Joan Woodward. – London : Oxford University Press, 1965. – 281 p.
13. Чернявский, А. Л. Количественные методы исследования организационных систем (обзор) / А. Л. Чернявский // II. Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 3. – С. 88–108.
14. Harvey, E. Technology and the structure of organizations / E. Harvey // Amer. Sociological Rev., v. 33. – 1968. – No. 2. – P. 247–259.
15. Рубахов, А. И. Управление переменами на строительном предприятии / А. И. Рубахов. – Минск : Амалфея, 2011. – 408 с.
16. Носко, Н. В. Оценка соответствия организационных форм и структур управления требованиям развития строительной отрасли в странах Восточной Европы / Н. В. Носко // Перспективы развития инвестиционно-строительного комплекса в странах Восточной Европы : сборник научных трудов / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет ; под общ. ред. А. Г. Проровского. – Брест : БрГТУ, 2016. – С. 148–152.
17. Гришина, Ю. В. Критерии соответствия организационных структур оперативного управления производственными процессами на промышленном предприятии / Ю. В. Гришина // Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami – 2011 : materiały VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, 07–15 listopada 2011 roku. – Przemysł : Nauka i studia, 2011. – Volume 11: Ekonomiczne nauki. – S. 38–43.
18. Чередниченко, Н. А. Качество управления и организационная технология / Н. А. Чередниченко, В. А. Ткаченко ; под ред. Н. А. Чередниченко. – Днепропетровск : ДГУ, 1991. – 198 с.
19. Носко, Н. В. Моделирование влияния факторов производства на эффективность работы региональной интегрированной структуры управления инвестиционно-строительным процессом / Н. В. Носко // Новая экономика. – 2021. – Спецвыпуск № 3 (2021). – С. 108–115.
20. Носко, Н. В. Оценка эффективности формирования строительного холдинга в современных условиях / Н. В. Носко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D. Экономические и юридические науки. – 2014. – № 6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-formirovaniya-stroitel'nogo-holdinga-v-sovremennyh-usloviyah> (дата обращения: 21.06.2025).
21. Nacionaľnaya strategiya ustojchivogo social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na period do 2030 goda : protokol zasedaniya Prezidiuma Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 02.05.2017 № 10. – URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf> (data obrashcheniya: 18.01.2024).
22. Nоско, N. V. Obosnovanie formirovaniya integirovannykh struktur upravleniya stroitel'stvom v regione / N. V. Nоско // Inzhenernyj biznes : sbornik materialov II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkah 19-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii BNTU «Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu i ekonomike» Minsk, 01–03 dekabrya 2021 g. / redkol.: O. S. Golubova [i dr.] ; sost. N. A. Pashkevich. – Minsk : BNTU, 2022. – S. 214–219.
23. Nоско, N. V. Vliyanie ob'emno-planirovochnykh, konstruktivnykh i tekhnologicheskikh reshenij osnovnykh tipov ob'ektov na organizatsiyu upravleniya stroitel'stvom / N. V. Nоско // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika. – 2020. – № 3. – S. 71–75. – DOI: 10.36773/1818-1212-2020-121-3-71-75.
24. Rukovodstvo k Svodu znanij po upravleniyu proektami (Rukovodstvo PMBOK®). – Sed'moe izdanie i standart po upravleniyu proektami. – Project Management Institute, 2021. – 14 Campus Boulevard Newtown Square, Pennsylvania, USA.
25. Zarenkov, V. A. Upravlenie proektami / V. A. Zarenkov. – 2-e izd. – M. : IZD-VO ASV ; SPb. : SPbGASU, 2006. – 312 s.
26. Menedzhment v servise : (Bakalavriat) / M. V. Vinogradova, O. V. Kaurova, A. N. Maloletko [i dr.] ; pod red. d-ra ekon. nauk, prof. N. A. Platonovoj. – M. : KNORUS, 2017. – 248 s.
27. Vihanskij, O. S. Menedzhment / O. S. Vihanskij, A. I. Naumov. – 6-e izd., pererab. i dop. – M. : Magistr, NIC INFRA-M, 2019. – 656 s.
28. Nоско, N. V. Tekhnologiya kak naibolee znachimyj faktor pri modelirovanii organizacionnykh form i struktur upravleniya stroitel'stvom / N. V. Nоско // Molodezh' i nauchno-tekhnicheskij progress : Sbornik dokladov XIV mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii : v 2 t. / sost.: E. N. Ivancova, V. M. Uvarov [i dr.]. – Gubkin ; Staryj Oskol : OOO «Assistent plyus», 2021. – T. 2. – S. 184–187.
29. Nоско, N. V. Vliyanie tekhnologii na vybor organizacionnykh form i struktur upravleniya stroitel'stvom / N. V. Nоско, T. V. Dashkevich // Ekonomika i upravlenie: social'nyj, ekonomicheskij i inzhenernyj aspekty : sbornik nauchnykh statej IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Brest, 25–26 noyabrya 2021 g. / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, Kafedra menedzhmenta ; redkol.: I. M. Garchuk [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2021. – S. 175–179.
30. O'Shonessi, Dzh. Principy organizatsii upravleniya firmoj / Dzh. O'Shonessi ; per. L. A. Bazilevich, G. G. Suzaev, A. M. Filippov. – M. : Progress, 1979. – 420 s.
31. Daft, R. Menedzhment / R. Daft ; per. s angl. S. ZHil'cov ; pod red. E. N. Stroganova. – 6-e izd. – SPb. : Piter, 2006. – 864 s.
32. Woodward, Joan. Industrial Organizations : Theory and Practice / Joan Woodward. – London : Oxford University Press, 1965. – 281 p.
33. CHernyavskij, A. L. Kolichestvennye metody issledovaniya organizacionnykh sistem (obzor) / A. L. CHernyavskij // II. Avtomatika i telemekhanika. – 1978. – № 3. – S. 88–108.
34. Harvey, E. Technology and the structure of organizations / E. Harvey // Amer. Sociological Rev., v. 33. – 1968. – No. 2. – P. 247–259.
35. Rubahov, A. I. Upravlenie peremenami na stroitel'nom predpriyatii / A. I. Rubahov. – Minsk : Amalfeya, 2011. – 408 s.
36. Nоско, N. V. Ocenka sootvetstviya organizacionnykh form i struktur upravleniya trebovaniyam razvitiya stroitel'noj otrasli v stranah Vostochnoj Evropy / N. V. Nоско // Perspektivy razvitiya investicionno-stroitel'nogo kompleksa v stranah Vostochnoj Evropy : sbornik nauchnykh trudov / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet ; pod obshch. red. A. G. Prorovskogo. – Brest : BrGTU, 2016. – S. 148–152.
37. Grishina, YU. V. Kriterii sootvetstviya organizacionnykh struktur operativnogo upravleniya proizvodstvennymi processami na promyshlennom predpriyatii / YU. V. Grishina // Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami – 2011 : materiały VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, 07–15 listopada 2011 roku. – Przemysł : Nauka i studia, 2011. – Volume 11: Ekonomiczne nauki. – S. 38–43.
38. CHerednichenko, N. A. Kachestvo upravleniya i organizacionnaya tekhnologiya / N. A. CHerednichenko, V. A. Tkachenko ; pod red. N. A. CHerednichenko. – Dnepropetrovsk : DGU, 1991. – 198 s.
39. Nоско, N. V. Modelirovanie vliyaniya faktorov proizvodstva na effektivnost' raboty regional'noj integirovannoy struktury upravleniya investicionno-stroitel'nyim processom / N. V. Nоско // Novaya ekonomika. – 2021. – Specvypusk № 3 (2021). – S. 108–115.
40. Nоско, N. V. Ocenka effektivnosti formirovaniya stroitel'nogo holdinga v sovremennyh usloviyah / N. V. Nоско // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya D. Ekonomicheskie i yuridicheskie nauki. – 2014. – № 6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-formirovaniya-stroitel'nogo-holdinga-v-sovremennyh-usloviyah> (data obrashcheniya: 21.06.2025).

References

1. Nacionaľnaya strategiya ustojchivogo social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na period do 2030 goda : protokol zasedaniya Prezidiuma Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 02.05.2017 № 10. – URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf> (data obrashcheniya: 18.01.2024).
2. Nоско, N. V. Obosnovanie formirovaniya integirovannykh struktur upravleniya stroitel'stvom v regione / N. V. Nоско // Inzhenernyj biznes : sbornik materialov II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkah 19-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii BNTU «Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu i ekonomike» Minsk, 01–03 dekabrya 2021 g. / redkol.: O. S. Golubova [i dr.] ; sost. N. A. Pashkevich. – Minsk : BNTU, 2022. – S. 214–219.

Материал поступил 22.06.2025, одобрен 25.06.2025, принят к публикации 25.06.2025

УДК 332.146.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СВОБОДНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗОН ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ОПЫТА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

В. А. Прудникова

Аспирант Академии управления при Президенте Республики Беларусь, Минск, Беларусь, e-mail: velkovaleva@gmail.com

Реферат

В настоящее время свободные экономические зоны занимают видную и весьма значимую роль в пространстве мировой экономики. Как показывает мировой опыт, такие экономические образования, независимо от их названия, обладают значительным потенциалом для успешного решения многих социальных и экономических проблем, которые стоят перед каждым государством. На современном этапе экономического развития Республики Беларусь важность дальнейшего эффективного функционирования свободных экономических зон неоспорима. Более того наши свободные экономические зоны не должны потерять конкурентоспособность на площадке Евразийского экономического союза. В этой связи важно своевременно изучать опыт партнеров по Евразийскому экономическому союзу в развитии аналогичных экономических образований в целях внедрения лучших практик в деятельности свободных экономических зон Республики Беларусь.

В статье проведен анализ основных показателей деятельности резидентов свободных экономических зон Республики Беларусь, в том числе с точки зрения их вклада в экономическое развитие регионов их базирования. С использованием инструментария SWOT-анализа выявлены сильные и слабые стороны, а также возможности и угрозы дальнейшего развития белорусских свободных экономических зон. Наряду с этим в статье представлен анализ эффективности функционирования специальных экономических зон Республики Казахстан, а также принимаемые властями поэтапно меры по повышению эффективности их деятельности. По итогам изучения опыта внедрения в Республике Казахстан института специальных экономических зон автором предложены направления совершенствования организационно-экономического механизма функционирования отечественных свободных экономических зон.

Ключевые слова: свободные экономические зоны, специальные экономические зоны, резидент свободной экономической зоны, администрация свободной экономической зоны, SWOT-анализ, инвестиции, показатели деятельности, методика оценки, стратегия развития, целевые индикаторы развития.

THE IMPROVEMENT OF THE ORGANIZATIONAL AND ECONOMIC MECHANISM OF FUNCTIONING OF DOMESTIC FREE ECONOMIC ZONES THROUGH THE PRISM OF THE EXPERIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

V. A. Prudnikova

Abstract

Currently, free economic zones occupy a prominent and very significant role in the world economy. As world experience shows, such economic entities, regardless of their name, have significant potential for successfully solving many social and economic problems facing each state. At the present stage of economic development of the Republic of Belarus the importance of the further effective functioning of free economic zones is undeniable. Moreover, our free economic zones should not lose competitiveness at the site of the Eurasian Economic Union. In this regard, it is important to timely study the experience of partners in the Eurasian Economic Union in the development of similar economic entities in order to introduce best practices in the activities of free economic zones of the Republic of Belarus.

The article analyzed the main indicators of the activities of residents of the free economic zones of the Republic of Belarus, including in terms of their contribution to the economic development of their basing regions. Using the SWOT analysis, strengths and weaknesses were identified, as well as opportunities and threats to the further development of Belarusian free economic zones. Along with this, the article presents an analysis of the effectiveness of the functioning of special economic zones of the Republic of Kazakhstan, as well as the measures taken by the authorities in stages to increase the efficiency of their activities. Based on the results of studying the experience of introducing the institute of special economic zones in the Republic of Kazakhstan, the author proposed directions for improving the organizational and economic mechanism of functioning of domestic free economic zones.

Keywords: free economic zones, special economic zones, resident of a free economic zone, administration of a free economic zone, SWOT-analysis, investments, performance indicators, evaluation methods, development strategy, target development indicators.

Введение

Институт свободных экономических зон развивается во всех государствах – членах Евразийского экономического союза (далее – ЕАЭС). В настоящее время в рамках ЕАЭС насчитывается более 90 таких экономических образований.

Все они имеют собственную историю развития, специфику функционирования (отличаются характером реализации проектов, объемом преференций и другими факторами их функционирования). Более того, в каждом государстве такие экономические образования называются по-разному: в Республике Беларусь и Российской Федерации используются термины «свободные экономические зоны и особые экономические зоны», в Республике Казахстан – «специальные экономические зоны», в Республике Армения и Кыргызской Республике – «свободные экономические зоны». Вместе с тем, независимо от названия, создание всех их преследует схожие цели, а именно, активация внешнеэкономических связей, развитие высо-

котехнологичного и конкурентоспособного производства, поддержка отраслей экономики, привлечение дополнительных инвестиций, ускоренное развитие регионов и решение широкого спектра социальных проблем [1, с. 62].

В условиях реализации в Республике Беларусь государственной политики по привлечению иностранных инвестиций, диверсификации экспорта и стимулирования импортозамещения совершенствование механизма функционирования свободных экономических зон является актуальной тематикой исследования.

Вопросам повышения эффективности деятельности свободных экономических зон, а также их конкурентоспособности уделяется особое внимание Главой государства. При обсуждении вопросов функционирования и развития отечественных свободных экономических зон Главой государства отмечено, что в жесткой борьбе за инвестора наши свободные экономические зоны не должны потерять конкурентоспособность на площадке ЕАЭС.

В этой связи важно своевременно изучать опыт государств – членов ЕАЭС в развитии механизма свободных (особых, специальных) экономических зон (далее – СЭЗ и ОЭЗ) в целях внедрения лучших практик в деятельность СЭЗ Республики Беларусь.

Анализ деятельности белорусских СЭЗ

В нашей стране функционирует шесть СЭЗ («Минск», «Брест», «Гомель-Ратон», «Витебск», «Могилев» и «Гродноинвест») и две ОЭЗ, а именно Китайско-Белорусский индустриальный парк «Великий камень» и «Бремино-Орша» (созданы в 2011 и 2019 гг. соответственно), осуществляющие деятельность с учетом положений пункта 1 статьи 455 Таможенного кодекса ЕАЭС и обладающие максимальным широким объемом упрощений.

В данной статье проведен детальный анализ деятельности именно СЭЗ. Китайско-Белорусский индустриальный парк «Великий камень» также уже имеет значимые результаты своей деятельности (зарегистрировано более 150 резидентов, общий объем инвестиций составил 498,1 млн долл. США), однако сроки его функционирования не сопоставимы со сроками функционирования СЭЗ. В то же время официальные статистические данные о деятельности ОЭЗ «Бремино-Орша» в открытых источниках отсутствуют.

Первая в республике СЭЗ «Брест» была создана в 1996 году. В 1998 году были образованы СЭЗ «Минск» и «Гомель-Ратон», в 1999 году к ним добавилась СЭЗ «Витебск», а в 2002 году появились СЭЗ «Могилев» и «Гродно-инвест».

Характеризуя этап становления института СЭЗ в Республике Беларусь, стоит отметить, что СЭЗ «Минск» и «Гомель-Ратон» стартовали несколько динамичнее, чем СЭЗ «Брест». Это обусловлено тем, что площадь под СЭЗ «Брест» была отведена практически в «чистом поле», что потребовало значительных бюджетных вложений, и, как следствие, времени на развитие инфраструктуры. В то же время при создании иных СЭЗ более полно реализовывалась концепция задействования пустующих и неиспользуемых производственных и инфраструктурных мощностей [2, с. 26].

В качестве стратегических целей и задач, поставленных перед действующими СЭЗ, определенное место отводится привлечению отечественных и иностранных инвестиций для развития производств, основанных на новых и высоких технологиях, расширению экспорта и созданию благоприятных условий для экономического роста регионов [3].

На 1 января 2025 г. в качестве резидентов СЭЗ было зарегистрировано 439 предприятий. Действующими являлись 425 предприятий, или 96,8 % от числа зарегистрированных [4].

Представленные на рисунке 1 данные показывают, что в 2024 году по сравнению с 2010 годом число резидентов СЭЗ возросло на треть, в то же время по сравнению с 2011 годом данный показатель снизился практически на 20 %. Резкое увеличение количества резидентов СЭЗ в 2011 году было обусловлено тем, что для предприятий, зарегистрированных в СЭЗ до конца 2011 года, было предусмотрено сохранение до 2017 года возможности вывоза в иные государства-члены ЕАЭС произведенной продукции без уплаты таможенных пошлин и налогов в отношении импортной составляющей таких товаров [5, с. 54]. В то же время на протяжении 2021–2023 гг. наблюдалась тенденция к незначительному сокращению количества резидентов СЭЗ.

Несмотря на негативное влияние пандемии COVID-19 и санкционной политики отдельных стран, в целом наблюдается рост объемов промышленного производства, экспорта и импорта товаров по СЭЗ республики. Вместе с тем в 2022 году практически по всем СЭЗ наблюдалось значительное снижение объема инвестиций в основной капитал (таблица 1).

Кроме того, все СЭЗ стабильно имеют положительное сальдо внешней торговли товарами.

В 2024 году резиденты СЭЗ сформировали 5,3 % валового внутреннего продукта страны.

Следует отметить, что на протяжении 2019–2024 гг. наблюдается рост доли резидентов СЭЗ в общем объеме промышленного производства. В то же время доля резидентов СЭЗ в иных макроэкономических показателях в 2023–2024 гг. снизилась по сравнению с 2022 годом (таблица 2).

Приведенные в таблице 3 данные свидетельствуют, что, имея сравнительно небольшую среднесписочную численность по сравнению с общей численностью населения, занятого в экономике регионов, СЭЗ играют по ряду показателей важную роль в региональном развитии. Наиболее впечатляющим является вклад в основные показатели деятельности региона резидентами СЭЗ «Могилев».

Автором проведен SWOT-анализ сильных (strengths) и слабых (weaknesses) сторон, а также возможностей (opportunities) и угроз (threats) дальнейшего развития белорусских СЭЗ.

Анализируя сильные стороны белорусских СЭЗ, можно выделить [6, с. 76]:

- выгодное географическое расположение как страны в целом, так и СЭЗ в частности;
- современную развитую инженерную, транспортную и логистическую инфраструктуру;
- специальный правовой режим, который включает в себя налоговые и таможенные преференции;
- прямой доступ к рынку стран ЕАЭС;
- высокий научный потенциал и доступ к квалифицированным трудовым ресурсам.

В свою очередь, в качестве слабых сторон отметим высокую долю убыточных предприятий. Указанный показатель, как правило, выше аналогичного показателя в целом по республике и регионам базирования СЭЗ.

Ориентация экспорта продукции в основном на российский рынок и, как следствие, значительная зависимость результативности деятельности предприятий-резидентов от его конъюнктуры также является слабой стороной белорусских СЭЗ.

Если говорить о возможностях белорусских СЭЗ, то к таковым отнесем: повышение инвестиционной привлекательности Республики Беларусь, ускорение научно-технического прогресса и расширение сфер цифровизации экономики, расширение возможностей для сбыта продукции за счет вступления Республики Беларусь в ВТО, повышение позиций республики в международных рейтингах [7, с. 138].

В качестве внешних угроз развития СЭЗ выделим замедление роста мировой экономики, глобальную экономическую нестабильность, усиление международной конкуренции за иностранные инвестиции, санкционную политику отдельных стран, ухудшение внешнеэкономической конъюнктуры, распространенность неэкономических методов конкуренции.

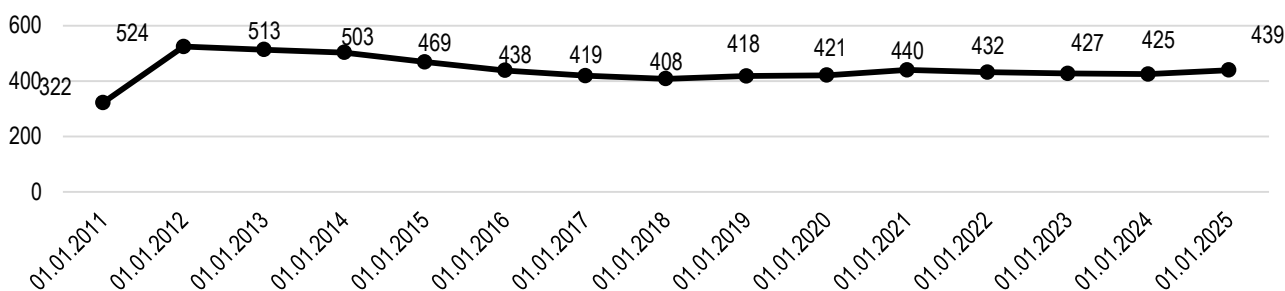


Рисунок 1 – Динамика изменения числа зарегистрированных резидентов белорусских СЭЗ в 2010–2024 гг.

Примечание – Источник: собственная разработка на основании [4]

Таблица 1 – Динамика изменения основных показателей деятельности резидентов белорусских СЭЗ в 2019–2024 гг.

Показатель	Год	СЭЗ					
		Брест	Гомель-Ратон	Минск	Витебск	Могилев	Гродно-инвест
Инвестиции в основной капитал, млн руб.	2024	227,2	298,0	507,1	145,3	314,5	189,9
	2023	141,3	315,5	289,3	217,4	247,8	172,2
	2022	81,8	243,9	212,7	160,9	153,4	331,1
	2021	150,2	331,8	363,8	155,6	200,6	354,4
	2020	186,7	294,7	271,8	168,9	195,8	221,7
	2019	135,3	193,9	207,3	106,1	241,3	393,5
Объем промышленного производства, млн руб.	2024	4 876,2	7 390,1	12 445,8	3 813,2	5 633,6	4 645,0
	2023	4 183,8	6 448,9	10 362,7	3 242,9	5 269,4	4 261,4
	2022	3 867,7	7 069,3	7 117,2	2 633,8	5 145,5	4 696,8
	2021	3 357,7	5 787,6	6 742,9	2 285,9	4 832,2	4 648,1
	2020	2 589,1	4 013,3	4 511,9	1 642,3	3 311,1	3 226,3
	2019	2 148,0	3 518,1	3 899,6	1 389,8	3 563,4	2 850,8
Экспорт товаров, млн долл. США	2024	1 041,3	1 578,3	3 016,3	922,3	1 224,8	1 046,6
	2023	973,4	1 367,7	2 907,5	771,8	1 191,6	1 093,5
	2022	1 059,2	1 678,3	2 246,2	843,4	1 305,3	1 398,1
	2021	958,1	1 614,6	2 031,7	872,7	1 434,7	1 408,6
	2020	770,5	1 168,7	1 467,8	553,8	997,2	964,1
	2019	729,3	1 070,5	1 315,0	575,7	1 081,7	944,4
Импорт товаров, млн долл. США	2024	631,5	879,3	1 713,9	586,2	721,0	551,2
	2023	567,6	823,6	1 291,4	585,5	706,0	614,6
	2022	598,8	930,5	1 273,3	536,7	832,4	856,8
	2021	669,5	795,9	1 610,5	606,2	865,6	687,8
	2020	524,7	551,2	1 174,6	376,3	537,8	526,0
	2019	519,0	526,6	1 123,1	401,9	639,1	556,8
Сальдо внешней торговли товарами, млн долл. США	2024	409,8	699,0	1 302,4	336,1	503,8	495,4
	2023	405,8	544,1	1 616,1	186,0	485,6	478,9
	2022	460,4	747,8	972,9	308,7	472,9	541,3
	2021	288,6	818,7	421,2	266,5	569,1	720,8
	2020	245,8	617,5	293,2	177,5	450,4	438,1
	2019	210,3	543,9	191,9	173,8	442,6	387,6

Примечание – Источник: собственная разработка на основании [4].

Таблица 2 – Доля резидентов СЭЗ в основных макроэкономических показателях Республики Беларусь в 2019–2024 гг.

Показатель	2019 год	2020 год	2021 год	2022 год	2023 год	2024 год
Объем промышленного производства	15,1 %	16,6 %	17,9 %	18,1 %	18 %	19,2 %
Инвестиции в основной капитал	4,5 %	4,7 %	5,2 %	4,2 %	3,7 %	3,8 %
Экспорт товаров	17,6 %	20,4 %	20,9 %	22,7 %	20,8 %	21,9 %
Импорт товаров	9,7 %	11,3 %	12,5 %	13,2 %	10,7 %	11,1 %

Примечание – Источник: собственная разработка на основании [4].

Таблица 3 – Доля резидентов СЭЗ в основных показателях деятельности регионов их базирования по итогам 2023 года

Показатель	СЭЗ					
	Брест	Гомель-Ратон	Минск	Витебск	Могилев	Гродно-инвест
Инвестиции в основной капитал	2,5 %	6,7 %	1,7 %	6,7 %	8,5 %	4,2 %
Объем промышленного производства	19,6 %	17,1 %	14,8 %	13,8 %	33,6 %	21,7 %
Экспорт товаров	27,4 %	37,8 %	15,0 %	11,1 %	50,8 %	39 %
Численность работников	5 %	6,7 %	1,8 %	4,4 %	7,9 %	5,3 %

Примечание – Источник: собственная разработка на основании [4].

Опыт Республики Казахстан в развитии института СЭЗ

В Республике Казахстан первые СЭЗ появились раньше, чем в Республике Беларусь, в начале 90-х годов XX века. При этом примечательно, что на данном этапе для обозначения таких образований законодатель использовал термин «свободные экономические зоны». Данные экономические образования были созданы в целях социально-экономического развития территорий и ускорения перестройки национальной экономики с директивной системы на рыночную. Однако первая попытка применения механизма СЭЗ в стране не увенчалась успехом. Всего было создано

девять СЭЗ, но все они оказались малоэффективными, за исключением Лисаковской СЭЗ, принесшей на 1 тенге инвестиций отдачу в 2,93 тенге [8]. Через некоторое время все СЭЗ были упразднены.

Специалисты выделяют ряд причин неэффективности функционирования указанных СЭЗ, в числе которых недостатки законодательной базы, регулирующей вопросы деятельности СЭЗ, нехватка прозрачности в их деятельности и, следовательно, коррупция, ошибки в пространственном планировании и неудачный выбор месторасположения [9, с. 18–19].

Несмотря на первые неудачи, казалось бы, поставившие под угрозу сам процесс существования и последующего создания СЭЗ, правительство не прекратило процесс создания подобных зон в стране.

Новая попытка в создании СЭЗ (уже «специальных экономических зон») была предпринята в 2000-х годах. Власти страны извлекли урок из ошибок 1990-х годов и сделали соответствующие выводы. Был укреплен законодательный механизм действия СЭЗ, привлечены надежные инвесторы, налажен процесс предоставления льгот, осуществляющим здесь деятельность предпринимателям, что позволило впоследствии добиться положительных результатов. На СЭЗ на данном этапе развития возлагались особые надежды в призме реализации программ индустриализации и решения задач по диверсификации экономики.

На современном этапе в качестве первоочередных целей создания СЭЗ в Республике Казахстан определены ускоренное развитие современных высокопроизводительных, конкурентоспособных производств, формирование качественно нового уровня предоставления услуг, а уже потом привлечение инвестиций, внедрение новых технологий в отрасли экономики и регионы, а также повышение занятости населения [10].

Несмотря на имеющиеся успехи в деятельности отдельных казахстанских СЭЗ, они постоянно подвергаются критике со стороны властей, что является предпосылками для принятия мер по повышению их эффективности.

Рассмотрим подробнее отдельные меры совершенствования организационно-экономического механизма функционирования СЭЗ, принятые властями страны.

Так, в Республике Казахстан была законодательно закреплена обязанность управляющей компании СЭЗ утверждать стратегию развития СЭЗ на трехлетний период, включающую ежегодные целевые индикаторы, а также переутверждать ее каждые три года с учетом динамики развития СЭЗ.

В 2016 году был создан Единый координационный центр по специальным экономическим зонам в Республике Казахстан (далее – Единый координационный центр), задачами которого являются развитие, продвижение и повышение инвестиционной привлекательности СЭЗ. Таким образом, часть полномочий управляющих компаний СЭЗ была передана на более «высокий» уровень (таблица 4).

Таблица 4 – Распределение полномочий между Единым координационным центром и управляющей компанией СЭЗ

Единый координационный центр	Управляющая компания
1) внесение предложений по совершенствованию законодательства о СЭЗ; 2) ведение единого реестра участников СЭЗ и выдача свидетельства о регистрации лица в качестве участника СЭЗ; 3) разработка и внедрение в управляющих компаниях модели управления, внутренних бизнес процессов и корпоративных документов; 4) выработка рекомендаций по разработке стратегий развития СЭЗ; 5) согласование планов развития и планов финансирования СЭЗ; 6) мониторинг достижения управляющей компанией целевых индикаторов; 7) выявление недобросовестных участников СЭЗ; 8) мониторинг состояния объектов инфраструктуры СЭЗ; 9) ведение базы данных объектов инфраструктуры и доступных земель СЭЗ; 10) обучение сотрудников управляющих компаний; 11) анализ рынка и консультация управляющих компаний по разработке маркетинговой стратегии СЭЗ; 12) проведение целевого маркетинга; 13) анализа проектов; 14) продвижения СЭЗ на международном рынке; 15) защита интересов управляющих компаний и участников СЭЗ; 16) привлечение консультантов международного уровня	1) взаимодействие и проведение работы по принципу «одного окна»; 2) заключение, расторжение и мониторинг выполнения условий договоров; 3) разработка бизнес-планов, технико-экономического обоснования, проектно-сметной и иной документации; 4) предоставление земельных участков в аренду, субаренду; 5) привлечение инвестиций и осуществление строительства инфраструктуры; 6) осуществление технического надзора и предоставление инженеринговых услуг; 7) предоставление коммунальных, логистических и сервисных услуг; 8) благоустройство и содержание территории СЭЗ; 9) проведение маркетинговых исследований по созданию новых производств; 10) предоставление консалтинговых и маркетинговых услуг участникам СЭЗ; 11) участие в проектах государственно-частного партнерства; 12) представление отчетности о результатах деятельности СЭЗ

Примечание – Источник: собственная разработка на основании [10].

Единый координационный центр в лице АО «Казахстанский центр индустрии и экспорта «QazIndustry»» на постоянной основе занимается усовершенствованием системы функционирования СЭЗ и протекающих в них бизнес-процессов, защитой интересов управляющих компаний и резидентов СЭЗ, повышением эффективности правового регулирования, устранением формальных барьеров и созданием стимулов для инвестирования в казахстанские СЭЗ.

Кроме того, в Республике Казахстан утверждена методика оценки эффективности деятельности СЭЗ. Такая оценка осуществляется по четырем критериям: эффективность функционирования СЭЗ; эффективность деятельности участников СЭЗ; влияние деятельности СЭЗ на социально-экономическое развитие региона, на территории которого они созданы; эффективность управления управляющей компании СЭЗ. При этом указанная методика по большинству показателей основывается на сопоставлении фактических и прогнозных (плановых) значений.

По каждому критерию выставляются баллы. Итоговое значение каждого критерия определяется как средневзвешенное значение показателей в процентном выражении. Впоследствии деятельность СЭЗ оценивается как эффективная, достаточно эффективная, условно-эффективная с необходимостью совершенствования по отдельным направлениям, с низким уровнем эффективности или неэффективная [11].

На протяжении нескольких лет обсуждается новая методика такой оценки, включающая в себя уже три критерия: освоение терри-

тории СЭЗ, экономические показатели СЭЗ и обеспечение объектами инфраструктуры территории СЭЗ. В рамках ее предлагается оценивать следующие экономические показатели: количество зарегистрированных участников СЭЗ, объем налоговых отчислений, объем экспорта продукции, объем фактически вложенных инвестиций участниками в проекты, объем производства продукции и услуг, количество созданных рабочих мест. При этом методикой предусмотрено применение коэффициентов для каждого показателя, целью которых является нивелирование различий между критериями по их эффективной значимости, важности для оценки состояния СЭЗ [12].

Данная методика была разработана в рамках исполнения поручений Главы государства во время Послания народу Казахстана 1 сентября 2022 г. о переходе к принципиально другой политике по развитию СЭЗ. Вместе с тем до сих пор она не получила нормативного закрепления [13, с. 219].

В 2021 году по поручению руководства страны проведена комплексная ревизия эффективности СЭЗ за 2017–2020 гг.

В ходе рассмотрения ее итогов на заседании Счетного комитета по контролю за исполнением республиканского бюджета Высшей аудиторской палаты Республики Казахстан озвучены системные проблемы, препятствующие привлечению инвестиций в СЭЗ, в числе которых [14]:

– высокая доля участия квазигосударственных субъектов в промышленных проектах (государственные инвестиции составляют более 60 % от общего объема инвестиций);

– низкая обеспеченность инфраструктурой (средний показатель завершенности инфраструктуры СЭЗ составляет лишь около 70 %) и невысокая заполняемость некоторых СЭЗ (текущая заполняемость СЭЗ составляет лишь 40 %);

– отсутствие прозрачности в предоставлении услуг, связанных с получением земли и льгот;

– ограниченные сроки окупаемости для крупных инвесторов при приближении сроков завершения функционирования многих СЭЗ;

– высокая стоимость логистики до международных рынков при ограниченности внутреннего рынка сбыта и трудности вхождения на рынок стран ЕАЭС;

– отсутствие якорных проектов и четкой специализации в большинстве СЭЗ для создания производственных цепочек.

Согласно анализу данных Высшей аудиторской палаты Республики Казахстан лишь четыре казахстанских СЭЗ по итогам 2017–2020 гг. можно было назвать успешными («Астана — новый город», «Парк инновационных технологий», «Оңтүстік» и «Морпорт Актау»). Остальные СЭЗ не смогли достичь установленных целевых показателей.

После проведения данного аудита в стране приняты системные меры, направленные на повышение эффективности функционирования СЭЗ.

Так, с 2023 года предусмотрено право выкупа земельного участка участниками СЭЗ, которые добросовестно выполнили обязательства после истечения трёх лет с момента ввода в эксплуатацию всех объектов реализуемого проекта. Обязательным условием для выкупа земельного участка является осуществление производства на соответствующих объектах. При этом выкуп земельного участка осуществляется по той кадастровой стоимости, которая была на момент, когда они начали свою деятельность в этой СЭЗ.

Право выкупа земельных участков было предоставлено в целях решения проблемы, связанной с внедрением в 2019 году нового механизма распределения земельных участков на территории СЭЗ, согласно которому предоставление инвестором участков в СЭЗ стало осуществляться не напрямую от акиматов, как это было ранее, а через управляющие компании в формате субаренды.

В связи с этим финансовые институты не только отказывались брать в залог такие участки или здания на них, но и в целом отказывались финансировать проекты, которые предусматривали строительство на земельных участках на правах субаренды. Это стало серьезной проблемой для инвесторов, уже вложивших значительные средства в производства, для дальнейшего развития которых требовалось дополнительное финансирование [15].

Кроме того, была предоставлена возможность вхождения в СЭЗ потенциальных инвесторов, не попадающих под приоритетные виды деятельности. Внедрен новый термин «непрофильные виды деятельности». При этом лица, осуществляющие непрофильные виды деятельности, не являются участниками СЭЗ, им не предоставляют-

ся налоговые и таможенные льготы. Вместе с тем такие лица могут в полной мере пользоваться инфраструктурой СЭЗ.

Также с 1 января 2024 года введен дифференцированный подход к предоставлению налоговых льгот в СЭЗ. Так, для организаций и индивидуальных предпринимателей, осуществляющих деятельность на территории СЭЗ, предусмотрено уменьшение на 100 процентов корпоративного подоходного налога (по доходам, полученным от реализации товаров, работ, услуг, являющихся результатом осуществления приоритетных видов деятельности), земельного налога, налога на имущество, платы за пользование земельными участками, а также социального налога для организаций, осуществляющих деятельность в СЭЗ «Парк инновационных технологий». При этом такие льготы устанавливаются исходя из принципа «чем больше вложения, тем больше льгот», а именно, срок действия налоговых льгот (7, 15 либо 25 лет) напрямую зависит от объема вложенных инвестиций [16].

Наиболее актуальные официальные данные по казахстанским СЭЗ представлены на начало 2024 года [17].

По данным Национального отчета о состоянии промышленности в Республике Казахстан, подготовленного в 2024 году Казахстанским центром индустрии и экспорта «QazIndustry», на начало 2024 г. действовало 14 СЭЗ в 12 регионах страны (по состоянию на май 2025 г. их уже 16, в том числе «Alatau» и «Коркыт Ата», созданные в 2025 году). Благодаря особому льготному режиму, на территориях СЭЗ запущено 363 проекта с общей стоимостью более 3 трлн тенге, создано более 25,5 тыс. постоянных рабочих мест.

За весь период функционирования СЭЗ инвестировано более 3 трлн тенге в обрабатывающую промышленность, только за последние 5 лет – инвестиции составили 2 трлн тенге. Наибольший приток инвестиций обеспечен в СЭЗ «Национальный индустриальный нефтехимический технопарк», «Turan», «Морпорт Актау» и «Астана-Новый город» (таблица 5).

Как показывает мировая практика, эффективность функционирования СЭЗ напрямую зависит от готовности и наименьших затрат на строительство инфраструктуры. Из 14 казахстанских СЭЗ строительство инфраструктуры завершено только в трёх («Парк инновационных технологий», «Оңтүстік» и «Хоргос – Восточные ворота»), в пяти СЭЗ строительство на стадии завершения, в трёх СЭЗ – готовность инфраструктуры составляет не более 50 %, а в оставшихся трёх СЭЗ – только на начальной стадии реализации [17].

Суммарно на 1 затраченный бюджетный тенге привлечено 7 тенге в виде инвестиций. Наряду с этим на 1 бюджетный тенге, вложенный на строительство, участниками СЭЗ отчислено налогов в размере 1,2 тенге.

Объем производства продукции участниками СЭЗ составил 8,8 трлн тенге (таблица 6). Лидерами по объему производства продукции являются СЭЗ «Астана-Новый город», «Морпорт Актау» и «Парк инновационных технологий».

Таблица 5 – Инвестиции в казахстанские СЭЗ до 1 квартала 2024 г., в млрд тенге

СЭЗ	До 2019 года	2019 год	2020 год	2021 год	2022 год	2023 год	1 квартал 2024 г.	За весь период
«Астана-Новый город»	163,5	7,6	16,0	16,2	9,6	22,8	40,4	276,1
«Морпорт Актау»	98,4	20,9	72,8	60,5	32,6	11,9	27,7	324,9
«Парк инновационных технологий»	30,0	2,6	4,9	8,2	13,6	36,1	8,9	104,4
«Оңтүстік»	28,4	1,3	2,9	20,3	5,5	0,3		58,7
«Национальный индустриальный нефтехимический технопарк»	359,3	149,2	250,6	298,7	153,0	85,0	10,5	1 306,3
«Сарыарка»	94,6	1,9	29,6	26,1	5,7	15,0	3,19	176,1
«Павлодар»	66,2	9,0	4,4	4,6	3,8	15,2	5,3	108,5
«Хоргос – Восточные ворота»	45,2	2,9	0,6	1,3	2,2	2,8	0,1	55,0
«Jibek Joly»	22,7	3,5	0,1	5,8	4,8	1,2	0,06	38,1
Международный центр приграничного сотрудничества «Хоргос»		20				9,7		29,7
«Астана – Технополис»	0,1	0,3	1,1	9,9	17,2	12,3	16,2	57,1
«Turan»		10,1	147,3	207,0	57,4	60,1	4,5	486,4
«QYZYLJAR»			2,0	11,7	3,4	11,6	3,9	32,5
ВСЕГО	908,3	229,3	532,3	670,3	308,8	284,0	120,8	3 053,8

Примечание – Источник: [17].

Таблица 6 – Объемы производства СЭЗ до 1 квартала 2024 г., в млрд тенге

СЭЗ	До 2019 года	2019 год	2020 год	2021 год	2022 год	2023 год	1 квартал 2024 г.	За весь период
«Астана-Новый город»	1 413,8	550,3	799,9	1 022,8	1 238,4	1 165,8	302,8	6 493,8
«Морпорт Актау»	291,7	52,4	37,3	14,2	15,8	41,0	9,0	461,4
«Парк инновационных технологий»	156,4	73,8	76,6	91,4	152,3	213,7	29,6	793,8
«Оңтүстік»	43,8	18,5	15,6	30,4	39,1	38,4	10,1	195,8
«Национальный индустриальный нефтехимический технопарк»	9,7	6,5	6,6	10,8	19,8	68,9	21,4	143,7
«Сарыарка»	67,6	25,9	17,6	20,2	25,7	33,9	6,8	197,8
«Павлодар»	82,9	41,3	42,2	42,3	56,8	55,3	14,2	334,9
«Хоргос – Восточные ворота»	4,5	3,1	8,1	10,7	13,0	14,8	4,1	58,3
«Jibek Joly»		2,1	2,1	0,3	2,0	0,1	0,01	6,6
Международный центр приграничного сотрудничества «Хоргос»								
«Астана – Технополис»		0,8	0,2	0,1	0,03	3,6	0,13	4,8
«Turan»								
«QYZYLJAR»			0,0	11,2	36,5	63,7	9,1	120,5
ВСЕГО	1 914,0	931,0	1 006,3	1 254,4	1 599,4	1 699,2	407,2	8 811,5

Примечание – Источник: [17].

За весь период функционирования СЭЗ экспортировано продукции на порядка 638,6 млрд тенге. При этом приведенные статистические данные позволяют сделать вывод, что наиболее

экспортноориентированными являются СЭЗ «Национальный индустриальный нефтехимический технопарк», «Сарыарка» и «Павлодар» (таблица 7).

Таблица 7 – Экспорт участников СЭЗ до 1 квартала 2024 г., в млрд тенге

СЭЗ	До 2019 года	2019 год	2020 год	2021 год	2022 год	2023 год	1 квартал 2024 г.	За весь период
«Астана-Новый город»	23,8	10,8	28,5	16,5	21,1	24,1	2,3	127,1
«Морпорт Актау»	1,6		0,6	0,3	0,1	1,1	0,01	3,8
«Парк инновационных технологий»	4,2	1,8	0,9	0,3	1,0	2,2	0,6	10,9
«Оңтүстік»	21,1	12,5	9,3	13,2	15,9	11,7	2,4	86,0
«Национальный индустриальный нефтехимический технопарк»	5,2	4,1	5,3	7,8	14,2	60,4	20,5	117,4
«Сарыарка»	41,2	13,5	6,0	11,7	8,3	22,1	3,0	105,8
«Павлодар»	40,9	21,7	20,1	20,3	31,4	28,1	6,2	168,7
«Хоргос – Восточные ворота»		2,1		3,9	0,9	0,4	0,5	7,8
«Jibek Joly»								
Международный центр приграничного сотрудничества «Хоргос»								
«Астана – Технополис»								
«Turan»								
«QYZYLJAR»					1,9	7,2	1,9	11,0
ВСЕГО	138,0	66,5	70,8	73,9	94,7	157,4	37,2	638,6

Примечание – Источник: [17].

Хотя вклад СЭЗ в экономику Республики Казахстан пока не так велик, их роль в деле привлечения прямых инвестиций в несырьевые и инновационные производства, а также в интеграции в глобальную торговую систему, крайне важна. Учитывая достаточно высокую эффективность большинства казахстанских СЭЗ, их количество и роль в развитии страны в перспективе будут только расти.

Опыт соседей и белорусская модель – перспективы для совершенствования

Несмотря на то, что белорусские СЭЗ по эффективности своей деятельности не уступают СЭЗ Республики Казахстан, отдельные элементы функционирования казахстанских СЭЗ имеют право быть рассмотрены при совершенствовании организационно-экономического механизма функционирования наших СЭЗ.

Так, предлагается обеспечить разработку администрациями СЭЗ стратегий развития с обязательным определением целевых индикаторов развития.

Удивительно, что до сих пор в стране отсутствовала практика разработки стратегий развития СЭЗ. Ведь именно стратегические

документы являются основой развития и функционирования любых экономических образований.

При этом полагаем, что это должна быть не «разовая акция», а законодательно закреплённая норма, предусматривающая разработку и актуализацию стратегии развития СЭЗ на регулярной основе.

Исходя из анализа стратегий развития казахстанских СЭЗ [18–20] рекомендуется предусмотреть включение в стратегии развития белорусских СЭЗ таких разделов:

1. Общая информация и текущее состояние СЭЗ, включая исторический анализ развития СЭЗ, миссию и видение СЭЗ, информацию о действующих резидентах СЭЗ, территории СЭЗ и ее обеспеченности инфраструктурой. В данном разделе также целесообразно отражать анализ основных параметров и экономической ситуации в регионе базирования СЭЗ.

2. Итоги деятельности СЭЗ за пятилетний период. В разделе предлагается отражать анализ итогов работы резидентов СЭЗ (по основным экономическим показателям), в том числе в графическом формате, с предостановлением выводов, а также пояснений (в случае недостижения установленных показателей деятельности либо выявления отрицательной динамики). Кроме того, от-

дельное внимание предлагается уделить результатам деятельности администраций СЭЗ в части развития инфраструктуры на территории СЭЗ, привлечения новых инвесторов и др.

3. Потенциалы и риски развития СЭЗ.

На основании SWOT-анализа (анализ факторов внутренней среды) и PESTLE-анализа (анализ факторов внешней среды) предлагается выявить сильные и слабые стороны, а также возможности и угрозы развития СЭЗ для дальнейшей выработки стратегических целей их развития. В разделе также предлагается отражать анализ конкурентной среды СЭЗ.

4. Стратегические цели развития СЭЗ на пятилетний период, включающего как непосредственно сами цели, так и оцифрованные целевые индикаторы (показатели) развития.

Дополнительно видится целесообразным утверждение планов реализации стратегических целей развития СЭЗ с обязательным отражением наименований мероприятий, сроков и формы их реализации, а также ответственных исполнителей.

Действующая в Республике Беларусь методика оценки эффективности деятельности СЭЗ также требует совершенствования. В настоящее время система оценки эффективности СЭЗ ограничивается оценкой работы их резидентов и представляет собой по сути сопоставление фактических и плановых показателей, характеризующих вложение инвестиций в основной капитал, производственную деятельность, численность работников, принятых на дополнительно введенные рабочие места [21]. При таком подходе оценка эффективности функционирования резидентов зависит не только от достигнутых ими реальных результатов, но и от качества планирования и прогнозирования, от реальности или, наоборот, амбициозности бизнес-планов инвестиционных проектов.

На основании анализа опыта оценки эффективности функционирования СЭЗ автором предложена собственная система комплексной оценки эффективности функционирования белорусских СЭЗ, включающая такие показатели:

- эффективность деятельности резидентов СЭЗ (оценивается путем анализа экономических показателей деятельности резидентов СЭЗ, в том числе с сопоставлением фактических данных с плановыми, а также данных за текущий период с данными предшествующего периода);
- эффект от деятельности СЭЗ для государства (рассчитывается с использованием показателя чистой приведенной стоимости (NPV));
- влияние деятельности СЭЗ на социально-экономическое развитие региона, на территории которого она создана (определяется как доля резидентов СЭЗ в основных показателях деятельности регионов их базирования);
- эффективность деятельности администрации СЭЗ (анализируются такие показатели, как прирост количества резидентов СЭЗ, оснащенность объектами инфраструктуры, а также доля пустующих площадей);
- вклад СЭЗ в достижение целей, поставленных документами государственного прогнозирования и планирования.

Предложенная система, по мнению автора, позволит выявлять устойчивые как положительные, так и отрицательные тенденции их развития и своевременно реагировать на возникающие вызовы и угрозы как внешнего, так и внутреннего характера.

Кроме того, предлагается отдельные координационные задачи, в том числе в настоящее время возложенные на администрации СЭЗ, передать Национальному агентству инвестиций и приватизации.

В частности, предлагается возложить на Национальное агентство инвестиций и приватизации такие задачи:

- ведение единого реестра резидентов СЭЗ и выдача свидетельства о регистрации лица в качестве резидента СЭЗ;
- обучение сотрудников администраций СЭЗ;
- разработка и внедрение в деятельность администраций СЭЗ системы менеджмента качества;
- выработка рекомендаций по разработке стратегий развития СЭЗ;
- мониторинг достижения администрациями СЭЗ целевых индикаторов развития;

– внедрение системы управления рисками в деятельности администраций СЭЗ в части оценки добросовестности претендентов на получение статуса резидента СЭЗ и анализа их последующей деятельности в целях своевременного принятия мер реагирования.

Также предлагается дифференцировать предоставляемые резидентам белорусских СЭЗ преференции (по сроку либо объему) в зависимости от результативности их деятельности (например, объем привлеченных инвестиций, достижение установленных показателей деятельности и др.).

Заключение

Результаты функционирования белорусских СЭЗ свидетельствуют об их положительном влиянии на социально-экономическое развитие регионов и национальной экономики в целом. Вместе с тем проведенное автором исследование показывает, что СЭЗ Республики Беларусь имеют значительный потенциал для дальнейшего развития. Необходимо повышать привлекательность белорусских СЭЗ за счет усиления возможностей и сильных сторон, а также нивелирования ограничений и угроз. Кроме того, важно изучать опыт стран, имеющих успехи в развитии СЭЗ, для того чтобы адаптировать и применять его в национальной экономике.

Предложенные в статье направления совершенствования организационно-экономического механизма функционирования отечественных СЭЗ, разработанные на основании изучения опыта Республики Казахстан по реализации института СЭЗ, по мнению автора, позволят придать отечественным СЭЗ новый импульс развития.

Список цитированных источников

1. Огнева, Н. Ф. СЭЗ как фактор развития интеграционных процессов в рамках ЕАЭС / Н. Ф. Огнева // Евразийский союз ученых. – 2018. – № 2 (47). – С. 62–66.
2. Бык, В. Ф. Свободные экономические зоны Республики Беларусь: 20 лет: условия, тенденции, эффективность функционирования / В. Ф. Бык // Потребительская кооперация. – 2018. – № 2. – С. 25–37.
3. О свободных экономических зонах: Закон Респ. Беларусь, 7 дек. 1998 г., № 213-З // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H19800213> (дата обращения: 25.06.2025).
4. Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: <https://www.belstat.gov.by> (дата обращения: 25.06.2025).
5. Прудникова, В. А. Свободные экономические зоны как инструмент стимулирования развития региона на примере Республики Беларусь / В. А. Прудникова // Экономика и управление: социальный, экономический и инженерный аспекты: Сборник научных статей III Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 19–20 ноября 2020 г. / редкол.: С. Ф. Куган [и др.]. – Брест: БрГТУ, 2020. – С. 51–56.
6. Прудникова, В. А. Свободные экономические зоны Республики Беларусь: тенденции и перспективы развития / В. А. Прудникова // Экономика, право и управление: Сборник научных трудов / УО «Частный институт управления и предпринимательства». – 2022. – № 10. – С. 71–81.
7. Прудникова, В. А. SWOT-анализ свободных экономических зон Республики Беларусь // Информационное общество: проблемы правовых, экономических и социально-гуманитарных наук: Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции преподавателей, аспирантов и студентов. – Могилев: БИП, 2021. – С. 138.
8. Невматулина, К. А. Роль специальных экономических зон в развитии Республики Казахстан / К. А. Невматулина. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-spetsialnyh-ekonomicheskikh-zon-v-razviti-ri-respubliki-kazahstan> (дата обращения: 25.06.2025).
9. Кажыкен, М. З. Региональные инфраструктуры Казахстана: экономические зоны / М. З. Кажыкен // Инновации. – 2008. – № 7. – С. 18–22.
10. О специальных экономических и индустриальных зонах: Закон Респ. Казахстан от 3 апреля 2019 г., № 242-VI ЗРК // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1900000242> (дата обращения: 25.06.2025).
11. Об утверждении методики оценки эффективности деятельности специальных экономических и индустриальных зон: приказ Министра индустрии и инфраструктурного развития Респ. Казахстан, 12 авг. 2019 г., № 637 // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1900019248> (дата обращения: 25.06.2025).
12. О внесении изменения в приказ Министра индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан от 12 августа 2019 года № 637 «Об утверждении методики оценки эффективности деятельности специальных экономических и индустриальных зон»: Проект приказа Министра индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан. – URL: <https://legalacts.egov.kz/npa/view?id=14430652> (дата обращения: 25.06.2025).

13. Прудникова, В. А. Методологические подходы к оценке эффективности функционирования свободных экономических зон: отечественный и зарубежный опыт / В. А. Прудникова // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2025. – № 1 (136). – С. 218–224.
14. В Счетном комитете подведены итоги аудита эффективности деятельности специальных экономических зон. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/esep/press/news/details/217251?lang=ru> (дата обращения: 25.06.2025).
15. Предприятия на территориях СЭЗ получили возможность выкупать земельные участки в собственность. – URL: <https://atameken.kz/ru/news/48529-predpriyatiya-na-territoriyah-sez-poluchili-vozmozhnost-vyкупat-zemel-nye-uchastki-v-sobstvennost> (дата обращения: 25.06.2025).
16. О налогах и других обязательных платежах в бюджет: Кодекс Респ. Казахстан от 25 дек. 2017 г., № 120-VI // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1700000120> (дата обращения: 25.06.2025).
17. Национальный доклад о состоянии промышленности Республики Казахстан. – URL: https://qazindustry.gov.kz/images/docs/regdoc_ru--1736889600.pdf (дата обращения: 25.06.2025).
18. Диагностическое исследование специальных экономических и промышленных зон Казахстана. – URL: <https://www.carecprogram.org/uploads/2018-diagnostic-study-ecozones-kaz-ru.pdf> (дата обращения: 25.06.2025).
19. Стратегия развития специальных экономических зон города Астана на 2024–2026 годы. – URL: <https://investastana.kz/upload/files/Стратегия%202024-2026.pdf> (дата обращения: 25.06.2025).
20. Стратегия развития специальной экономической зоны «Международный центр приграничного сотрудничества «Хоргос» на 2020–2022 годы. – URL: <https://khorgos.kz/wp-content/uploads/2020/11/strategiya-sez-mczps-horgos-2020-2022.pdf> (дата обращения: 25.06.2025).
21. О критериях оценки эффективности деятельности резидентов свободных экономических зон на территории Республики Беларусь: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 27 сент. 2006 г., № 1264 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C20601264> (дата обращения: 25.06.2025).
8. Nevmatulina, K. A. Rol' special'nyh ekonomicheskikh zon v razvitiі Respubliki Kazakhstan / K. A. Nevmatulina. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-spetsialnyh-ekonomicheskikh-zon-v-razvitiі-respubliki-kazakhstan> (дата обращения: 25.06.2025).
9. Kazhyken, M. Z. Regional'nye infrastruktury Kazakhstan: ekonomicheskie zony / M. Z. Kazhyken // Innovacii. – 2008. – № 7. – С. 18–22.
10. О special'nyh ekonomicheskikh i industrial'nyh zonah : Zakon Resp. Kazakhstan ot 3 aprelya 2019 g., № 242-VI ZRK // Informacionno-pravovaya sistema normativnyh pravovyh aktov Respubliki Kazakhstan. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1900000242> (дата обращения: 25.06.2025).
11. Ob utverzhdenii metodiki ocenki effektivnosti deyatel'nosti special'nyh ekonomicheskikh i industrial'nyh zon: prikaz Ministra industrii i infrastrukturnogo razvitiya Resp. Kazakhstan, 12 avg. 2019 g., № 637 // Informacionno-pravovaya sistema normativnyh pravovyh aktov Respubliki Kazakhstan. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1900019248> (дата обращения: 25.06.2025).
12. O vnesenii izmeneniya v prikaz Ministra industrii i infrastrukturnogo razvitiya Respubliki Kazakhstan ot 12 avgusta 2019 goda № 637 «Ob utverzhdenii metodiki ocenki effektivnosti deyatel'nosti special'nyh ekonomicheskikh i industrial'nyh zon : Proekt prikaza Ministra industrii i infrastrukturnogo razvitiya Respubliki Kazakhstan. – URL: <https://legalacts.egov.kz/npa/view?id=14430652> (дата обращения: 25.06.2025).
13. Prudnikova, V. A. Metodologicheskie podhody k ocenke effektivnosti funkcionirovaniya svobodnyh ekonomicheskikh zon: otechestvennyy i zarubezhnyy opyt / V. A. Prudnikova // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2025. – № 1 (136). – С. 218–224.
14. V Schetnom komitete podvedeny itogi audita effektivnosti deyatel'nosti special'nyh ekonomicheskikh zon. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/esep/press/news/details/217251?lang=ru> (дата обращения: 25.06.2025).
15. Predpriyatiya na territoriyah SEZ poluchili vozmozhnost' vyкупat' zemel'nye uchastki v sobstvennost'. – URL: <https://atameken.kz/ru/news/48529-predpriyatiya-na-territoriyah-sez-poluchili-vozmozhnost-vyкупat-zemel-nye-uchastki-v-sobstvennost> (дата обращения: 25.06.2025).
16. O nalogah i drugih obyazatel'nyh platezhah v byudzhete: Kodeks Resp. Kazakhstan ot 25 dek. 2017 g., № 120-VI // Informacionno-pravovaya sistema normativnyh pravovyh aktov Respubliki Kazakhstan. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1700000120> (дата обращения: 25.06.2025).
17. Nacional'nyj doklad o sostoyanii promyshlennosti Respubliki Kazakhstan. – URL: https://qazindustry.gov.kz/images/docs/regdoc_ru--1736889600.pdf (дата обращения: 25.06.2025).
18. Diagnosticheskoe issledovanie special'nyh ekonomicheskikh i industrial'nyh zon Kazahstana. – URL: <https://www.carecprogram.org/uploads/2018-diagnostic-study-ecozones-kaz-ru.pdf> (дата обращения: 25.06.2025).
19. Strategiya razvitiya special'nyh ekonomicheskikh zon goroda Astana na 2024–2026 gody. – URL: <https://investastana.kz/upload/files/Strategiya%202024-2026.pdf> (дата обращения: 25.06.2025).
20. Strategiya razvitiya special'noj ekonomicheskoy zony «Mezhdunarodnyj centr prigranichnogo sotrudnichestva «Horgos» na 2020–2022 gody. – URL: <https://khorgos.kz/wp-content/uploads/2020/11/strategiya-sez-mczps-horgos-2020-2022.pdf> (дата обращения: 25.06.2025).
21. O kriteriyah ocenki effektivnosti deyatel'nosti rezi-dentov svobodnyh ekonomicheskikh zon na territorii Respubliki Belarus': postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 27 sent. 2006 g., № 1264 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C20601264> (дата обращения: 25.06.2025).

References

1. Ogneva, N. F. SEZ kak faktor razvitiya integracionnyh processov v ramkah EAES / N. F. Ogneva // Evrazijskij soyuz uchenykh. – 2018. – № 2 (47). – С. 62–66.
2. Byk, V. F. Svobodnye ekonomicheskie zony Respubliki Belarus': 20 let: usloviya, tendencii, effektivnost' funkcionirovaniya / V. F. Byk // Potrebitel'skaya kooperaciya. – 2018. – № 2. – С. 25–37.
3. O svobodnyh ekonomicheskikh zonah: Zakon Resp. Belarus', 7 dek. 1998 g., № 213-Z // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H19800213> (дата обращения: 25.06.2025).
4. Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – URL: <https://www.belstat.gov.by> (дата обращения: 25.06.2025).
5. Prudnikova, V. A. Svobodnye ekonomicheskie zony kak instrument stimulirovaniya razvitiya regiona na primere Respubliki Belarus' / V. A. Prudnikova // Ekonomika i upravlenie: social'nyj, ekonomicheskij i inzhenernyj aspekty: Sbornik nauchnyh statej III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 19–20 noyabrya 2020 g. / redkol.: S. F. Kugan [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2020. – С. 51–56.
6. Prudnikova, V. A. Svobodnye ekonomicheskie zony Res-publiki Belarus': tendencii i perspektivy razvitiya / V. A. Prudnikova // Ekonomika, pravo i upravlenie: Sbornik nauchnyh trudov / UO «CHastnyj institut upravleniya i predprinimatel'stva». – 2022. – № 10. – С. 71–81.
7. Prudnikova, V.A. SWOT-analiz svobodnyh ekonomicheskikh zon Respubliki Belarus' // Informacionnoe obshchestvo: problemy pravovyh, ekonomicheskikh i social'no-gumanitarnykh nauk: Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii prepodavatelej, aspirantov i studentov. – Mogilev : BIP, 2021. – С. 138.

Материал поступил 29.06.2025, одобрен 10.07.2025, принят к публикации 10.07.2025

СЛОГАН В РЕКЛАМНОЙ КОММУНИКАЦИИ

П. Н. Резько

К. пед. н., доцент, доцент кафедры лингвистических дисциплин и межкультурных коммуникаций, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: peterrezko77@gmail.com

Реферат

Статья «Слоган в рекламной коммуникации» посвящена рекламной коммуникации как одному из наиболее распространенных видов массовой коммуникации. Целью исследования является определение наиболее эффективных психолингвистических средств при составлении рекламных слоганов для формирования позитивного образа бренда или продукта. Автор анализирует виды рекламной коммуникации и модели их восприятия целевой аудиторией. Во введении рассматривается влияние бурного развития технологий передачи данных и распространение доступа к информации на поведение современного потребителя информации.

В основной части анализируются особенности рекламного медиасообщения и его составные компоненты, способы привлечения внимания потребителя и закрепления на его подсознательном уровне положительных ассоциаций относительно имиджа компании, продукта или услуги. Особое внимание в статье уделено лингвистическим инструментам, применяемым для создания эмоционально заряженных образов. В частности, рассматриваются такие эффективные приемы фиксирования внимания потребителя, как повторение и рифмованные слоганы, которые легко запоминаются и узнаются. При этом подчеркивается, что эффективность рекламы зависит не только от выбора языка и контекста, в котором он используется, но и от того, насколько он соответствует целям кампании и целевой аудитории. Поэтому в работе также делается акцент на стилистических приемах, применяемых при создании рекламных слоганов, с учетом культурных и языковых различий; детально рассматривается такое явление, как лингвистический шок. В заключении приведены практические рекомендации по составлению рекламных слоганов для повышения экономической эффективности рекламной кампании. Область применения полученных результатов исследования – учебные программы по лингвистике, рекламной коммуникации и маркетингу, а также при разработке маркетинговых стратегий и рекламных компаний.

Ключевые слова: рекламная коммуникация, целевая аудитория, текст, слоган, метафора, рифма, медиасообщение.

SLOGANS IN ADVERTISING COMMUNICATION

P. N. Rezko

Abstract

The article "Slogan in Advertising Communication" is devoted to advertising communication as one of the most common types of mass communication. The purpose of the study is to determine the most effective psycholinguistic tools for composing advertising slogans to form a positive image of a brand or product. The author analyzes the types of advertising communication and models of their perception by the target audience. The introduction examines how the rapid development of data transmission technologies and the spread of access to information affect the behavior of the modern consumer. The main part analyzes the features of the advertising media message and its components, as well as, ways of attracting the consumer's attention and fixing positive associations on his subconscious level regarding the image of the company, product or service. Particular attention in the article is paid to the linguistic tools used to create emotionally charged images. In particular, such effective techniques for fixing the consumer's attention as repetitions and rhymed slogans that are easy to remember and recognize are considered. It is emphasized that the effectiveness of advertising depends not only on the choice of language and the context, as well as, its correspondence to the goals of the campaign and the target audience, that is why the paper focuses on stylistic techniques used in creating advertising slogans taking into account cultural and linguistic differences. Such a phenomenon as linguistic shock is examined in detail too. The conclusion presents practical recommendations for composing advertising slogans to improve the economic efficiency of an advertising campaign. The scope of research application is educational programs in linguistics, advertising communication and marketing, as well as in the development of marketing strategies and advertising campaigns.

Keywords: advertising communication, target audience, text, slogan, metaphor, rhyme, media message.

Введение

В современной науке стремительно растет активность исследований рекламных текстов лингвистами, психологами и экспертами в области массовой коммуникации и смежных дисциплин.

Этот тренд объясняется тем, что начало XXI века стало периодом нового этапа в развитии человечества, а именно – появления информационного общества, а рекламные тексты, т. е. тексты, побуждающие к тем либо иным действиям, будь то покупка товара или желаемая заказчиком социальная или политическая активность индивидуума, составляют значительную часть потребляемой людьми информации [1].

В Республике Беларусь проблема рекламной коммуникации, ее генезис, прагматические, структурно-семантические характеристики, равно как и семиотико-аксиологический потенциал, остаются до настоящего времени практически неисследованными. Немногочисленные работы, появившиеся в начале 2000-х гг. (А. М. Горлатов, Н. Г. Швец, Т. В. Поплавская, И. И. Калачева, И. В. Сидорская, Т. В. Еромейчик, А. В. Пачковская, М. А. Гладко, О. А. Горбач), выполнены преимущественно на иностранном материале и касаются лишь отдельных аспектов рассматриваемого феномена [2, с. 5]. Так, И. И. Калачева исследует возможности социальной ре-

кламы в продвижении ценностей белорусского общества [3, 4]. О. В. Казимирова, говоря о коммуникативных актах англоязычного медийного дискурса, рассматривает языковое воплощение коммуникативных стратегий и тактик в рекламном очерке [5]. Т. В. Еромейчик на основе сопоставления ценностной специфики американской и белорусской культур отмечает особенности белорусской рекламы, которая не только апеллирует к доминантным ценностям современного социума, но и оказывает социокультурное воздействие на процесс их образования и модификации [6]. Первой серьезной работой по тематике рекламной коммуникации является монография 2022 года Т. В. Солодовниковой «Рекламная коммуникация Беларуси и Франции» [2], где на примере сравнения двух стран рассматривается онтология современной рекламной коммуникации. При этом необходимость исследования рекламной коммуникации в Беларуси обусловлена не только изменениями социальных отношений в современном информационно-коммуникационном пространстве, но и задачами повышения эффективности национального бизнеса. Целью данного исследования является определение наиболее эффективных психолингвистических средств при составлении рекламных слоганов для формирования позитивного образа бренда или продукта.

Необходимость исследования рекламной коммуникации в Беларуси обусловлена не только изменениями социальных отношений в современном информационно-коммуникационном пространстве, но и задачами повышения эффективности национального бизнеса. Целью данного исследования является определение наиболее эффективных психолингвистических средств при составлении рекламных слоганов с целью формирования позитивного образа бренда или продукта.

Основные принципы создания рекламного слогана

В рекламной практике текст играет ключевую роль, часто выступая основным и, в некоторых случаях, единственным средством передачи смысла. Он отражает основные идеи и цели рекламного послания, раскрывая его суть и привлекая внимание целевой аудитории. В то время как иллюстрации могут активизировать эмоциональные реакции у потребителей, вербальная составляющая рекламного сообщения стимулирует интеллектуальную активность и направляет ассоциативный поток в строго заданное русло, предлагаемое рекламодателем. Рекламный текст состоит из следующих основных компонентов: слоган, заголовок, основной печатный текст и эхо-фраза. При этом слоган зачастую играет решающую роль не только в процессе привлечения внимания, но и в закреплении на подсознательном уровне рекламного сообщения. Само понятие «слоган» происходит от газельского *slaugh-gharim*, что переводится как «боевой клич». В современном контексте термин «слоган» впервые был использован в 1880 году [7].

Слоган представляет собой краткое, ясное и легко запоминающееся выражение, содержащее главный логический элемент – название товара или бренда – и выражающее сущность и философию фирмы, ее целостную политику в различных областях. Слоган представляет собой важнейший элемент маркетинговой стратегии, выполняющий функцию запоминающегося вербального маркера бренда. Его основная задача – способствовать формированию устойчивой ассоциации с брендом и повышению уровня доверия аудитории. Через слоган компания транслирует ключевые аспекты своей миссии, ценностей и позиционирования на рынке. В качестве примера можно привести один из наиболее успешных рекламных слоганов в истории: «A Diamond is Forever» – фраза, созданная копирайтером Мэри Френсис Герети для компании De Beers Consolidated Mines [8]. В 1947 году перед специалистами по рекламе стояла задача стимулировать спрос на бриллианты в послевоенный период. Герети предложила концепцию, подчеркивающую долговечность и символическое значение бриллиантов, что способствовало их ассоциации с вечной любовью. В 1999 году фраза «Бриллиант – это навсегда» была признана лучшим рекламным слоганом XX века [9]. Следует отметить, что слоган не всегда тождествен уникальному торговому предложению, которое представляет собой отличительную характеристику продукта или услуги. В ряде случаев слоган ориентирован не на конкретные свойства товара, а на формирование эмоционального отклика и укрепление имиджа бренда. Так, например, слоган компании Nike «Just Do It» не содержит информации о характеристиках продукции, но эффективно передает философию бренда, связанную с мотивацией и достижением целей [10]. В противоположность этому, слоган службы доставки Самокат «Быстро и точка» непосредственно отражает ключевую ценность сервиса, аналогично слогану поисковой системы Яндекс «Найдётся всё», подчеркивающему универсальность поиска [11].

Основная цель рекламного слогана – вызвать положительные ассоциации у потребителя относительно имиджа компании, продукта или услуги и в конечном итоге привлечь его как клиента. Характеристики хорошего слогана включают в себя его краткость и запоминаемость, а также наличие имени бренда или названия продукта. Обычно слоган состоит из 4–5 слов, при этом максимальный объем редко превышает семь слов. Слоган часто становится ключевым элементом идентификации бренда и может существенно повлиять на его восприятие в обществе. Примеры рекламных слоганов автомобилей: Volvo – «Для жизни», BMW – «С удовольствием за рулем», Toyota – «Управляй мечтой», Lada – «Ключ к дорогам России» [12] – демонстрируют, что краткие и меткие выражения легко запоминаются и ассоциируются с брендом.

Как можно заметить, краткость и ясность выражения позволяют легко запомнить слоган рекламируемой фирмы, впоследствии эта

фраза вызывает у реципиентов ассоциативный эффект – вспоминая название данной фирмы, мы легко воспроизводим ее слоган. Он должен четко соответствовать поставленной задаче, быть легко запоминающимся, понятным и близким целевой аудитории. Он должен быть простым. «It's a Sony» [13] и «Intel Inside» [14] – всего два слова, и у нас сразу возникает ассоциация с понятиями высокого качества и надежности. Для имиджевой рекламы важна лаконичность: «Все и сразу!» (МТС-Джинс), «С нами удобно» (Билайн).

Далее рассмотрим основные теоретические принципы создания рекламного слогана. Ключом к созданию хорошего рекламного слогана является знание модели восприятия целевой аудитории, при этом иногда собственные представления автора и его стереотипы подменяют параметры в модели восприятия потребителей, что в свою очередь приводит к низкой эффективности рекламного медиа сообщения. Для одной целевой аудитории могут быть использованы лексемы: *элитный, трендовый, модный*, а также иноязычные слова: *хай-тек, инновации, фэшн, смарт*, а для другой – *качественный, уютный, родной, вкус детства* и т. д. Понятно, что элитная мебель будет стоить дороже, чем та же самая мебель, создающая уют, но и объемы продаж будут меньше. Слоган будет отличаться в зависимости от цели продвижения, будь то имиджевая реклама банка или компании со столетней историей, вывод на рынок нового продукта или поддержка спроса на уже существующий рынок. В последнем случае надо применять увещательную или сравнительную стратегию (например, новый «Фэйри» с «обычным чистящим порошком»): противопоставление дает очень сильный эффект. Создатель слогана должен иметь четкое видение, какой преобладающий мотив в модели восприятия должен вызвать данный рекламный слоган. Автору необходимо знать каналы продвижения, т. е. какие медиа будут использоваться для продвижения продукта (соцсети, сувенирная продукция, наружная реклама, радио, телевизионная реклама и т. д.), и понимать место рекламного слогана в визуальной концепции кампании (будет рекламный слоган выступать как самостоятельный эмоциональный усилитель или станет работать в системе с макетом, роликом, другим видом коммуникации). Важным является и подбор размера рекламного слогана в зависимости от канала продвижения – количество слов, символов, ударений и слогов [15, с. 172].

Рифма в рекламе также может быть очень эффективным инструментом, который помогает запомнить бренд или продукт (исключение составляет имиджевая реклама). Рифмованные слоганы и лозунги легко запоминаются и легко узнаются потребителями «*Есть идея – есть Икея*» или «*Есть приметы – есть предметы*». Компания Kellogg's Rice Krispies использует звукоподражания, чтобы передать звук поедания хлопьев и ощущение хлопьев, хрустящих и лопающихся в молоке: «*Snap, Crackle, Pop*». В последнем примере появляется сочетание рифмы и метафоры. Как мы знаем, метафора – это образное употребление слова, основанное на наличии сходства. Метафора в рекламном тексте позволяет нам представить одни объекты с помощью переноса на них характеристик и качеств других предметов – идеальных, символизирующих в нашем сознании здоровье, счастье и успех [16, с. 633].

При этом необходимо отметить, что психология восприятия метафор основывается на способности этих языковых конструкций вызывать когнитивные ассоциации и эмоциональные реакции, способствующие формированию лояльного отношения к бренду [17, с. 74]. В маркетинговых коммуникациях метафоры выполняют не только информативную, но и аффективную функцию, создавая эмоциональный фон, помогающий установлению связей между продуктом или услугой и личным опытом или потребностями потребителя. Нейропсихологические исследования подтверждают, что метафоры активируют области мозга, связанные с эмоциями и долговременной памятью, что способствует формированию устойчивых ассоциативных связей. Этот механизм объясняет, почему метафорические образы облегчают запоминание маркетинговых сообщений и влияют на принятие решений. Например, метафора финансовой компании, представленной как «крепость», вызывает ощущение безопасности и надежности, что может предопределять выбор потребителя в пользу данного бренда. Такие образы воздействуют на когнитивные процессы на уровне инстинктивных реакций, усиливая восприятие бренда через эмоциональную вовлеченность. Кроме того, метафоры выполняют когнитивную функцию, облегчая осмысление

сложных концепций путём их трансформации в более доступные и легко усваиваемые образы. Это особенно актуально в ситуациях, когда бренд стремится передать абстрактные идеи или технически сложную информацию. За счёт упрощения когнитивной нагрузки использование метафор способствует более эффективной коммуникации с широкой аудиторией, включая потребителей, не обладающих специализированными знаниями.

Эффективность метафор во многом зависит от их соответствия культурным и социальным контекстам целевой аудитории. Например, в слогане Apple «Think Different» метафора «думать иначе» ассоциируется с инновационным и нестандартным мышлением, что усиливает идентификацию бренда с индивидуальностью и прогрессивностью. Это стратегически важный аспект позиционирования компании, направленный на привлечение аудитории, стремящейся к индивидуальности и новаторству. Метафорические конструкции также широко применяются в наименованиях брендов и продуктов. Например, название автомобиля Ford Mustang формирует ассоциации с дикой лошастью, олицетворяющей скорость, свободу и мощь. Такая метафора не только усиливает эмоциональное восприятие продукта, но и способствует мгновенному созданию устойчивого образа в сознании потребителя.

При этом существуют значительные различия в восприятии метафор в различных культурах. В западных странах, а также в США, метафоры часто ассоциируются с индивидуализмом, достижением успеха и конкуренцией. Использование образов, связанных с борьбой, спортивными достижениями или преодолением препятствий, воспринимается как мотивирующее и вдохновляющее [18]. В то же время в восточных культурах, таких как китайская, в которых доминируют коллективистские ценности и стремление к гармонии, аналогичные метафоры могут восприниматься как агрессивные или неуместные. Поэтому необходимо учитывать культурные и языковые различия, чтобы повысить эффективность рекламной коммуникации и избежать культурного и лингвистического шока, который определяется как состояние удивления, смеха или смущения, возникающее у человека, когда он слышит в иноязычной речи языковые элементы, звучащие на его родном языке странно, смешно или неприлично [19].

В целом лингвистический шок имеет две стороны: позитивную и негативную. Его негативная сторона заключается в наличии в иностранном языке слов, звучащих по сравнению с родным несуразно для носителя информации, что, в свою очередь, воздействует на подсознание реципиента информации. В истории рекламы существует множество примеров, иллюстрирующих важность лингвистической адаптации при внедрении продукции на различные рынки. Одним из таких случаев является история с компанией Кока-Кола, которая, решив продвигать свои продукты на китайском рынке, столкнулась с проблемой транслитерации своего названия. Поскольку абсолютного сходства в транслитерации невозможно, первоначальный перевод звучал как «Кекон-Ке-Ла». Однако это привело к недоразумению, так как в китайском языке каждый слог имеет свое значение, и это сочетание звучало странно, как «Кобыла, настигнутая воском». В результате компания провела тщательный анализ китайских оборотов и предложила новую транслитерацию «Ко-Коу-Ко-Ле», которая имела более позитивное значение «Полный рот счастья». Приведем еще несколько примеров. Так, советский автомобильный бренд «Жигули» схож по звучанию с итальянским словом «жиголо», обозначающим сутенера, что послужило причиной создания нового бренда «Лада» вначале для европейского рынка, а затем и для отечественного [20, с. 87]. Американская фирма Clairol поставляла в Германию дезодорант Mist Stick, что значит «Туманный дезодорант». В немецком языке слово Mist («туман») означает «навоз». Американская корпорация General Motors потерпела на рынке Латинской Америки фиаско, пытаясь ввести в продажу свой новый автомобиль Chevrolet Nova. «No va» по-испански означает «не может двигаться». Авиакомпания American Airlines установила в своих самолетах кожаные кресла и решила сообщить об этом мексиканским потребителям. На английском языке реклама звучала так: «Fly in Leather», что значит «Летай в коже!». В буквальном переводе на испанский язык это выражение обрело иной смысл: «Летай голым!» [21, с. 83]. Подобные ситуации подчеркивают необходимость учитывать культурные и лингвистические особенности при создании рекламных сообщений. В противном случае неудачный перевод или

выбор названия может негативно отразиться на восприятии продукта и привести к проблемам с маркетингом.

Рассматривая позитивную сторону лингвистического шока в рекламной коммуникации, необходимо отметить, что это прием использования языковых элементов, которые необычны или неожиданны для целевой аудитории, он способствует привлечению внимания к рекламному сообщению и усилению его эффекта. Эта техника может включать в себя использование игры слов, каламбуров, неожиданных образов, иностранных слов и т. д. Например, рекламная кампания Volkswagen в США использовала иностранное слово *fahrgenügen* (удовольствие от вождения) в качестве своего слогана. Этот слоган был использован для уникальности и эффективности, поскольку был необычным и малопонятным для американской аудитории. Однако после объяснения значения слова оно стало популярным и даже вошло в американский словарь. Рекламная кампания Old Spice в США использовала забавный и неожиданный подход к созданию своего слогана «*Smell like a man, man*» (пахните как мужчина, мужчина). Этот слоган был ярким и запоминающимся благодаря своей необычности и игре слов.

В целом лингвистический шок – это эффективный способ привлечения внимания к рекламному сообщению, он делает его более запоминающимся для целевой аудитории. Однако при использовании этого приема необходимо учитывать, что слишком сложные или непонятные языковые элементы могут оттолкнуть потенциальных клиентов, поэтому необходимо уделять внимание правильному подбору языковых элементов в зависимости от целевой аудитории.

Заключение

Таким образом, слоган играет ключевую роль в рекламе по нескольким причинам:

- захватывает внимание: хороший слоган привлекает внимание аудитории и выделяет рекламируемый продукт или услугу среди конкурентов. Он может быть запоминающимся, остроумным или эмоционально воздействующим;
- концентрирует основные идеи: слоган часто включает в себя основные преимущества продукта или его ценностные характеристики. Он помогает передать ключевые сообщения целевой аудитории в краткой и запоминающейся форме;
- строит бренд: хороший слоган укрепляет имидж бренда, его узнаваемость и идентичность. Он может быть частью долгосрочной стратегии по формированию уникального позиционирования бренда на рынке;
- усиливает эмоциональное воздействие: слоган может вызывать эмоции у потребителей, делая рекламу более привлекательной. Эмоциональное воздействие часто позволяет установить более сильные связи между брендом и его потребителями;
- помогает в запоминании: оригинальный слоган может оставаться в памяти аудитории на долгое время, что способствует узнаваемости бренда и повышению вероятности покупки его продукции в будущем.

В целом слоган является мощным инструментом в рекламной стратегии: он помогает сформировать уникальный образ бренда и привлечь внимание целевой аудитории, если четко соответствует поставленной задаче. Слоган должен быть кратким, легко запоминающимся, понятным и близким целевой аудитории. К лингвистическим инструментам, которые могут быть использованы для повышения эффективности слогана, мы можем отнести ритм, рифму и метафорические образы. Использование стратегии лингвистического шока усиливает эффект запоминания. В заключение отметим, что следование данным правилам позволит навязать свое видение продукта потребителю информации и повысить экономическую эффективность рекламной кампании.

Список цитированных источников

1. Типы массовой коммуникации. – URL: https://studref.com/362167/marketing/typy_massovoy_kommunikatsii (дата обращения: 24.01.2023).
2. Солодовникова, Т. В. Рекламная коммуникация Беларуси и Франции / Т. В. Солодовникова. – Минск : БГУ, 2022. – 299 с.
3. Калачева, И. И. Новые возможности рекламной коммуникации в продвижении семейных ценностей: опыт социальной рекламы / И. И. Калачева // Социальная и социально-педагогическая помощь семье: опыт, проблемы, перспективы : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16 марта 2017 г. / Белорус, гос. пед. ун-т им. М. Танка ; отв. ред. В. В. Мартынова. – Минск, 2017. – С. 225–228.

4. Калачева, И. И. Социальная реклама как коммуникационный инструмент в продвижении ценностей белорусского общества / И. И. Калачева // Теория и методы исследований коммуникации: сб. науч. тр. / редкол.: Т. В. Купчинова (гл. ред.) [и др.]; под общ. ред. Н. А. Елсуковой. – Минск : БГУ, 2018. – Вып. 4: Социальные риски в коммуникационном пространстве современного общества. – С. 30–40.
5. Казими́рова, О. В. Коммуникативные аспекты медийного дискурса / О. В. Казими́рова. – Витебск : ВГУ им. П. М. Машерова, 2018. – 188 с.
6. Еромейчик, Т. В. Лингвистические средства реализации директивного намерения в рекламной коммуникации Беларуси / Т. В. Еромейчик // Коммуникативное пространство Беларуси: тезисы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25–26 окт. 2018 г. / Мин. гос. лингвист. ун-т; редкол.: Т. В. Поплавская [и др.]. – Минск, 2018. – С. 37–39.
7. Зачем компании слоган и как придумать свой. – URL: <https://skorozvon.ru/articles/chto-takoe-slogan#:~:text=Слоган%20—%20неотъемлемый%20элемент%20любой%20маркетинговой,что%20она%20из%20себя%20представляет> (дата обращения: 14.01.2025).
8. A Diamond is Forever. – URL: <https://www.diamondsourceva.com/education/diamondindustry/diamonds-diamond-is-forever.asp#:~:text=De%20Beers%20needed%20a%20slogan,young%20lovers%20on%20a%20honeymoon> (дата обращения: 15.01.2025).
9. Как разработать рекламный слоган. – URL: <https://allretail.ua/ru/news/23769-kak-razrabotat-reklamnyy-slogan> (дата обращения: 13.03.2023).
10. 02: Nike (1987) – Just Do It. – URL: <https://www.creativereview.co.uk/just-do-it-slogan> (дата обращения: 12.01.2023).
11. Яндекс. История появления и развитие за многие годы. – URL: <https://staroetv.su/articles/yandeks-istoriya-poyavleniya-i-razvitiye-zamnoгие-gody> (дата обращения: 24.05.2024).
12. Слоганы известных автопроизводителей. – URL: https://vk.com/@sprint_auto-slogany-izvestnyh-avtoproizvoditelei (дата обращения: 24.01.2022).
13. It's a Sony. – URL: <https://goodlogo.com/extended.info/its-a-sony-logo-2763> (дата обращения: 14.01.2025).
14. Explore Intel's history. – URL: <https://timeline.intel.com> (дата обращения: 14.01.2025).
15. Резько, П. Н. Использование лингвистических инструментов для продвижения товаров и услуг / П. Н. Резько // Вестник Брестского государственного технического университета. – № 2 (134). – 2024. – С. 171–173. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-171-173.
16. Мачушенко, Т. С. Метафора в рекламных текстах / Т. С. Мачушенко // Молодой учёный. – 2017. – № 12 (146) – С. 633–635.
17. Резько, П. Н. Метафорический рекламный текст как объект исследования в психолингвистике / П. Н. Резько // Актуальные вопросы германской филологии и лингводидактики : материалы XXVII Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 3 марта 2023 г. / Брест. гос. ун-т имени А. С. Пушкина; под общ. ред. Е. Г. Сальниковой. – Брест : БрГУ имени А. С. Пушкина, 2023. – Ч. 1. – С. 73–75.
18. Метафоры в маркетинге: как скрытые образы и символы формируют восприятие бренда. – URL: <https://gusarov-group.by/metafor-y-v-marketinge-kak-skrytye-obrazy-i-simvol-y-formiruyut-vo-spriyatie-brenda> (дата обращения: 13.03.2023).
19. Белянин, В. П. Лингвистический шок / В. П. Белянин // *Rusística Española* : научный журнал по проблемам русского языка и литературы. – 1995. – № 5. – URL: http://individual.utoronto.ca/psyling/library/pl/ling_shock.htm (дата обращения: 12.04.2024).
20. Резько, П. Н. Особенности лингвистического шока русскоговорящей личности / П. Н. Резько // Лингвокультурное образование в системе вузовской подготовки специалистов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 19–20 марта 2009 г. / Брест. гос. ун-т. – Брест : БрГУ, 2009. – С. 86–89.
21. Neal, J. W. The Peculiarities of Geography : Latin America / J. W. Neal // *ANNALS of the American Academy of Political and Social Science*. – 1961. – Vol. 335 (1). – P. 81–88.
22. Kalacheva, I. I. Novye vozmozhnosti reklamnoj kommunikacii v prodvizhenii semejnyh cennostej: opyt social'noj reklamy / I. I. Kalacheva // *Social'naya i social'no-pedagogicheskaya pomoshch' seme': opyt, problemy, perspektivy: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*, Minsk, 16 marta 2017 g. / Belorus, gos. ped. un-t im. M. Tanka; otv. red. V. V. Martynova. – Minsk, 2017. – S. 225–228.
23. Kalacheva, I. I. Social'naya reklama kak kommunikacionnyj instrument v prodvizhenii cennostej belorusskogo obshchestva / I. I. Kalacheva // *Teoriya i metody issledovaniy kommunikacii: sb. nauch. tr. / redkol.: T. V. Kupchinova (gl. red.) [i dr.]; pod obshch. red. N. A. Elsukeyovj.* – Minsk : BGU, 2018. – Vyp. 4: Social'nye riski v kommunikacionnom prostranstve sovremennogo obshchestva. – S. 30–40.
24. Kazimirova, O. V. Kommunikativnye aspekty medijnogo diskursa / O. V. Kazimirova. – Vitebsk : VGU im. P. M. Masheroval, 2018. – 188 s.
25. Eromejchik, T. V. Lingvisticheskie sredstva realizacii direktivnogo namereniya v reklamnoj kommunikacii Belarusi / T. V. Eromejchik // *Kommunikativnoe prostranstvo Belarusi: tezisy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*, Minsk, 25–26 okt. 2018 g. / Min. gos. lingvist. un-t; redkol.: T. V. Poplavskeya [i dr.]. – Minsk, 2018. – S. 37–39.
26. Zachem kompanii slogan i kak pridumat' svoj. – URL: <https://skorozvon.ru/articles/chto-takoe-slogan#:~:text=Slogan%20—%20neot%20emlennyj%20element%20lyuboj%20marketingovoj,что%20она%20из%20себя%20представляет> (дата обращения: 14.01.2025).
27. A Diamond is Forever. – URL: <https://www.diamondsourceva.com/education/diamondindustry/diamonds-diamond-is-forever.asp#:~:text=De%20Beers%20needed%20a%20slogan,young%20lovers%20on%20a%20honeymoon> (дата обращения: 15.01.2025).
28. Kak razrabotat' reklamnyj slogan. – URL: <https://allretail.ua/ru/news/23769-kak-razrabotat-reklamnyy-slogan> (дата обращения: 13.03.2023).
29. 02: Nike (1987) – Just Do It. – URL: <https://www.creativereview.co.uk/just-do-it-slogan> (дата обращения: 12.01.2023).
30. YAndeks. Istoriya po-yavleniya i razvitiye za mnogie gody. – URL: <https://staroetv.su/articles/yandeks-istoriya-poyavleniya-i-razvitiye-zamnogie-gody> (дата обращения: 24.05.2024).
31. Slogany izvestnyh avtoproizvoditelej. – URL: https://vk.com/@sprint_auto-slogany-izvestnyh-avtoproizvoditelei (дата обращения: 24.01.2022).
32. It's a Sony. – URL: <https://goodlogo.com/extended.info/its-a-sony-logo-2763> (дата обращения: 14.01.2025).
33. Explore Intel's history. – URL: <https://timeline.intel.com> (дата обращения: 14.01.2025).
34. Rez'ko, P. N. Ispolzovanie lingvisticheskikh instrumentov dlya prodvizheniya tovarov i uslug / P. N. Rez'ko // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. – № 2 (134). – 2024. – S. 171–173. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-171-173.
35. Machushenko, T. S. Metafora v reklamnyh tekstah / T. S. Machushenko // *Molodoy uchyoniy*. – 2017. – № 12 (146) – S. 633–635.
36. Rez'ko, P. N. Metaforicheskiy reklamnyy tekst kak ob'ekt issledovaniya v psiholingvistike / P. N. Rez'ko // *Aktual'nye voprosy germanskoy filologii i lingvodidaktiki : materialy XXVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*, Brest, 3 marta 2023 g. / Brest. gos. un-t imeni A. S. Pushkina; pod obshch. red. E. G. Sal'nikovoj. – Brest : BrGU imeni A. S. Pushkina, 2023. – CH. 1. – S. 73–75.
37. Metafor-y v marketinge: kak skrytye obrazy i simvol-y formiruyut vo-spriyatie brenda. – URL: <https://gusarov-group.by/metafor-y-v-marketinge-kak-skrytye-obrazy-i-simvol-y-formiruyut-vo-spriyatie-brenda> (дата обращения: 13.03.2023).
38. Belyanin, V. P. Lingvisticheskij shok / V. P. Belyanin // *Rusística Española* : nauchnyj zhurnal po problemam russkogo yazyka i literatury. – 1995. – № 5. – URL: http://individual.utoronto.ca/psyling/library/pl/ling_shock.htm (дата обращения: 12.04.2024).
39. Rez'ko, P. N. Osobennosti lingvisticheskogo shoka russkogovoryashchej lichnosti / P. N. Rez'ko // *Lingvokul'turnoe obrazovanie v sisteme vuzovskoy podgotovki specialistov : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*, Brest, 19–20 marta 2009 g. / Brest. gos. un-t. – Brest : BrGU, 2009. – S. 86–89.
40. Neal, J. W. The Peculiarities of Geography : Latin America / J. W. Neal // *ANNALS of the American Academy of Political and Social Science*. – 1961. – Vol. 335 (1). – P. 81–88.

References

1. Tipy massovoy kommunikacii. – URL: https://studref.com/362167/marketing/typy_massovoy_kommunikatsii (дата обращения: 24.01.2023).
2. Solodovnikova, T. V. Reklamnaya kommunikaciya Belarusi i Francii / T. V. Solodovnikova. – Minsk : BGU, 2022. – 299 s.

Материал поступил 17.02.2025, одобрен 10.04.2025, принят к публикации 10.04.2025

ЮБИЛЯРЫ



ВОЛЧЕК АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

(к 70-летию со дня рождения)

Волчек Александр Александрович родился 17 мая 1955 года в деревне Сачковичи Пинского района в семье служащих. В 1972 г. окончил СШ № 5 г. Кобрина. С 1972 по 1973 гг. работал слесарем на Кобринском льнозаводе. В 1973 году поступил на гидромелиоративный факультет Брестского инженерно-строительного института, который с отличием закончил в 1978 году, получил квалификацию инженера-гидротехника и направление в Еремичское СМУ Кобринского района на должность мастера участка. После службы в Советской Армии работал заведующим лабораторией на кафедре сельскохозяйственных мелиораций Брестского инженерно-строительного института. В период с 1984 по 1987 гг. обучался в аспирантуре Центрального научно-исследовательского института комплексного использования водных ресурсов (г. Минск), где в лаборатории водохозяйственных балансов

подготовил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование пространственно-временных колебаний элементов водного баланса (на примере Белоруссии)» на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности 11.00.07 Гидрология суши, водные ресурсы, которую в 1988 году защитил в Институте водных проблем Академии наук СССР (г. Москва). После окончания аспирантуры работал на кафедре сельскохозяйственных гидротехнических мелиораций в должностях ассистента, а затем доцента, в 1991 г. присвоено ученое звание доцента. С 2000 года приглашен на должность заместителя директора по научной работе отдела проблем Полесья НАН Беларуси в г. Бресте.

В 2006 году 24 марта в специализированном совете при Институте географии Российской академии наук (г. Москва) Александр Александрович защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора географических наук на тему «Закономерности формирования элементов водного баланса речных водосборов Беларуси в современных условиях». ВАК Российской Федерации 13 октября 2006 г. присудил Александру Александровичу ученую степень доктора географических наук по специальности 25.00.27 Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия, а 14 марта 2007 г. ВАК Республики Беларусь нострифицировал ученую степень. Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 30 апреля 2008 года Александру Александровичу присвоено ученое звание «профессор» по специальности «География».

С 2007 по 2010 гг. Александр Александрович являлся научным руководителем региональной программы «Машины, механизмы и сервис». Принял участие в работе Первого и Второго съездов ученых Республики Беларусь. По итогам республиканского конкурса Александр Александрович был удостоен персональной надбавки на 2011 г. за выдающийся вклад в социально-экономическое развитие страны (Распоряжение Президента Республики Беларусь от 25.01.2011 г. № 30рп). В 2019 году получен грант Президента Республики Беларусь на 2020 год (распоряжение Президента Республики Беларусь от 31 декабря 2019 г. № 261рп «О предоставлении грантов Президента Республики Беларусь на 2020 год» для подготовки пяти учебных пособий для студентов водного хозяйства и охраны окружающей среды).

За отличные достижения в профессиональной деятельности, значительный личный вклад в развитие и умножение духовного и интеллектуального потенциала, культурного наследия белорусского народа Указом Президента Республики Беларусь от 24 июня 2016 года Александр Александрович награжден медалью Франциска Скорины, 2021 году – юбилейной медалью «За заслуги в мелиорации земель». В 2022 году награжден медалью «Знак пашаны» № 3 Брестского государственного технического университета. В 2007 году совместно с академиком Логиновым В. Ф. Александр Александрович Волчек стал лауреатом премии

Национальной академии наук 2007 года за цикл работ «Исследование гидрологического и климатического режимов территории Беларуси: современное состояние, изменения и прогноз».

В 2012 г. Александр Александрович был награжден грамотой, а в 2020 г. Почетной грамотой Министерства Образования Республики Беларусь за значительный личный вклад в развитие науки, инновационной деятельности и в связи с Днем белорусской науки. 24 декабря 2015 г. Александру Александровичу присуждено звание Почетного доктора УО «Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина» (протокол № 5 от 24.12.2015 г.). В 2019 году за значительный вклад в дело охраны окружающей среды, обеспечение рационального использования природных ресурсов Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь Александр Александрович Волчек награжден Почетной грамотой. За многолетнюю плодотворную научно-педагогическую деятельность, достигнутые успехи в подготовке высококвалифицированных специалистов в 2020 году Александр Александрович награжден Почетной грамотой Министерства образования Республики Беларусь, в 2021 году – Почетной грамотой Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Почетной грамотой редакции журнала «Мелиорация и водное хозяйство» (г. Москва) за многолетний труд в развитии мелиорации в Республике Беларусь и подготовку кадров. В 2025 году за вклад в развитие географии Александр Александрович Волчек награжден Юбилейной памятной медалью имени Игната Домейко.

В марте 2009 году Александр Александрович был приглашен в Брестский государственный технический университет на должность декана факультета водоснабжения и гидромелиорации, с 2014 года – факультет инженерных систем и экологии. С 2009 года является членом Научно-методического совета по специальностям природообустройства и строительства УМО вузов Республики Беларусь по образованию в области сельского хозяйства.

Научные интересы касаются инженерной гидрологии, водного хозяйства, охраны окружающей среды. Автор более 1300 научных работ, в т. ч. 52 монографии, 26 учебных пособий, 3 пособий различных министерств и ведомств, 28 изобретений и полезных моделей.

Александр Александрович активно участвует в научной жизни республики, принимает участие в научных конференциях, где выступает с докладами, регулярно печатает свои работы в центральных республиканских и зарубежных изданиях. Является ответственным редактором раздела «Геоэкология» Вестника БрГТУ. В разное время Александр Александрович Волчек являлся членом редколлегии ряда отечественных и зарубежных изданий (сборника научных трудов Института природопользования НАН Беларуси, Полесского аграрно-экологического института НАН Беларуси, Полесского государственного университета, Брестского государственного университета им. А. С. Пушкина «Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі», научно-технического журнала «Гидрометеорология и экология» РГП «Казгидромет» Министерства энергетики Республики Казахстан, сборника научных трудов Института водного хозяйства им. Ц. Е. Мирцхулава Грузинского технического университета министерство образования и науки Грузии, научного сборника «Гидрология, гидрохимия, гидроэкология» и журнала «Землеустройство, кадастр и мониторинг земель» Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, сборника научных трудов «Беловежская пуца. Исследования», журнала «Географія», «Вестника Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки», докладов Национальной академии наук Беларуси и др.

Александр Александрович ведет большую работу по подготовке кадров на различных уровнях. Читает лекции студентам в университетах г. Бреста, руководит аспирантами и соискателями по подготовке кандидатских диссертаций, помогает молодым специалистам, работающим в университете. Под его руководством подготовлено и защищено 26 магистерских и 9 кандидатских диссертаций. Им создана научно-педагогическая школа «Брестская гидрологическая школа», за создание которой в 2023 г. (сертификат №01400 протокол № 1125 от 12 июля 2023 г.) Российской академией естествознания профессору Александру Александровичу Волчеку присвоено почетное звание «основатель научной школы». В результате своей деятельности она обеспечивает участие молодых ученых и студентов в государственных научных программах, НИР, НИРС, их подготовку к проводимым на республиканском и международном уровнях конкурсам и олимпиадам, защита диссертаций. Четверо воспитанников школы удостоены стипендии Президента Республики Беларусь во время обучения в аспирантуре.

В 2021 году коллектив факультета инженерных систем и экологии, возглавляемый профессором Александром Александровичем Волчеком, награжден Юбилейной медалью А. Н. Костякова – основоположника мелиоративной науки России – в знак признания заслуг в развитии водохозяйственной и мелиоративной

науки и в связи с 50-летием факультета. С 2007 года Александр Александрович является членом Ученого совета по защите диссертаций К 01.23.01 при ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси», а с 2022 года и совета по защите диссертаций Д 25.03.03 при Белорусском государственном университете. С 2006 г. Александр Александрович является членом Научно-технического совета ГПУ «Национальный парк «Беловежская пуца», с 2010 г. является членом секции по вопросам окружающей среды и природопользования Научно-консультативного совета Парламентского Собрания Союза Беларуси и России, а с 2012 г. входит в состав Межведомственной комиссии по вопросам государственной водохозяйственной политики при Совете Министров Республики Беларусь и является заместителем председателя, экспертом Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, независимым экспертом АО «Национальное агентство по технологическому развитию» Республики Казахстан, членом Совета по проблемам Полесья.

Александр Александрович ведет большую общественную работу. Будучи мастером спорта по шашкам и судьей по спорту национальной категории, он пропагандирует здоровый образ жизни, активно участвует в спортивной жизни области (многократный чемпион Брестской области по русским и международным шашкам, участник чемпионата мира по русским шашкам 1992 г.), помогает в организации спортивных соревнований.

Коллектив работников университета, редакционная коллегия журнала «Вестник БрГТУ» сердечно поздравляют юбиляра и желают счастья, отличного здоровья, оптимизма и творческих успехов.



БАСОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

(к 55-летию со дня рождения)

Родился 15 мая 1970 года в г. Бресте в семье служащих – преподавателей БИСИ – Нины Степановны и Владимира Петровича Басовых. В 1987 г. с серебряной медалью окончил среднюю школу № 13 г. Бреста. В этом же году поступил на дневное отделение химико-технологического факультета Ленинградского института киноинженеров (ЛИКИ). В 1988 году был призван в ряды Советской Армии. По окончании службы восстановился в ЛИКИ, который впоследствии был переименован в Санкт-Петербургский институт кино и телевидения (СПИКиТ). В 1993 г. закончил обучение в СПИКиТ по специальности «Химическая технология кинофотоматериалов и магнитных носителей» и поступил в очную аспирантуру этого же института.

С 01.09.1995 г. одновременно с обучением в аспирантуре работал по совместительству в должности инженера, а с 03.01.1997 г. – ассистента кафедры технологии производства кинофотоматериалов СПИКиТ, а также с 1994 по 1997 гг. в должностях инструктора и ответственного секретаря Санкт-Петербургской федерации Ашихара Будокай каратэ. Закончил аспирантуру в 1996 г. по специальности 05.17.13 Технология кинофотоматериалов и магнитных носителей, подготовил диссертацию на тему «Топография активных центров на поверхности желатиновых слоев для кинофотоматериалов» по специальности 05.17.13 Технология кинофотоматериалов и магнитных носителей. Ученая степень кандидата технических наук присуждена 02 октября 1997 г. по результатам защиты диссертации в Совете по защите диссертаций Д.035.01.01 СПИКиТ. С 01.09.1997 г. принят на должность программиста, а с 01.09.1998 г. переведен на должность ассистента кафедры фотографии и технологии обработки кинофотоматериалов СПИКиТ.

В 1999 г. избран на должность старшего преподавателя кафедры фотографии и технологии обработки кинофотоматериалов Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения (СПбГУКиТ). Работая на кафедре, проводил научные исследования, связанные с технологией носителей информации в виде изображений, технической репродукцией, регенерацией и очисткой отработанных химико-фотографических растворов, цифровой фотографией. Разработал и опубликовал первое на постсоветском пространстве учебное пособие по курсу «Цифровая фотография».

С 01.09. 2000 г. и по настоящее время работает в Брестском государственном техническом университете (БрГТУ) на кафедре инженерной экологии и химии. С 2001 по 2005 гг. – в должности доцента, а с 26.11.2005 г. по 01.12.2015 г. – в должности заведующего кафедрой инженерной экологии и химии как избранный по конкурсу. С 01.12.2015 г. снова в должности доцента кафедры инженерной экологии и химии.

Диплом кандидата технических наук нострифицирован постановлением ВАК Республики Беларусь от 25 июня 2003 г. № 23. Ученое звание доцент по специальности «Химия» присвоено в 2003 г.

За время работы в университете входил в состав оргкомитетов различных научно-технических конференций: «Проблемы водоснабжения, водоотведения и энергосбережения в западном регионе Республики Беларусь», «Архитектурное наследие Прибужского региона, сохранение и культурно-туристическое использование», «Методика преподавания химических и экологических дисциплин», «Менделеевские чтения», «Великая Европейская война», «Реставрация историко-культурных объектов в Брестской области как сохранение культурного наследия Республики Беларусь» и др.

Проводил научные исследования по темам: «Ресурсосберегающие химические материалы и технологии и химия окружающей среды», «Охрана и культурно-туристское использование историко-архитектурного наследия Западного Полесья», «Оценка пространственно-временных колебаний экологического состояния и гидрохимического режима рек Прибужского Полесья», «Физико-химическое материаловедение недвижимых объектов историко-культурного наследия Республики Беларусь», «Комплексное изучение последствий коррозионных процессов материалов и покрытий фасадов и интерьеров недвижимых объектов историко-культурного наследия». Активно принимает участие в выполнении различных Х/Д НИОКР.

Опубликовал более 150 научных и учебно-методических работ. Сфера научных интересов: реставрация и использование историко-культурных ценностей, химическая технология носителей информации в виде изображений, прикладная электрохимия, методика преподавания химических и экологических дисциплин, экология и гидрохимия.

Входит в состав научно-технического Совета БрГТУ. Ежегодно в рамках «Недели науки» принимает участие в организации и проведении на кафедре студенческих олимпиад и научно-технических конференций по дисциплинам химического и экологического профиля. Ежегодно является научным руководителем не менее 5–7 студенческих научных работ.

Проводит все виды воспитательной, общественной и идеологической работы. Являлся членом Совета университета, факультета ИСиЭ, входил в состав постоянно действующей экспертной комиссии учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

С 2007 г. является членом межведомственного координационного Советов Брестского облисполкома и Брестского районного исполнительного комитета по охране историко-культурного наследия как представитель БрГТУ и президиума Брестского областного отделения ОО «Белорусское добровольное общество охраны памятников истории и культуры» (Распоряжение Брестского ОИК № 63-р от 28 апреля 2015 г.).

С 2022 года является сертифицированным международным инструктором и официальным представителем Международной организации Ашихара-каратэ (IAKA) в Республике Беларусь. Регулярно проводит занятия и организует учебно-тренировочные семинары «Теория и практика эффективной самообороны в Ашихара-каратэ» на базе спортклуба БрГТУ для членов МООП «Алмаз» и «Мужество» и других студентов БрГТУ.

Коллектив работников университета, редакционная коллегия журнала «Вестник БрГТУ» сердечно поздравляют юбиляра и желают счастья, отличного здоровья, оптимизма и творческих успехов.

ВЕСТНИК БРЕСТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ (СТРОИТЕЛЬСТВО, МАШИНОСТРОЕНИЕ, ГЕОЭКОЛОГИЯ);
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ
№ 2 (137). 2025 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор	Баханович А. Г.
Зам. главного редактора	Шалобыта Н. Н.
Ответственный секретарь	Ковальчук Е. Н.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ответственный редактор по разделу «Строительство»	Тур В. В.
Зам. ответственного редактора по разделу «Строительство»	Павлова И. П.
Ответственный редактор по разделу «Машиностроение»	Онысько С. Р.
Зам. ответственного редактора по разделу «Машиностроение»	Парфиевич А. Н.
Ответственный редактор по разделу «Геоэкология»	Волчек А. А.
Зам. ответственного редактора по разделу «Геоэкология»	Мешик О. П.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ответственный редактор по разделу «Экономика»	Касперович С. А.
Зам. ответственного редактора по разделу «Экономика»	Зазерская В. В.
Технический редактор Дизайн Корректор	Ковальчук Е. Н. Якимук К. С. Дударук С. А.

Лицензионный № в ERL: 38200000065722 от 27.03.2014 г.
Подписано в печать 08.09.2025 г. Формат 60×84 ¹/₈. Бумага
«Performer». Гарнитура «Arial». Уч.-изд. л. 29,75. Усл. печ. л. 27,67.
Заказ № 718. 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>

