



ISSN 1818-1112

№ 2(140)

Научно-практический журнал
Scientific and practical journal

ВЕСТНИК

Брестского государственного
технического университета



VESTNIK

of Brest State
Technical University

WWW.BSTU.BY

DOI 10.36773/1818-1112-2026-140-2

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

ТУР ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов БрГТУ

Заместитель главного редактора

ШАЛОБЫТА НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ

канд. техн. наук, доцент, проректор по научной работе БрГТУ

Ответственный секретарь

КОВАЛЬЧУК ЕКАТЕРИНА НИКОЛАЕВНА

специалист БрГТУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Раздел «Строительство»

д-р техн. наук, доцент НАЙЧУК АНАТОЛИЙ ЯКОВЛЕВИЧ (ответственный редактор)

канд. техн. наук, доцент ПАВЛОВА ИНЕССА ПАВЛОВНА (зам. ответственного редактора)

д-р техн. наук, профессор ПОЙТА ПЕТР СТЕПАНОВИЧ

д-р техн. наук, профессор БАТЯНОВСКИЙ ЭДУАРД ИВАНОВИЧ

академик РААСН, д-р техн. наук, профессор КОЛЧУНОВ ВИТАЛИЙ ИВАНОВИЧ

чл.-корр. БАЦМАА, д-р арх., профессор МОРОЗОВА ЕЛЕНА БОРИСОВНА

д-р техн. наук, профессор ЛАЗОВСКИЙ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

д-р техн. наук, профессор ЧЕРНЫХ АЛЕКСАНДР ГРИГОРЬЕВИЧ

канд. техн. наук, доцент ЮНЬ СЮЙ

Раздел «Машиностроение»

канд. техн. наук, доцент ПАРФИЕВИЧ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ (ответственный редактор)

канд. техн. наук, доцент ОНЫСЬКО СЕРГЕЙ РОМАНОВИЧ (зам. ответственного редактора)

д-р техн. наук, профессор ДЕВОЙНО ОЛЕГ ГЕОРГИЕВИЧ

д-р техн. наук, профессор ПОБОЛЬ ИГОРЬ ЛЕОНИДОВИЧ

академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор ВИТЯЗЬ ПЕТР АЛЕКСАНДРОВИЧ

чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор ШЕЛЕГ ВАЛЕРИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ

канд. техн. наук, доцент ЕСИПЧУК АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

канд. физ.-мат. наук, доцент ДЖУМАЕВ АГАНИЯЗ ЯГШИЕВИЧ

Раздел «Геоэкология»

д-р геог. наук, профессор ВОЛЧЕК АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ (ответственный редактор)

канд. техн. наук, доцент МЕШИК ОЛЕГ ПАВЛОВИЧ (зам. ответственного редактора)

чл.-корр. НАН Беларуси, д-р геол.-минерал. наук, профессор БОГДАСАРОВ МАКСИМ АЛЬБЕРТОВИЧ

академик НАН Грузии, д-р техн. наук, профессор ГАВАРДАШВИЛИ ГИВИ ВАЛЕРИАНОВИЧ

чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор ЛИХАЦЕВИЧ АНАТОЛИЙ ПАВЛОВИЧ

академик НАН Беларуси, д-р геог. наук, профессор ЛОГИНОВ ВЛАДИМИР ФЁДОРОВИЧ

д-р с.-х. наук, профессор МАЖАЙСКИЙ ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

канд. экон. наук, доцент ЗАЗЕРСКАЯ ВИКТОРИЯ ВАСИЛЬЕВНА (ответственный редактор)

канд. техн. наук, доцент ПРОРОВСКИЙ АНДРЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ (зам. ответственного редактора)

д-р экон. наук, профессор ГАИБНАЗАРОВА ЗУМРАТ ТАЛАТОВНА

д-р экон. наук, профессор БЕЛЯЦКАЯ ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА

д-р экон. наук, профессор ПСАРЕВА НАДЕЖДА ЮРЬЕВНА

д-р экон. наук, профессор ХАЦКЕВИЧ ГЕННАДИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

д-р экон. наук, профессор ТАРАСЕНКО АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

Регистрационный № 144

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

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

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



ВЕСТНИК

Брестского государственного
технического университета

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

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

2(140)'2026

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТРОИТЕЛЬСТВО

ЗАБЕЛА Р. А. Будынак беларускай геафізічнай абсерваторыі ў Мінску: метадалагічныя праблемы рэстаўрацыі і рэканструкцыі архітэктурнага аблічча**3**

ИВАШЕЧКИН В. В., АРТЁМЧИК А. А., ЖИТКО А. В. Гидравлический расчет параметров промывного потока при свабировании водозаборных скважин**9**

КРИВИЦКИЙ П. В., НЕВДАХ А. А. Экспериментально-теоретические исследования сопротивления срезу железобетонных балок из керамзитобетона с поперечным армированием**15**

ЛАЗОВСКИЙ Д. Н., ГЛУХОВ Д. О. Учет продольных сдвиговых деформаций в расчете прогибов и сопротивления железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели**23**

МАТЯС П. И., ДЕРКАЧ В. Н. Прочность исторического керамического кирпича при сжатии под различными углами к опорной поверхности**29**

ОЛЁХ А. Г. Анализ распределения снеговых нагрузок на поверхности куба и образования снежных заносов вокруг куба**35**

ПОТАПОВИЧ Ю. В. Оценка тепловых потерь в современном многоквартирном жилом доме с тёплым чердаком**46**

ТУР А. В. Допущения метода энергетического балланса и связанные с ними ошибки при определении динамических реакций конструктивных систем**51**

ШАЛОБЫТА Н. Н., ПОЙТА П. С., ТУР В. В., ШАЛОБЫТА Т. П. Обеспечение требований надежности оснований фундаментов в условиях неопределенности геотехнических параметров**66**

МАШИНОСТРОЕНИЕ

КОТОВ А. В., КРОЛЬ Д. Г. Метод обратного кинематического синтеза плоского рычажного механизма**78**

ОВЧИННИКОВ Е. В., ЧЕКАН Н. М., АКУЛА И. П., ВЕРЕМЕЙЧИК А. И., ОВЧИННИКОВ А. Е., ЭЙСЫМОНТ Е. И. Влияние состава гибридных вакуумных покрытий AlTiN на эксплуатационные характеристики быстрорежущих сталей**84**

ХОЛОДАРИ Б. Г. Особенности колебаний одномассовой системы в зависимости от вида реологической связи**91**

ГЕОЭКОЛОГИЯ

АНУФРИЕВ В. Н., КОРНЕЕВ В. Н., ВОЛКОВА Г. А. Оценка изменения максимальной интенсивности выпадения осадков в Беларуси с предложениями по ее учету при расчетах и проектировании систем дождевой канализации**98**

ВОЛЧЕК А. А., НАУМЧИК Г. О., БЕЛОВ В. С. Применение озонирования и безнапорной фильтрации для удаления железа и марганца из подземных вод**104**

ВОЛЧЕК А. А., НАУМЧИК Г. О., БЕЛОВ В. С. Определение эффективности получения мелких газовых пузырьков с помощью пневмогидравлического диспергатора**109**

ВОЛЧЕК А. А., СИДАК С. В., ПАРФОМУК С. И., МЕШИК О. П., КОЛЯДА Ю. П., БОРУШКО М. В., ПРОТАСЕВИЧ А. С. Математическое моделирование гидрографа речного стока**115**

ВОЛЧЕК А. А., УСС Н. В. Интерактивная карта водных объектов Беларуси: концепция и реализация**121**

МОРЗАК Г. И., СЫРНИКОВА К. А., ЛЮДЧИК А. Н. Техническое решение по снижению воздействия на атмосферный воздух гальванического производства**130**

ШТЕПА В. Н., ТАБЕРКО В. В., ПРОКОПЕНЯ О. Н., БАКАЛЕНКО В. И., СТЕПАНОВ С. В., ШУНКЕВИЧ Д. В. Концепция мультиагентного подхода к управлению процессами водоочистки молокоперерабатывающих предприятий**137**

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

MAKAREVICH S. V. Resource-utility approach to assessing the effectiveness of land reclamation activities in the Republic of Belarus**144**

MESNIK D. N. Methodology for modeling the gross output of freight transportation in international traffic	КОРОЛЁВА А. А. Понятийно-категориальный аппарат энергетической безопасности: систематизация, классификация и авторский подход
149	189
ВИШНЯКОВ В. А., ПОЛОСКО Е. И. Использование технологии интернета вещей в энергохозяйстве ОАО «Минский автомобильный завод»	МЕСНИК Д. Н. Влияние транспортной наценки на формирование торгового дисбаланса в системе торговли добавленной стоимостью
154	198
ВОРОБЬЕВ Н. Н., ВАСЮКОВА В. А., ЖЕЛУДКОВА Т. В. Гибридная нейросетевая модель оптимизации параметров кондитерского производства на цифровой платформе	МИШКОВА М. П., ЕРМАКОВА Э. Э., ЩИТКОВЕЦ Е. Н. Инновации и кадровая стратегия как фактор конкурентоспособности образовательной организации
159	204
ГАРЧУК И. М., КАЗБЕРОВИЧ А. А. Автоматизация оценки персонала и командной эффективности: цифровой помощник на основе методологии спектра	НОРМИРЗАЕВ А. Р. Разработка модели транспортно-логистической системы Наманганской области
164	210
ДАШКЕВИЧ Т. В. Особенности системы стратегического управления организациями газовой промышленности Брестской области	ШАБЕКА В. Л. Классификация экономических активов Республики Беларусь как основа эффективного управления в период действия внешних ограничительных мер
169	217
ЗАЗЕРСКАЯ В. В. Парадигма регионального развития: концептуальные изменения	ШИШКО Е. Л. Интеллектуализация риск-менеджмента региональных логистических систем: возможности искусственного интеллекта
174	224
КОЛОПЕНЬКО Е. А. Моделирование экономического поведения когнитивных домашних хозяйств с использованием агентно-ориентированного подхода: систематический обзор	ШИШКО Е. Л. Механизм управления рисками в региональных логистических системах
181	229

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК [72.025.4:725+72.03](476-25)

БУДЫНАК БЕЛАРУСКОЙ ГЕАФИЗИЧНОЙ АБСЕРВАТОРИИ В МИНСКУ: МЕТАДАЛАГІЧНЫЯ ПРАБЛЕМЫ РЭСТАЎРАЦЫІ І РЭКАНСТРУКЦЫІ АРХІТЭКТУРНАГА АБЛІЧЧА

Р. А. Забела

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

Рэферат

Артыкул аналізуе найноўшы этап будаўнічай гісторыі будынка Беларускай геафізічнай абсерваторыі ў Мінску, помніка савецкага авангарду, спраектаванага архітэктарам-рацыяналістам І. І. Валодзькам у 1929–1930 гг. У цэнтры даследавання знаходзіцца крытычная ацэнка рэстаўрацыйных рашэнняў, рэалізаваных у канцы XX – пачатку XXI ст., у кантэксце эвалюцыі навуковых уяўленняў пра архітэктурныя вартасці аб'екта, межы дапушчальнай рэканструкцыі і метадалогію працы з помнікамі авангарднай архітэктуры. Мэтай артыкула з'яўляецца фіксацыя і навуковая інтэрпрэтацыя асноўных этапаў аднаўлення будынка, выяўленне метадалагічных праблем і ацэнка вынікаў рэстаўрацыі.

Даследаванне грунтуецца на аналізе архіўных праектных і дакументальных матэрыялаў, іканаграфічных крыніц, вынікаў інжынерна-тэхнічных і натуральных архітэктурных абследаванняў, а таксама на параўнальным аналізе рэстаўрацыйных падыходаў, рэалізаваных у 1997–2007 і 2020–2025 гг. У артыкуле разглядаецца пераход ад утылітарных рамонтных умяшанняў да навукова абгрунтаванай рэстаўрацыі, а таксама змена крытэрыяў ацэнкі гістарычнай і мастацкай вартасці будынка.

У выніку даследавання выяўлены недакладнасці рэстаўрацыйных рашэнняў 1997–2007 гг., абумоўленыя абмежаванасцю даследчай базы і памылковай інтэрпрэтацыяй крыніц. Сфармуляваны метадалагічныя высновы адносна дапушчальнасці рэканструкцыі нерэалізаванага колеравага рашэння І. І. Валодзькі; аднаўлення гістарычнага характару інтэр'ераў; ацэнкі пазнейшых элементаў як складніку будаўнічай гісторыі помніка падчас работ 2020–2025 гг.

Атрыманыя вынікі маюць метадалагічнае значэнне для вывучэння, захавання і рэстаўрацыі архітэктуры савецкага авангарду і могуць быць выкарыстаны ў практыцы аховы архітэктурнай спадчыны міжваеннага перыяду.

Ключавыя словы: архітэктурная рэстаўрацыя, ахова архітэктурнай спадчыны, савецкі авангард, рацыяналізм, канструктыўзм, метадалогія рэстаўрацыі, архітэктурная паліхромія, рэканструкцыя колеравага рашэння.

THE BELARUSIAN GEOPHYSICAL OBSERVATORY BUILDING: METHODOLOGICAL ISSUES IN THE RESTORATION AND RECONSTRUCTION OF ITS ARCHITECTURAL APPEARANCE

R. A. Zabiela

Abstract

This article examines the most recent phase in the architectural history of the Belarusian Geophysical Observatory in Minsk, a notable example of Soviet avant-garde architecture designed by rationalist architect I. Valodzka in 1929–1930. The study focuses on a critical evaluation of restoration interventions carried out in the late 20th and early 21st centuries, situating them within the evolving understanding of the building's architectural significance, the limits of acceptable reconstruction, and the methodologies applied to heritage preservation of avant-garde structures. The main objective is to document and analyze the stages of the building's restoration, identify methodological challenges, and assess the outcomes of recent conservation efforts.

The research is based on the analysis of archival project documentation, historical records, and visual sources, combined with technical and on-site architectural surveys. A comparative approach examines restoration strategies implemented in 1997–2007 and 2020–2025. The article traces the shift from utilitarian maintenance interventions to scientifically grounded restoration, highlighting changes in criteria for evaluating the building's historical and artistic value.

Findings reveal inaccuracies in previous restoration decisions, largely due to limited research data and misinterpretation of sources. The study offers methodological insights regarding the reconstructing the unrealized color scheme by architect I. Valodzka, the restoration of the historical character of interior spaces, and the assessment of later modifications as integral components of the building's construction history.

These results carry broader methodological significance for the study, preservation, and restoration of avant-garde architecture and provide practical guidance for heritage management and conservation practices concerning interwar architectural monuments.

Keywords: architectural conservation, Soviet avant-garde, rationalism, constructivist architecture, heritage values, restoration methodology, architectural polychromy, facade colour reconstruction.

Уводзіны

Будынак Беларускай геафізічнай абсерваторыі ў Мінску з'яўляецца помнікам архітэктуры савецкага авангарду. Яго ўзвядзенне прыпала на перыяд ідэалагічных і эстэтычных змен у савецкай архітэктуры, што непасрэдна адбілася на выніковым абліччы будынка: шэраг архітэктурна-мастацкіх прынцыпаў, закладзеных архітэктарам-рацыяналістам І. І. Валодзькам у праект, застаўся нерэалізаваным у працэсе будаўніцтва.

На працягу свайго існавання аб'ект неаднаразова падвяргаўся рамонтам і перабудовам, якія істотна змянялі яго архітэктурны выгляд і ўспрыманне. Рэстаўрацыйныя работы пачатку 2000-х гг. вярнулі будынку асноўныя архітэктурныя адметнасці пасля працяглага перыяду дэградацыі. Апошні этап рэстаўрацыі, завершаны ў 2025 г., прывёў да істотнай змены звыкллага вобразу помніка, сфармаванага папярэднімі работамі, і быў накіраваны на яго максімальнае набліжэнне да аўтарскай ідэі, якая заставалася неўвасобленай з 1930-х гг.

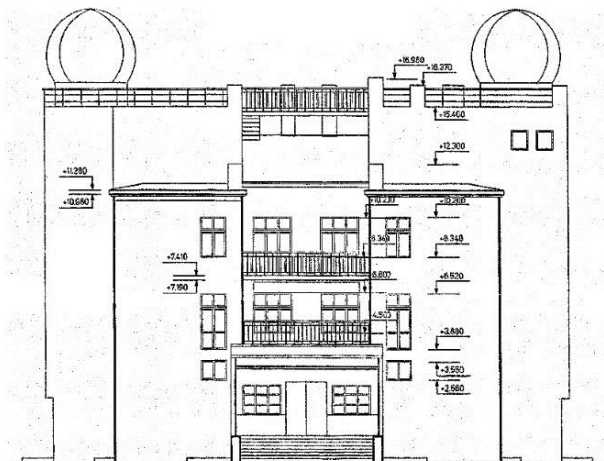
Розніца ў метадалагічных падыходах на розных этапах аднаўлення актуалізуе неабходнасць іх крытычнага аналізу – як з гледзішча навуковай абгрунтаванасці прынятых рашэнняў, так і ў кантэксце эвалюцыі разумення вартасцей помніка.

Мэтай дадзенага артыкула з'яўляецца навуковая ацэнка рэстаўрацыйных мерапрыемстваў у найноўшай гісторыі аб'екта з улікам гістарычнага і прафесійнага кантэксту. Артыкул з'яўляецца працягам комплекснага вывучэння будаўнічай гісторыі абсерваторыі і накіраваны на сістэматызацыю тэарэтычнага і практычнага досведу захавання і інтэрпрэтацыі помніка архітэктуры савецкага авангарду.

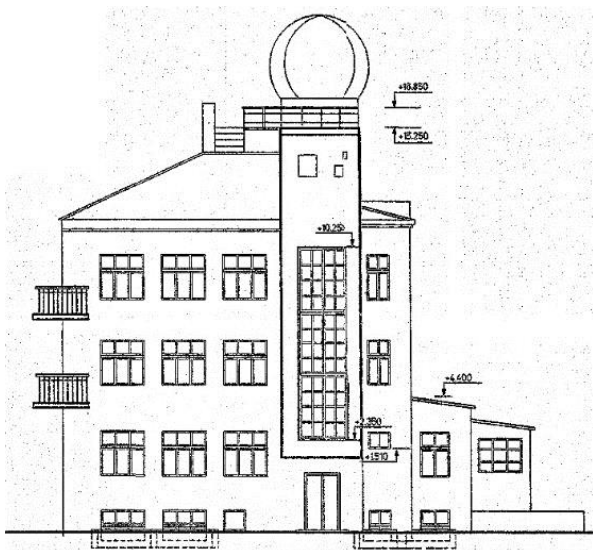
Праект рэканструкцыі 1997–2000 гг.

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

У 1997–2000 гг. специалистами ААТ «Институт «Минскгражданпроект» был разработан проект реконструкции исторического здания [1]. Главным архитектором выступал М. У. Рыбника, главным конструктором – А. В. Бандаренка. На этот момент объект находился в аварийном состоянии, что требовало проведения капитальной реконструкции. Основными задачами проекта было устранение конструктивных проблем и укрепление здания его первоначальной обликом 1930-х годов. Эта была первая комплексная реконструкция объекта с учетом его исторической ценности (малюнок 1, 2).



Малюнок 1 – Абмерны рисунок паўночнага (галоўнага) фасада. 1997 г. [1, AP-1]



Малюнок 2 – Абмерны рисунок заходняга фасада. 1997 г. [1, AP-1]

Сначала проект предусматривал полную демонтаж основного объема здания и возведение новых конструкций, включая капитальное укрепление стен из-за конструктивных недостатков ранее эксплуатируемого здания. Подобные подходы в то время широко использовались при работе с историческими объектами.

Однако на стадии выполнения работ решено было пересмотреть подход к сохранению исторических конструкций: было принято решение о сохранении металлических обшивки и каркаса здания, а также локальных участков других фасадов.

Проект также предусматривал комплекс мер по адаптации исторических административных здания, в том числе демонтаж лишней пристройки, адаптация плоской эксплуатируемой кровли, габаритов помещений, установка балкона, зубчатых завершений

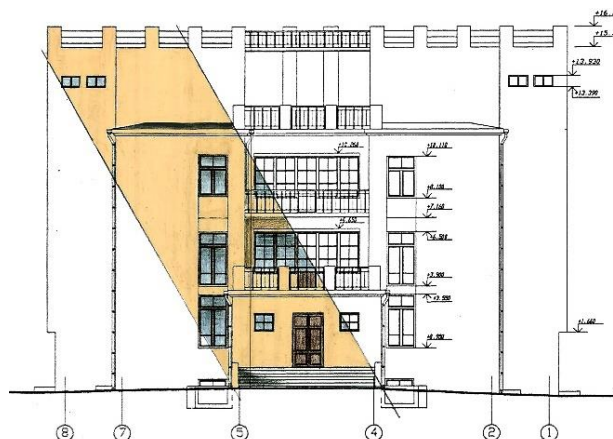
«веж», деревянного павильона «названия за Сонцам», а также характеру стальных конструкций.

Анализ показывает, что при разработке проекта реставрации за основу были приняты не авторские решения 1929–1930 гг. и не фактически существующее здание по фотофиксации 1935–1936 гг. [2], а не реализованный проектно-конструкторский проект 1935 г. [3], который идентифицирован как финальный вариант проекта Л. Л. Володзьки 1930 г. [16].

Участком, были заданы слупки арочного троса второго и четвертого этажа, карниз входной группы, а также терраса на четвертом этаже над входом в здание – элементы, зафиксированные в проектных рисунках 1935 г.

Участком здания был установлен лифт – административная функциональная зона, которая, однако, не нарушила общую пространственную структуру объекта. Колоннада решенная фасадом, выходящая в зал ожидания, была предусмотрена на основе физико-химических исследований как наиболее ранний выявленный стратиграфический слой. Стальные элементы мелкого «стандартного» карычневой окраски, которая часто встречается в использовании при реставрации исторических объектов [4].

Проектом предусматривался демонтаж лишней сферы радиусной конструкции из исторических элементов здания. Истории металлические сферы на бетонных основаниях были демонтированы в соответствии с проектными решениями, однако после завершения основных работ на кровле появились новые сферы с шпательной на металлической основе. Причины принятия такого решения документально не зафиксированы. Металлоконструкция обшивки в их уже не разрабатывалась и сферы мелкого диаметра характерны (малюнок 3, 4).



Малюнок 3 – Проектный рисунок паўночнага (галоўнага) фасада. 1998 г. [1, AP]



Малюнок 4 – Проектный рисунок заходняга фасада. 1998 г. [1, AP]

Будайнічыя работы былі распачатыя ў 2000 г. і працягваліся да 2007 г. Нягледзячы на шэраг архітэктурных неадпаведнасцей, у выніку рэалізацыі былі адноўлены ключавыя стылістычныя адметнасці будынка 1930-х гг. Гэта спрыяла фармаванню прафесійнай і грамадскай ацэнкі значнасці архітэктурнай спадчыны савецкага авангарду, актывізацыі дыскусій пра праблемы яе захавання, а таксама росту цікавасці да архітэктурнай гісторыі Мінска 1920–1930-х гг. Будынак абсерваторыі неаднаразова называўся даследчыкамі сярод лепшых прыкладаў авангарду¹ у Мінску – нароўні з будынкам былой бібліятэкі Лаўрова і Фабрыкі-кухні Грубера [5].

Перанос абсерваторыі і стан будынка да 2020 г.

У пачатку ХХІ ст. умовы для метэаралагічных назіранняў у гістарычным будынку абсерваторыі значна пагоршыліся. Гэта было абумоўлена інтэнсіўнай урбанізацыяй і шчыльнай забудовай тэрыторыі вакол аб'екта, што істотна абмяжоўвала магчымасць яго далейшага выкарыстання на першапачатковым прызначэнні. У выніку было прынята рашэнне пра перанос абсерваторыі за межы горада.

У 2004 годзе тэрыторыя, на якой раней ажыццяўляліся метэаралагічныя назіранні, была перададзена інвестару – кампаніі ТДА «Перспектива-Інвест-Буд» – для будаўніцтва трох жылых дамоў. Згодна з умовамі інвестыцыйнай дамовы, інвестар абавязваўся ўзвесці за межамі горада новы метэаралагічны корпус з сучасным абсталяваннем для Белгидрамета. Аднак указаная абавязальнасць не была выкананая: ні будаўніцтва новага корпуса, ні рэалізацыя жылой забудовы не адбыліся [6].

Новы метэаралагічны корпус у мікрараёне Уручча быў узведзены толькі ў канцы 2018 г. Пасля завяршэння яго будаўніцтва абсерваторыя была пераведзена ў новы будынак, у той час як у гістарычным корпусе распачаліся даследчыя работы па падрыхтоўцы чарговага праекта капітальнага рамонтнага, паколькі на гэты момант аб'ект ужо знаходзіўся ў стане, непрыдатным для далейшай эксплуатацыі.

Перадумовы капітальнага рамонтнага: тэхнічны стан і вынікі даследаванняў 2018–2019 гг.

Нягледзячы на рэканструкцыю будынка абсерваторыі ў 2000–2007 гг., у наступныя гады аб'ект сутыкнуўся з шэрагам эксплуатацыйных праблем: працэскамі даху, замаканнем сцен і ўтварэннем цвілі. Унутраныя і вонкавыя канструкцыі пачалі дэманстраваць прыкметы дэградацыі [7]. На гэтым тле ўзнікла неабходнасць распрацоўкі праекта капітальнага рамонтнага будынка.

Архітэктурна-планіровачнае заданне на распрацоўку адпаведнага праекта было выдадзена напрыканцы 2014 года, аднак даследчыя працы пачаліся толькі ў канцы 2018 года.

Па выніках інжынернага абследавання было выяўлена, што пагаршэнне стану будынка абумоўлена ненадзейным станам гідраізаляцыі цокальных сценаў, дэфектамі даху, працэскамі інжынерных камунікацый, недастатковай цеплаізаляцыяй і неэфектыўнай сістэмай вентыляцыі. Асабліва шкоднымі аказаліся працяглыя перыяды падвышанай вільготнасці і застою паветра, што прывяло да капілярнага пранікнення вільгаці ў сцены, рассялення цэгла, набухання бетону і дэградацыі тынку.

У чэрвені – ліпені 2019 г. Інстытут эксперыментальнай батанікі НАН Беларусі правёў мікалагічнае абследаванне будынка [8]. Вынікі паказалі наяўнасць на канструкцыях 18 відаў мікрагрыбоў, частка з якіх з'яўлялася патагеннай для чалавека. У некаторых выпадках пранікненне грыбніцы ў бетон дасягала глыбіні да 80 мм, што суправаджалася карозіяй металічнай арматуры і парушэннем цэласнасці канструкцый.

У заключэнні абследавання адзначалася, што будынак знаходзіцца ў непрыдатным для эксплуатацыі стане, а далейшае знаходжанне людзей у яго памяшканнях з'яўляецца небяспечным для здароўя. З улікам высокай гіграскапічнасці канструкцыйных

матэрыялаў і значнай ступені мікалагічнага паражэння захаванне будынка і правядзенне яго рэканструкцыі ацэньвалася як немэтазгоднае (што на практыцы азначала пагрозу зносу).

Праект капітальнага рамонтнага з рэстаўрацыяй 2020 г.

Распрацоўка праектнай дакументацыі па капітальным рамонтна з рэстаўрацыяй будынка была распачата ў 2020 г. Работы выконваліся ААТ «Інстытут «Мінскаграмадзянскага» у супрацоўніцтве з ТАА «Навукова-праектны цэнтр "РЭСТАБІЛІС"». Галоўным архітэктарам праекта выступала М. Г. Міклашэвіч, навуковае кіраўніцтва ажыццяўляў Р. А. Забела [9].

Асноўнымі мэтамі былі аднаўленне тэхнічнага стану і эксплуатацыйнай прыдатнасці будынка з безумоўным захаваннем яго гістарычных канструкцый, а таксама аднаўленне эстэтычнага і архітэктурнага выгляду помніка.

У архітэктурна-рэстаўрацыйнай частцы праекта прадугледжвалася захаванне асноўных рашэнняў, закладзеных у праекце 1997–2000 гг. Нязначныя змены тычыліся ўдакладнення габарытаў і колькасці слупкоў на балконах і даху пры іх аднаўленні, а таксама канфігурацыі пераплётаў пры замене ваконных запавуванняў, на падставе больш дэталёвага аналізу гістарычных фотаздымкаў 1930-х гг. [9].

Колеравае рашэнне фасадаў

У межах праектнай дакументацыі 2020 г. першапачаткова не прадугледжвалася змена колеравага рашэння фасадаў. Планавалася захаванне схемы, рэалізаванай падчас рэканструкцыі аб'екта ў 2000–2007 гг. Гэтае рашэнне – аднатонная афарбоўка ў залаціста-охрысты колер – грунтавалася на выніках фізіка-хімічных даследаванняў 1998 г. і спачатку разглядалася як навукова абгрунтаванае і гістарычна дакладнае [10].

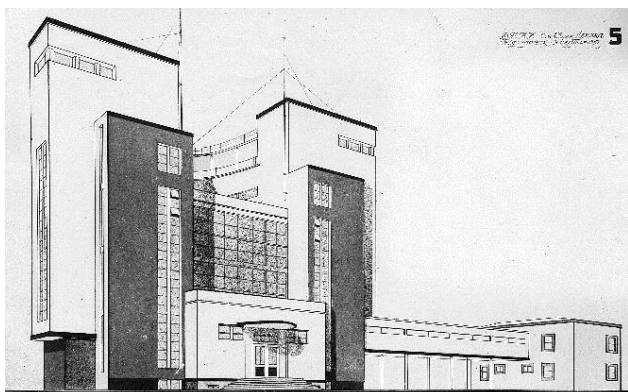
Аднак на стадыі рэалізацыі праекта, пасля ачысткі фасадаў ад рамонтных напластаванняў, былі выяўленыя фрагменты афарбоўкі розных перыядаў – ад малочнага да насычанага чырвона-карычневага [11]. Стала відавочна, што праведзеныя раней даследаванні не давалі поўнага ўяўлення пра стратыграфію фарбавальных слаёў па ўсёй вышыні будынка і, адпаведна, не маглі служыць дастатковай падставой для прыняцця адназначнага праектнага рашэння.

Гэта абумовіла неабходнасць правядзення дадатковых даследаванняў. Іх вынікі дазволілі ўдакладніць звесткі пра будаўнічую гісторыю аб'екта, зафіксаваць змены колеравага рашэння фасадаў у розныя перыяды эксплуатацыі і крытычна перагледзець ранейшыя рэстаўрацыйныя падыходы.

Аналіз архіўных матэрыялаў і праектнай графікі 1929–1932 гг. паказаў, што ўсе аўтарскія варыянты І. І. Валодзькі, нягледзячы на трансфармацыі аб'ёмна-прасторавай структуры, захоўвалі адзіны прынцып колеравага рашэння – кантраснае вылучэнне ваконных прасценкаў і асобных плоскасцей фасадаў [12]. Авангардная паліхромія не была рэалізавана ў 1930-я гг., спачатку праз зрывы тэрмінаў будаўніцтва, а пазней – у сувязі са зменай дзяржаўнай архітэктурнай палітыкі. У выніку будынак быў уведзены ў эксплуатацыю з неатынкаванымі фасадамі. У наступныя гады ён быў фармальна атынкаваны і на працягу ХХ ст. не набыў закончанага архітэктурнага аблічча: рамонтныя праводзіліся фрагментарна, пераважна гаспадарчымі спосабамі і мелі ўтылітарны характар [12]. Будынак некалькі разоў мяняў прынцып расфарбоўкі, пры гэтым ніводнае рашэнне не было ўстойлівым у часе. Сфармаванае да 2020 г. аблічча аб'екта, якое ў значнай ступені вызначыла сучаснае «разуменне» помніка, было вынікам рэканструкцыі 2000-х гг.

Кампазіцыя праекта І. І. Валодзькі была падпарадкавана балансу выразных вертыкальных і гарызантальных членянняў. Калі вертыкалі задаваліся аб'ёмам і габарытамі праёмаў, то гарызанталі фармаваліся менавіта каляровым выдзяленнем прасценкаў. Аднатонная афарбоўка фасадаў нівелюе праектную рытміку: асабліва істотна мяняецца ўспрыманне лесвічных рызалітаў, губляецца кампазіцыйная роля парных вокнаў верхняга паверха і кансольнага вынасу над уваходамі. Такім чынам, колеравае рашэнне для дадзенага аб'екта выступае не як другасны дэкаратыўны элемент, а як раўназначны і прынцыповы складнік архітэктурнай канцэпцыі і мастацкага выражэння будынка. З улікам названых фактаў, было прынята рашэнне пра рэканструкцыю колеравай схемы ў адпаведнасці з аўтарскай задумай (малюнак 5).

¹ У публікацыях і энцыклапедычных даведніках будынак абсерваторыі часцей за ўсё залічваюць да аб'ектаў канструктывізму, што ў дадзеным выпадку выступае недакладнай абагульняльнай назвай для абазначэння ўсёй савецкай авангарднай спадчыны 1920–1930-х гг. Праектныя рашэнні І. І. Валодзькі сваімі прынцыпамі адпавядаюць рацыяналістычнаму кірунку авангарду [12].



Малюнок 5 – Праект 1929 г. Перспектывны выгляд [13, арк. 10]

Метадалагічна аднаўленне выгляду аб'екта на пэўны гістарычны перыяд не з'яўляецца шырока ўжываным прыёмам у рэстаўрацыйнай практыцы і ў шэрагу выпадкаў катэгарычна адмаўляецца. Аб'ект спадчыны сёння разглядаецца перш за ўсё як гістарычны дакумент – сведка і вынік гістарычных працэсаў, а не толькі як твор мастацтва. Аднаўленне першапачатковага выгляду можа прывесці да страты каштоўных сведчанняў пазнейшага развіцця – гістарычных напластаванняў.

Не часта практыкуецца і аднаўленне нерэалізаванай аўтарскай задумы, паколькі ў многіх выпадках немагчыма дакладна вызначыць прычыны яе змены: ці было гэта свядомае карэктаванне ідэі, не зафіксаванае дакументальна, ці вынік будаўнічых абмежаванняў або ўплыў знешніх гістарычных чыннікаў.

У выпадку абсерваторыі магчымасць такой рэканструкцыі абумоўлена дакладным вызначэннем прычын незавершанасці першапачатковага праекта і аб'ектыўнай ацэнкай наступных рамонтаў як выпадковых і неістотных для гісторыі аб'екта. Вобраз будынка па выніку папярэдніх рэстаўрацыйных прац, у сваю чаргу, з'яўляецца суб'ектыўнай інтэрпрэтацыяй, заснаванай на абмежаванай даследчай базе.

Такім чынам, выкарыстанне метадалагічнага прыёму рэканструкцыі нерэалізаванага праектнага колеравага прынцыпу магло быць здзейснена без страты адметных вартасцей аб'екта і без «дадумвання» за аўтара (малюнк 6, 7).

У якасці асноўнага тону фасадаў захаваны залаціста-охрысты, а для вылучэння асобных элементаў (рызалітаў, прасценкаў) выкарыстаны насычаны чырвона-карычневы (сурый). Абранае спалучэнне адпавядае эстэтыцы савецкага авангарду 1920–1930-х гг., аб'ектам аналагам і тэхналагічным магчымасцям таго часу [15, с. 567–568].



Малюнок 6 – Агульны выгляд будынка да рэстаўрацыйных прац. 2020 г. (фота аўтара)



Малюнок 7 – Агульны выгляд будынка пасля рэстаўрацыйных прац. 2025 г. (фота аўтара)

Дадатковым вынікам стала інтэграцыя сфер радыёзонадаў у агульную архітэктурную кампазіцыю гістарычнага будынка: іх белачырвоная афарбоўка арганічна суадносіцца з колеравай гамай асноўнага аб'ёму, што нівелюе ранейшы дэсгарманічны кантраст пазнейшых элементаў і забяспечвае візуальную цэласнасць аб'екта.

Інтэр'еры

Першапачатковыя інтэр'еры будынка абсерваторыі не мелі ўнікальнага мастацкага афармлення і вызначаліся лаканічнасцю і ўтылітарным характарам. Разам з тым характэрныя рашэнні сталярных вырабаў, колеравых схем памяшканняў і іншых элементаў фарміравалі выразны вобраз, уласцівы архітэктурнай практыцы свайго часу.

Першапачатковыя інтэр'еры не захаваліся: кафляныя грубкі, драўляныя падлогі і сталярныя вырабы былі дэмантаваныя яшчэ ў другой палове XX ст. Аддзелачныя пласты памяшканняў былі страчаныя ў выніку шматлікіх рамонтаў, што не дазволіла атрымаць дакладныя звесткі пра гістарычнае колеравае афармленне. Фотаздымкі абсерваторыі 1930–1950-х гг. фіксуюць агульны характар адраблення інтэр'ераў без дэталізацыі.

Сярод захаваных аўтэнтычных элементаў можна адзначыць першапачатковыя металічныя агароджы лесвічных маршаў, а таксама карнізы-выкружкі на бетонных бэльках і асобных лесвічных пляцоўках. Мазаічныя прыступкі лесвічных маршаў былі адноўлены падчас папярэдніх рэстаўрацыйных работ пасля замены канструкцый саміх маршаў.

Падчас рэстаўрацыйных работ 2020–2025 гг. было прынята рашэнне пра стылістычную рэканструкцыю колеравага афармлення месцаў агульнага карыстання (калідораў і лесвічных клетак). Мэтай гэтага кроку стала максімальна поўная трансляцыя гістарычнага характару будынка пры адмове ад дэталёвага аднаўлення страчаных элементаў, якія не адпавядаюць сучасным эксплуатацыйным патрабаванням. У дадзеным выпадку як раз колеравае рашэнне выступае ключавым інструментам фармавання вобраза інтэр'ераў і перадачы іх гістарычнага характару.

На падставе аналізу гістарычных фотаздымкаў і аб'ектаў-аналагаў 1920–1930-х гг. для афармлення сцен быў абраны распаўсюджаны для таго часу прыём: ніжняя частка сцен афарбоўвалася ў цёмны колер, верхняя частка сцен і столь – у светлы, а на мяжы колераў праходзіла цёмная гарызантальная паласа, якая афармляла акуратную мяжу паміж імі. Кабінеты атрымалі аднатонную афарбоўку сцен, узгодненую з колеравай схемай калідораў, з дыферэнцыяцыяй колераў па паверхнях (малюнок 8).



Малюнак 8 – Агульны выгляд стылізаванага інтэр'ера лесвічнай клаткі. 2025 г. (фота аўтара)

Сферы радыёзондаў і пытанне гістарычнай вартасці

Як і ў папярэднім праекце, распрацаванай дакументацыяй прадугледжваўся дэмантаж сфер на кроўлі будынка, усталяваных у другой палове XX ст., а таксама размяшчэнне двух маланкаадводаў на фасадах аб'ёмаў лесвічных клетак з выкарыстаннем вантавых расцяжак. Дадзенае рашэнне абгрунтавалася неабходнасцю аднаўлення архітэктурнага аблічча будынка ў адпаведнасці з першапачатковым праектам і вяртання гістарычнага ўспрымання маштабу і характару архітэктуры, парушанага ў выніку ўсталявання сфер.

Аднак на этапе ўзгаднення праекта заказчык – Рэспубліканскі цэнтр па гідраметэаралогіі – звярнуўся ў Міністэрства культуры з лістом аб неабходнасці захавання сфер як элемента, што мае важнае сімвалічнае значэнне для арганізацыі. Абрыс будынка са сферамі выкарыстоўваецца ў лагатыпе Белгідрамета і фігуруе ў яго інфармацыйных і рэкламных матэрыялах.

Дадатковае апытанне², праведзенае сярод аматараў і знаўцаў беларускай савецкай архітэктуры 1930-х гг., паказала, што прыблізна 70 % рэспандэнтаў разглядаюць дахавыя сферы як неад'емную частку аб'екта, і толькі 29 % – як элементы, што скажаюць аўтарскую архітэктурную канцэпцыю і парушаюць гістарычныя прапорцыі [14].

З улікам атрыманых звестак і пашыранага разумення вартасцей сфер было прынята рашэнне захаваць іх як частку будаўнічай гісторыі і тэхналагічнага развіцця аб'екта, а таксама як устойлівы візуальны маркер, трывала асацыяваны з абсерваторыяй у гарадскім асяроддзі. Пры такім рашэнні вяртанне маланкаадводаў у якасці акцэнтаў на фасадах будынка было прызнана немэтазгодным.

Праблемы рэалізацыі праектных рашэнняў

Будаўнічыя работы на аб'екце былі распачаты ў верасні 2022 г. Першапачаткова генеральным падрадчыкам выступіла ТАА «Белуніфлор». Завяршэнне работ планавалася на сакавік 2023 г.,

аднак у сувязі з невыкананнем дамоўных абавязацельстваў дамова была скасавана ў сярэдзіне 2023 г. Новым выканаўцам стала кампанія ААТ «Будкомплекс». З улікам унясення змяненняў у праектную дакументацыю тэрмін завяршэння работ быў прызначаны на сакавік 2024 г., але праз шэраг вытворчых складанасцей ён неаднаразова пераносіўся. Фактычна аб'ект быў завершаны толькі ў снежні 2025 г.

Характар выяўленых праблем і працягласць будаўнічага працэсу ў пэўнай ступені паўтараюць сцэнар 90-гадовай даўніны. Як і пры першапачатковым узвядзенні абсерваторыі, падыход падрадных арганізацый істотна паўплываў на тэрміны, якасць і паўнату ўвасаблення праектных рашэнняў [12].

На этапе вытворчасці работ фіксаваліся сістэматычныя адхіленні ад праекта, звязаныя са спробай выкарыстання неадпаведных матэрыялаў, спрашчэння канструктыўных вузлоў і замены запраэктаваных элементаў на больш танныя аналагі.

Нягледзячы на апэратыўную рэакцыю і настойлівыя намаганні навуковых кіраўнікоў (з лютага 2025 года да кіраўніцтва вытворчасцю далучыўся А. М. Карпук), не ўсе парушэнні ўдалося своечасова спыніць, а частка праектных рашэнняў была рэалізаваная з адхіленнямі.

Разам з тым да моманту ўводу аб'екта ў эксплуатацыю атрымалася дамагчыся выпраўлення найбольш істотных недахопаў, што дазволіла захаваць цэласнасць архітэктурнага вобразу. Аднак якасць аддзелачных работ, дакладнасць геаметрыі элементаў фасадаў, профілі карнізаў, створкі вітражоў, унутраныя дзверы, металічныя адлівы і пакрыцці ганкаў патрабуюць дадатковай карэкціроўкі ў межах наступных рамонтна-рэстаўрацыйных мерапрыемстваў.

Заклучэнне

Даследаванне дазволіла сістэматызаваць архіўныя, іканаграфічныя і натурныя матэрыялы па гісторыі сучаснага этапу існавання Беларускай геофізічнай абсерваторыі ў Мінску (1997–2025 гг.), даць навуковую ацэнку асноўным этапам рэстаўрацыйных прац і сфармуляваць шэраг метадалагічных высноў.

1. У разгледжаны перыяд адбыўся пераход ад утылітарных эксплуатацыйных рамонтаў да навукова абгрунтаванай рэстаўрацыі, што дазволіла аднавіць архітэктурныя адметнасці будынка і наблізіць яго да першапачатковага праектнага аблічча.

2. Крытычны аналіз праектных рашэнняў і рэалізацыі 1997–2007 гг. выявіў недакладнасці, абумоўленыя недастатковасцю даследчай базы і няправільнай інтэрпрэтацыяй атрыманых вынікаў.

3. Вынікі рэстаўрацыі 1997–2007 гг. і час, які прайшоў да новых работ, спрыялі фармаванню больш дакладнага разумення вартасцей аб'екта, што дазволіла разглядаць сферы радыёзондаў, гістарычны характар інтэр'ераў і нерэалізаваныя авангардныя каларыт фасадаў як элементы, вартыя захавання і аднаўлення.

4. Даследавана праблема рэканструкцыі нерэалізаванага аўтарскага колеравага рашэння і дадзена метадалагічная ацэнка дапушчальнасці прымянення гэтага прыёму для будынка абсерваторыі.

5. У беларускім кантэксце вынікі рэстаўрацыйных работ мэтазгодна разглядаць не як завершаны працэс, а як прамежавы этап. Нават пры дастатковых матэрыяльных рэсурсах на вынік істотна ўплываюць недастатковы ўзровень навуковых даследаванняў, прафесійнай кампетэнтнасці спецыялістаў і арганізацыі будаўнічага працэсу.

6. Сучасныя рэстаўрацыйныя рэалізацыі патрабуюць крытычнага вывучэння, выяўлення магчымых памылак і іх выпраўлення на наступных этапах; вынік апошняй рэстаўрацыі абсерваторыі не з'яўляецца выключэннем: як і 90 гадоў таму, будаўнічы працэс паўплываў на паўнату і дакладнасць увасаблення праектных рашэнняў.

Нягледзячы на лаканічнасць архітэктурных форм, аб'екты савецкага авангарду патрабуюць складанага і дыферэнцыяванага навуковага падыходу да выяўлення і ацэнкі іх вартасцей. Прыклад Беларускай геофізічнай абсерваторыі паказвае, што знешняя зразумеласць такіх аб'ектаў можа прыводзіць да спрошчаных інтэрпрэтацый, калі аналіз не грунтуецца на сістэмным вывучэнні аўтарскіх праектных рашэнняў і кантэксту іх рэалізацыі. Атрыманыя вынікі дазваляюць разглядаць дадзены аб'ект як метадалагічна значны прыклад для даследавання і рэстаўрацыі архітэктуры міжваеннага перыяду.

² Апытанне разглядалася не як вызначальны навуковы доказ, а як дадатковы індикатар успрымання вартасцей аб'екта ў грамадскай свядомасці.

Спіс цытаваных крыніц

1. Унутраны архіў ААТ «Інстытут “Мінскграмадзянпраект”». – Праектная дакументацыя : Аб’ект 97-083 «Рэканструкцыя збудавання абсерваторыі па пр. Ф. Скорины, 110 в г. Мінске».
2. Унутраны архіў УП «Белгідрамет». – Фото-альбом мінскай геофізічнай абсерваторыі 1948–195... гг.
3. Унутраны архіў УП «Белгідрамет». – [Фотакопіі праекта будынка абсерваторыі 1935 г].
4. Забелло, Р.А. Воссоздание исторического облика зданий по ул. Коммунистической в г. Минске (1952–1954 гг.): цветовое решение и особенности декоративной отделки фасадов / Р.А. Забелло // Архитектура : сборник научных трудов. – Минск : БНТУ, 2019. – Вып. 12.
5. Беларускі дзяржаўны архіў навукова-тэхнічнай дакументацыі (БДАНТД) : матэрыялы выставы «Канструктыўзм у гісторыі горада Мінска». – URL: https://bdantd.by/konstruktivizm_v_istorii_goroda_minska (дата звароту: 28.12.2025).
6. Пономарев, В. Чужие интересы / В. Пономарев // СБ. Беларусь сегодня. – 2008. – 19 апр. – URL: <https://www.sb.by/articles/chuzhie-interesy.html> (дата звароту: 28.12.2025).
7. Унутраны архіў ААТ «Інстытут “Мінскграмадзянпраект”». Аб’ект 19.054. Тэхнічнае заключэнне / Белстройтехно ; Об’ект 41/13.18 / Касинич. – Минск, 01.2019.
8. Унутраны архіў ААТ «Інстытут “Мінскграмадзянпраект”» : Аб’ект 19.054. Заключеніе о проведенном микологическом исследовании / Т. Г. Шабашова, С. И. Кориняк, Д. Б. Беломорцева ; Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси. – Минск, 05.08.2019.
9. Унутраны архіў ААТ «Інстытут “Мінскграмадзянпраект”». Праектная дакументацыя : Аб’ект 19.054 «Капітальны ремонт с реставрацыяй збудавання абсерваторыі...».
10. Унутраны архіў ААТ «Інстытут “Мінскграмадзянпраект”». Аб’ект 97-083. Фізіка-хімічныя даследаванні будаўнічых матэрыялаў / Н. М. Кожух, М. М. Цейтліна ; Белінформреставрацыя. – Мінск, 1998.
11. ТАА «Навукова-праектны цэнтр “РЭСТАБІЛІС”». – Аб’ект 64.22. Навукова-метадычнае абгрунтаванне праектных рашэнняў / Р. А. Забела. – Мінск, 2024.
12. Забела, Р. А. Будынак Беларускай геафізічнай абсерваторыі ў Мінску: будаўнічая гісторыя ад аўтарскай задумкі да навуковай рэстаўрацыі (1929–2025 гг.) / Р. А. Забела // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2026. – № 1 (139). – С. 43–49. – DOI: 10.36773/1818-1112-2026-139-1-43-49.
13. Беларускі дзяржаўны архіў навукова-тэхнічнай дакументацыі (БДАНТД). – Ф. 105. – Воп. 1. – Спр. 2.
14. Апытанне. Тэлеграм-канал «Беларускі піонэр». – URL: <https://t.me/belaruskipioner/3527> (дата звароту: 28.12.2025).
15. Хан-Магомедов, С. О. Архитектура советского авангарда : в 2 кн. / С. О. Хан-Магомедов. – М. : Стройиздат, 1996. – Кн. 1 : Проблемы формообразования. Мастера и течения.
16. Кукуня, О. Г. Здание обсерватории в Минске - памятник архитектуры и науки / О. Г. Кукуня // Каштоўнасці мінуўшчыны. – Вып. 1 : Праблемы захавання архітэктурнай спадчыны савецкага перыяду : матэрыялы канф., Мінск, 12 лістап. 1997 г. / пад рэд. С. В. Марцэлева. – Мінск : Лекцыя, 1998. – С. 44–48.

References

1. Unutrany arhiy AAT «Instytut “Minskgra-madzyanpraekt”». – Praektnaya dokumentacyya : Ab’ekt 97-083 «Rekonstrukciya zdaniya observatorii po pr. F. Skoriny, 110 v g. Minske».
2. Unutrany arhiy UP «Belgidramet». – Foto-al'bom minskoy geofizicheskoy observatorii 1948–195... gg.
3. Unutrany arhiy UP «Belgidramet». – [Fotakopii praekta budynka abservatoryi 1935 g].
4. Zabello, R.A. Vossozdanie istoricheskogo oblika zdaniy po ul. Kommunisticheskoy v g. Minske (1952–1954 gg.): cvetovoe reshenie i osobennosti dekorativnoy otdelki fasadov / R.A. Zabello // Arhitektura : sbornik nauchnyh trudov. – Minsk : BNTU, 2019. – Vyp. 12.
5. Belaruski dzyarzhayny arhiy navukova-tekhnichnaj dokumentacyi (BDANTD) : materyyaly vystavy «Kanstryktivizm u gistoryi gorada Minska». – URL: https://bdantd.by/konstruktivizm_v_istorii_goroda_minska (data zvarotu: 28.12.2025).
6. Ponomarev, V. Chuzhie interesy / V. Ponomarev // SB. Belarus' segodnya. – 2008. – 19 apr. – URL: <https://www.sb.by/articles/chuzhie-interesy.html> (data zvarotu: 28.12.2025).
7. Unutrany arhiy AAT «Instytut “Minskgra-madzyanpraekt”». Ab’ekt 19.054. Tekhnicheskoe zaklyuchenie / Belstrojtekhn ; Ob’ekt 41/13.18 / Kasinich. – Minsk, 01.2019.
8. Unutrany arhiy AAT «Instytut “Minskgramadzyanpraekt”» : Ab’ekt 19.054. Zaklyuchenie o provedennom mikologicheskomo issledovanii / T. G. SHabashova, S. I. Korinyak, D. B. Belomorцева ; Institut eksperymental'noj botaniki im. V. F. Kuprevicha NAN Belarusi. – Minsk, 05.08.2019.
9. Unutrany arhiy AAT «Instytut “Minskgramadzyanpraekt”». Praektnaya dokumentacyya : Ab’ekt 19.054 «Kapital'nyj remont s restavraciej zdaniya observatorii...».
10. Unutrany arhiy AAT «Instytut “Minskgramadzyanpra-ekt”». Ab’ekt 97-083. Fiziko-himicheskie issledovaniya stroitel'nyh materialov / N. M. Kozhuh, M. M. Cejtłina ; Belinformrestavraciya. – Minsk, 1998.
11. TAA «Navukova-praektny centr “RESTABILIS”». – Ab’ekt 64.22. Navukova-metadychnae abgruntavanne praektnyh rashennyaŭ / R. A. Zabela. – Minsk, 2024.
12. Zabela, R. A. Budynak Belaruskaj geafizichnaj abservatoryi ŭ Minsku: budaŭnichaya gistoryya ad aŭtarskaj zadumy da navukovaj restaŭracyi (1929–2025 gg.) / R. A. Zabela // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2026. – № 1 (139). – S. 43–49. – DOI: 10.36773/1818-1112-2026-139-1-43-49.
13. Belaruski dzyarzhayny arhiy navukova-tekhnichnaj daku-mentacyi (BDANTD). – F. 105. – Vop. 1. – Spr. 2.
14. Apytanne. Telegram-kanal «Belaruski pioner». – URL: <https://t.me/belaruskipioner/3527> (data zvarotu: 28.12.2025).
15. Han-Magomedov, S. O. Arhitektura sovetского avangarda : v 2 kn. / S. O. Han-Magomedov. – M. : Strojizdat, 1996. – Kn. 1 : Problemy formoobrazovaniya. Masters i tehniciya.
16. Kukunya, O. G. Zdanie observatorii v Minske - pamyatnik arhitektury i nauki / O. G. Kukunya // Kashtoŭnasci minuyshchyny. – Vyp. 1 : Pablemy zahavannya arhitekturmaj spadchyny saveckaga peryadu : materyyaly kanf., Minsk, 12 listap. 1997 g. / pad red. S. V. Marceleva. – Minsk : Lekcyya, 1998. – S. 44–48.

Материал поступил 31.01.2026, одобрен 12.02.2026,
принят к публикации 12.02.2026

УДК 628.112

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫВНОГО ПОТОКА ПРИ СВАБИРОВАНИИ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН

В. В. Ивашечкин¹, А. А. Артёмчик², А. В. Житко³

¹ Д. т. н., профессор кафедры гидротехнического и энергетического строительства, водного транспорта и гидравлики, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: ivashechkin_vlad@bntu.by

² Ассистент кафедры водоснабжения и водоотведения, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: artemchik@bntu.by

³ Аспирант кафедры гидротехнического и энергетического строительства, водного транспорта и гидравлики, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: gts@bntu.by

Реферат

В статье приведена методика гидравлического расчета параметров промывного потока при освоении и стимулировании дебита водозаборных скважин способом свабиrowания. Разработана расчетная схема движения фильтрационных потоков в прифильтровой зоне скважины при рабочем ходе сваба. Составлены и решены уравнения баланса расходов и напоров в стволе и гравийной обсыпке, учитывающие обходной расход под сваб и приток воды из пласта через гравийную обсыпку, приемистость пласта, подъем уровня в надфильтровой трубе и понижение напора под свабом. Получены расчетные зависимости для определения повышения пьезометрического уровня воды в надфильтровой колонне над статическим уровнем и понижения напора под свабом в процессе его подъема. Это позволяет вычислять значения промывной скорости в гравийной обсыпке в зависимости от положения сваба в фильтре, скорости его перемещения, геометрических параметров скважины и ее гидравлических характеристик, а также рассчитывать технологические параметры обработки фильтра в зависимости от степени его кольматации.

Приведён пример расчета. Показано, что значение промывной скорости в порах обсыпки зависит от положения движущегося сваба в фильтре. Наибольшие скорости характерны для нижней части фильтра, где вначале подъема под свабом формируется наибольшее разрежение. В дальнейшем с увеличением высоты подъема сваба в фильтре промывная скорость уменьшается по экспоненциальной зависимости.

Установлено, что абсолютные значения промывных скоростей возрастают с увеличением глубины воды над верхом фильтра и скорости движения сваба. Поэтому при обработках мелких скважин промывные скорости можно увеличить за счет увеличения скорости подъема сваба.

Ключевые слова: водозаборная скважина, свабиrowание, сваб, регенерация, восстановление дебита, промывная скорость.

HYDRAULIC CALCULATION OF FLUSHING FLOW PARAMETERS DURING SWABBING OF WATER INTAKE WELLS

V. V. Ivashechkin, A. A. Artemchik, A. V. Zhytko

Abstract

The paper presents a methodology for the hydraulic calculation of flushing flow parameters during the development and yield stimulation of water intake wells by swabbing. A computational model for the movement of seepage flows in the near-screen zone of the well during the working stroke of the swab has been developed. Flow rate and head balance equations for the wellbore and gravel pack have been formulated and solved, taking into account the bypass flow rate under the swab, water inflow from the formation through the gravel pack, formation intake capacity, fluid level rise in the tubing above the screen, and pressure drop under the swab. Analytical relationships have been derived to determine the rise of the water piezometric level in the tubing above the screen relative to the static level, and the pressure drop under the swab during its upward movement. This allows for calculating the flushing velocity values in the gravel pack depending on the swab position in the screen, its movement speed, the well's geometric parameters and hydraulic characteristics, as well as calculating the technological parameters of the screen treatment depending on the degree of its clogging.

A calculation example is provided. It is shown that the flushing velocity in the pores of the gravel pack depends on the position of the moving swab in the screen. The highest velocities are characteristic of the lower part of the screen, where the maximum drawdown is initially formed under the swab at the beginning of the upstroke. Subsequently, as the swab lift height in the screen increases, the flushing velocity decreases following an exponential relationship.

It has been established that the absolute values of flushing velocities increase with the depth of water above the top of the screen and the swab movement speed. Therefore, when treating shallow wells, flushing velocities can be increased by raising the swab lifting speed.

Keywords: water intake well, water well, swabbing, swab, regeneration, flow rate recovery, flushing velocity.

Введение

Свабиrowание широко применяется в качестве способа освоения водозаборных скважин после бурения для удаления оставшейся на прифильтровой поверхности пласта глинистой корки, механических примесей из прифильтровой зоны и фильтра. Для регенерации снизивших дебит скважин в процессе эксплуатации этот способ применяется достаточно редко.

Сущность способа заключается в подъеме с достаточно высокой скоростью в фильтре скважины специального поршня-сваба [1–11]. Наибольшая эффективность свабиrowания достигается в глубоких скважинах, пробуренных в напорных водоносных горизонтах, так как здесь можно создать глубокую депрессию, обеспечивающую вынос остатков бурового раствора и кольматирующих отложений из фильтра и гравийной обсыпки. При незначительных глубинах водозаборных скважин и для ускорения работ применяют свабиrowание с одновременной откачкой эрлифтом, при этом устье скважи-

ны оборудуют специальным оголовком с сальниковым уплотнением. Положительный эффект обеспечивается также, если проводить свабиrowание с промывкой скважины [7, 12].

Свабиrowание нашло широкое применение в нефтедобыче. Его применение известно еще с 30-х годов прошлого века. Существуют различные способы и технологии свабиrowания. Величина депрессии на пласт при свабиrowании является одним из основных параметров при проектировании работ по опробованию, освоению и исследованию скважин. Процесс свабиrowания реализуется с помощью подъемных агрегатов для ремонта скважин, включающих лебедку с тартальным барабаном и соответствующим комплектом оборудования, а также специальных мобильных установок, смонтированных на шасси автомобиля высокой проходимости [13, 14]. Технология свабиrowания скважин по своим возможностям является одним из наиболее гибких способов вызова притока воды и нефти из скважин и может быть реализована с помощью свабов различных конструкций.

Строительство

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-140-2-9-14>

Чаще всего для освоения водозаборных скважин применяют свабы в виде трубы с обратным шаровым клапаном. При подъеме сваба вверх клапан закрывается, а при спуске вниз – открывается. При такой конструкции свабы можно перемещать в скважине на тросе, располагая сверху для нагрузки несколько буровых труб. В верхней части свабы находятся разгрузочные отверстия для выхода воды, переходник для крепления буровых труб, а по внешнему периметру приварен опорный фланец, на котором стяжными болтами закреплены два съемных фланца и сменная резиновая манжета. Это позволяет применять свабирование на скважинах с любыми диаметрами фильтров. Для этого необходимо изготовить набор фланцев и резиновых манжет соответствующих размеров.

В БНТУ предложено проводить регенерацию водозаборных скважин способом линейного свабирования в реагенте, который заключается в создании знакопеременных потоков реагента в фильтре и прифилтровой зоне водозаборной скважины путем возвратно-поступательного движения свабы на участке фильтра, ограниченного пакерами [15–17]. Возникающий знакопеременный фильтрационный поток реагента в прифилтровой зоне является определяющим фактором, интенсифицирующим процесс растворения колюматизирующих отложений. Для расчета значений скорости движения реагента в прифилтровой зоне были составлены и решены уравнения баланса расходов и напоров при движении свабы в замкнутой камере, ограниченной пакерами.

Однако, учитывая некоторые технологические сложности реализации реагентного свабирования на участках фильтра, ограниченных пакерами, по сравнению с обработками в открытом фильтре, представляло интерес провести теоретические исследования гидравлических параметров фильтрационного потока, возникающих при движении свабы в открытом фильтре.

В работе Джона Листа [18] представлено математическое моделирование установившегося движения фильтрационных потоков в гравийной обсыпке фильтра, возникающих в результате подъема свабы внутри фильтра скважины [18]. Результаты моделирования представлены в виде соотношений тангенциальной (продольной) и радиальной скоростей в гравийной обсыпке к некоторой «масштабирующей» скорости в точке, находящейся на границе гравийной обсыпки и пласта в сечении напротив свабы. В то же время в выражение для «масштабирующей» скорости входит перепад давления на свабе, который неизвестен. Из материалов работы [18] неясно, как определять численные значения тангенциальной скорости напротив свабы и градиента фильтрации в гравийной обсыпке в зависимости от скорости движения свабы, геометрических и фильтрационных параметров гравийной обсыпки и пласта, чтобы обеспечить эффективное удаление загрязнений и назначить необходимые технологические параметры обработки.

Отсутствие в литературе других теоретических моделей, описывающих процесс свабирования в водозаборных скважинах, сдерживает широкое внедрение этой технологии, в частности, для регенерации снизивших свою производительность скважин в процессе эксплуатации.

В этой связи была сформулирована цель работы, которая заключается в установлении зависимостей величины промывного потока от технологических параметров обработки способом свабирования в открытом фильтре, геометрических и гидрогеологических характеристик очищаемой скважины.

Для сведения гидродинамической задачи к практически применимому инженерному решению в настоящей работе предложен подход, в основе которого лежит закон сохранения массы, реализованный через два уравнения баланса расходов жидкости в надсвабовой и подсвабовой полостях скважины.

Первое уравнение учитывает расходы воды, нагнетаемые свабом в надсвабовую полость скважины: 1) в надфилтровую трубу; 2) в пласт над свабой; 3) непосредственно под свабу по гравийной обсыпке, вследствие перепада давлений между полостями. Второе уравнение баланса расходов жидкости учитывает: 1) расход, поступающий в подсвабовую полость скважины из пласта через обнажаемый участок фильтра; 2) расход, поступающий непосредственно под свабу по гравийной обсыпке, вследствие перепада давлений между полостями.

Предложенная модель, учитывает следующие факторы.

1. Геометрические параметры – диаметр скважины, длину фильтра, диаметр свабы, толщину манжеты свабы, высоту столба воды над верхом фильтра.

2. Параметры процесса по стимулированию притока воды – скорость движения свабы, задающую значения промывных скоростей в порах обсыпки, и интенсивность создания понижения напора под свабом.

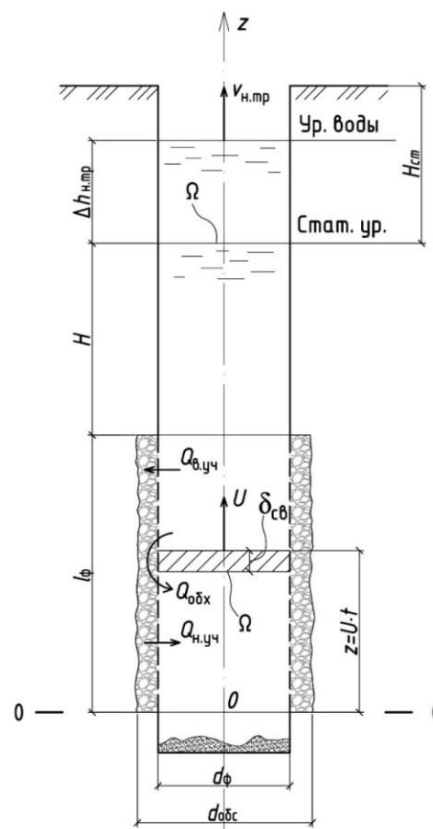
3. Гидродинамические свойства среды – коэффициент фильтрации и коэффициент пористости обсыпки, удельный дебит и приемистость водоносного пласта.

Такой подход предполагает обеспечить необходимый баланс между физической достоверностью описания гидродинамики процесса и вычислительной эффективностью, применимость к конкретным гидрогеологическим условиям, позволяя рассчитать технологический режим свабирования.

Расчет параметров фильтрационного потока

Рассмотрим гидродинамику жидкости при движении свабы внутри фильтра. Будем исходить из того, что на холостом ходу сваба смещается из верхней части фильтра в нижнюю под действием собственного веса и веса буровых штанг, при этом основной поток жидкости проходит через обратный клапан. Рабочий ход свабы (снизу вверх) осуществляют принудительным усилием, и основной поток жидкости огибает свабу по гравийной обсыпке. В дальнейшем будем рассматривать только рабочий ход свабы.

Расчетная схема движения жидкости на участке фильтра при рабочем ходе свабы представлена на рисунке 1.



l_{ϕ} – длина фильтра; d_{ϕ} – внутренний диаметр фильтра; $d_{обс}$ – наружный диаметр контура обсыпки; Ω – площадь манжеты свабы (равная площади поперечного сечения фильтра и надфилтровой трубы);

$\delta_{св}$ – толщина манжеты свабы; $H_{ст}$ – глубина статического уровня;

H – высота столба жидкости над фильтром до статического уровня;

$\Delta h_{н.тр}$ – повышение пьезометрического уровня воды в надфилтровой трубе над статическим уровнем в скважине; $V_{н.тр}$ – средняя скорость подъема уровня жидкости в скважине; U – скорость подъема свабы;

t – время перемещения свабы от начала отсчета; z – расстояние, пройденное свабой;

$Q_{н.тр}$ – расход, поступающий в надфилтровую трубу;

$Q_{в.уч}$ – расход, вытесняемый в пласт через верхний участок фильтра;

$Q_{обх}$ – обходной расход под свабу по гравийной обсыпке

Рисунок 1 – Расчетная схема движения жидкости в фильтре при рабочем ходе свабы

Начало отсчета – плоскость 0–0 – разместим на уровне низа фильтра длиной l_ϕ . Вертикальную ось z направим вертикально вверх вдоль оси скважины. Глубину воды над верхом фильтра обозначим через H . Пусть сваб, имеющий манжету толщиной δ с площадью Ω , перемещается вверх равномерно со скоростью U и находится через время t на расстоянии $z = U \cdot t$ от начала отсчета.

При принудительном движении сваба вверх, он как бесклапанный поршневой насос одностороннего действия создает избыточный напор в верхней полости фильтра, под действием которого некоторая часть жидкости вытесняется через верхнюю часть фильтра в пласт, другая часть – в надфильтровую трубу, а оставшаяся часть перетекает в обход сваба по гравийной обсыпке в зону низкого давления под сваб. Обозначим через $Q_{св}$ подачу сваба

$$Q_{св} = U \cdot \Omega, \quad (1)$$

где U – скорость подъема сваба;

Ω – площадь манжеты сваба (равная площади поперечного сечения фильтра и надфильтровой трубы).

При равномерном движении сваба вверх получаем два уравнения:

1) баланс расходов жидкости, вытесняемых свабом

$$Q_{св} = Q_{н.тр} + Q_{в.уч} + Q_{обх}, \quad (2)$$

где $Q_{н.тр}$ – расход, поступающий в надфильтровую трубу;

$Q_{в.уч}$ – расход, вытесняемый в пласт через верхний участок фильтра;

$Q_{обх}$ – обходной расход под сваб по гравийной обсыпке;

2) баланс расходов жидкости, поступающих под сваб

$$Q_{св} = Q_{н.уч} + Q_{обх}, \quad (3)$$

где $Q_{н.уч}$ – расход, поступающий в нижний участок фильтра из пласта.

Входящие в выражения (2) и (3) параметры определяем следующим образом.

1. Расход жидкости $Q_{н.тр}$, поступающий в надфильтровую трубу, определяем через среднюю скорость $v_{н.тр}$ подъема уровня жидкости в скважине:

$$v_{н.тр} = \frac{\Delta h_{н.тр}}{t}, \quad (4)$$

где $\Delta h_{н.тр}$ – повышение пьезометрического уровня воды

в надфильтровой трубе над статическим уровнем в скважине;

t – время перемещения сваба от начала отсчета.

Тогда расход $Q_{н.тр}$ в надфильтровой трубе на участке подъема уровня равен

$$Q_{н.тр} = \frac{\Delta h_{н.тр} \cdot \Omega}{t}. \quad (5)$$

2. Расход, вытесняемый свабом в пласт через верхний участок фильтра $Q_{в.уч}$, а значит, и поглощаемый пластом, будем находить через коэффициент приемистости q_1 поглощающей скважины, который в общем случае численно равен отношению расхода закачиваемой жидкости Q к повышению пьезометрического уровня Δh над статическим уровнем в скважине, т. е. $q_1 = Q/\Delta h$ [19]. При этом исходим из того, что коэффициент приемистости q_1 совершенной по степени вскрытия пласта водозаборной скважины, как и ее удельный дебит q , прямо пропорционален мощности пласта m , равной длине фильтра l_ϕ , т. е. $m = l_\phi$ [20]. Принимая равномерное поглощение жидкости по всей длине верхнего участка фильтра длиной $(l_\phi - Ut)$, получим

$$Q_{в.уч} = \frac{q_1 (l_\phi - Ut)}{l_\phi} \Delta h_{н.тр}, \quad (6)$$

3. Обходной расход под сваб $Q_{обх}$ по гравийной обсыпке найдем исходя из формулы Дарси, записанной для турбулентного режима движения:

$$Q_{обх} = v_{обс} \cdot \omega_{обс} = k_{обс} l^{0.5} \omega_{обс} = k_{обс} \cdot \omega_{обс} \cdot \left(\frac{(l_\phi - Ut) + H + (\Delta h_{н.тр} + \Delta h_{св})}{\delta_{св}} \right)^{0.5}, \quad (7)$$

где $v_{обс}$ – средняя скорость движения жидкости в поперечном сечении гравийной обсыпки;

$\omega_{обс}$ – площадь поперечного сечения гравийной обсыпки;

$k_{обс}$ – коэффициент фильтрации обсыпки;

l – градиент фильтрации в гравийной обсыпке;

H – высота столба жидкости над фильтром до статического уровня;

$\Delta h_{св}$ – понижение напора под свабом по отношению к пьезометрическому напору;

$\delta_{св}$ – толщина манжеты сваба.

После подстановки выражений (5)–(7) в выражение (2) получим:

$$U\Omega = \frac{\Delta h_{н.тр} \cdot \Omega}{t} + \frac{q_1 (l_\phi - Ut)}{l_\phi} \Delta h_{н.тр} + k_{обс} \cdot \omega_{обс} \left(\frac{(l_\phi - Ut) + H + (\Delta h_{н.тр} + \Delta h_{св})}{\delta_{св}} \right)^{0.5}. \quad (8)$$

4. Промывную скорость в порах обсыпки найдем с учетом коэффициента пористости n материала обсыпки:

$$v'_{обс} = \frac{v_{обс}}{n} = \frac{k_{обс} \left(\frac{(l_\phi - Ut) + H + (\Delta h_{н.тр} + \Delta h_{св})}{\delta_{св}} \right)^{0.5}}{n}, \quad (9)$$

где n – коэффициент пористости обсыпки.

5. Расход, поступающий из пласта в момент времени t в нижний участок фильтра длиной $U \cdot t$, найдем через удельный дебит q_2 сква-

жины и понижение напора под свабом $\Delta h_{св}$. При этом будем исходить из того, что удельный дебит q_2 скважины прямо пропорционален мощности пласта m , равной длине фильтра l_ϕ , т. е. $m = l_\phi$ [20]. Будем считать, что расход $Q_{н.уч}$ поступает равномерно по длине нижнего участка фильтра длиной $U \cdot t$ из пласта. Тогда получим

$$Q_{н.уч} = \frac{q_2 (Ut)}{l_\phi} \Delta h_{св}. \quad (10)$$

6. При подстановке (7) и (10) в (3) получим

$$U\Omega = \frac{q_2 (Ut)}{l_\phi} \Delta h_{св} + k_{обс} \cdot \omega_{обс} \left(\frac{(l_\phi - Ut) + H + (\Delta h_{н.тр} + \Delta h_{св})}{\delta_{св}} \right)^{0.5}. \quad (11)$$

7. Найдем выражения для $\Delta h_{н.тр}$ и $\Delta h_{св}$ с целью вычисления промывной скорости в порах гравийной обсыпки $v'_{обс}$ по выражению (9).

Для этого вычтем из уравнения (8) уравнение (11) и выразим $\Delta h_{св}$:

$$\Delta h_{\text{св}} = \frac{\left(\frac{\Omega}{t} + \frac{q_1(I_{\text{ф}} - Ut)}{I_{\text{ф}}} \right) I_{\text{ф}}}{q_2(Ut)} \Delta h_{\text{н.тр}} = A \Delta h_{\text{н.тр}}, \quad (12) \quad \text{где } A = \frac{\left(\frac{\Omega}{t} + \frac{q_1(I_{\text{ф}} - Ut)}{I_{\text{ф}}} \right) I_{\text{ф}}}{q_2(Ut)}.$$

Подставив выражение (12) в уравнение (11), получим

$$U\Omega = \frac{q_2(Ut)}{I_{\text{ф}}} A \Delta h_{\text{в}} + k_{\text{обс}} \cdot \omega_{\text{обс}} \left(\frac{(I_{\text{ф}} - Ut) + H + (\Delta h_{\text{в}} + A \Delta h_{\text{в}})}{\delta_{\text{св}}} \right)^{0.5}, \quad (13)$$

После преобразования уравнения (13) имеем квадратное уравнение относительно $\Delta h_{\text{н.тр}}$

$$a \Delta h_{\text{н.тр}}^2 - b \Delta h_{\text{н.тр}} + c = 0, \quad (14)$$

$$\text{где } a = \frac{q_2^2(Ut)^2}{I_{\text{ф}}^2} A^2;$$

$$b = - \left(k_{\text{обс}}^2 \omega_{\text{обс}}^2 \left(\frac{1+A}{\delta_{\text{св}}} \right) + 2U\Omega \cdot \frac{q_2(Ut)}{I_{\text{ф}}} A \right);$$

$$c = (U\Omega)^2 - k_{\text{обс}}^2 \omega_{\text{обс}}^2 \left(\frac{I_{\text{ф}} - Ut + H}{\delta_{\text{св}}} \right).$$

Уравнение (14) имеет два корня. Нас интересует корень, удовлетворяющий условию $0 < \Delta h_{\text{н.тр}} < I_{\text{ф}}$.

8. Вычисления производим в следующей последовательности.

Подъем уровня воды $\Delta h_{\text{н.тр}}$ в надфильтровой трубе находим из уравнения (14). Понижение напора $\Delta h_{\text{св}}$ под свабой определяем из выражения (12). Величину промывной скорости $v'_{\text{обс}}$ находим по выражению (9).

$$a = \frac{0,0011^2 (0,3 \cdot 20)^2}{9^2} 1,727^2 = 1,604 \cdot 10^{-6},$$

$$b = - \left(0,00023^2 \cdot 0,037^2 \left(\frac{1+1,727}{0,1} \right) + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,018 \cdot \frac{0,0011(0,3 \cdot 20)}{9} 1,727 \right) = -1,368 \cdot 10^{-5},$$

$$c = (0,3 \cdot 0,018)^2 - 0,00023^2 \cdot 0,037^2 \cdot \left(\frac{9 - 0,3 \cdot 20 + 30}{0,1} \right) = 2,914 \cdot 10^{-5}$$

Тогда уравнение (14) имеет вид

$$0,1604 \Delta h_{\text{н.тр}}^2 - 1,368 \Delta h_{\text{н.тр}} + 2,914 = 0.$$

Откуда получим $\Delta h_{\text{н.тр}} = 4,122$ м.

$$v_{\text{обс}} = 0,00023 \left(\frac{(9 - 0,3 \cdot 20) + 30 + (4,122 + 7,120)}{0,1} \right)^{0.5} = 0,0048 \text{ м/с},$$

Промывную скорость в порах гравийной обсыпки найдем по формуле (9)

$$v'_{\text{обс}} = \frac{0,0048}{0,25} = 0,019 \text{ м/с} = 1,9 \text{ см/с}.$$

На рисунке 2 представлены графики зависимости промывной скорости в порах гравийной обсыпки $v'_{\text{обс}}$ от положения свабы при различных скоростях его рабочего хода.

Анализ характера кривых $v'_{\text{обс}} = f(z)$ показал, что промывная скорость в порах обсыпки $v'_{\text{обс}}$ уменьшается по экспоненциальной зависимости с увеличением высоты подъема свабы z в фильтре. Сравнительно быстрое снижение промывных скоростей (почти в три раза) характерно для нижней четверти фильтра. На остальной части фильтра темп снижения промывной скорости замедляется. Такой

Рассмотрим пример расчета.

Пример расчета

Исходные данные: высоту столба воды над верхом фильтра $H = 30$ м; фильтр трубчатый с проволоочной обмоткой из нержавеющей стали ТП-6Ф2В с наружным диаметром 188 мм, внутренним диаметром $d_{\text{ф}} = 152$ мм, длина фильтра $l_{\text{ф}} = 9$ м; глубина статического уровня $H_{\text{ст}} = 10$ м; скорость движения свабы $U = 0,3$ м/с; толщина слоя обсыпки $t_{\text{обс}} = 0,05$ м, наружный диаметр контура обсыпки $d_{\text{обс}} = 0,288$ м; толщина манжеты свабы $\delta_{\text{св}} = 0,1$ м; диаметр манжеты свабы $d_{\text{св}} = d_{\text{ф}} = 152$ мм, площадь манжеты свабы $\Omega = 0,018$ м²; коэффициент фильтрации обсыпки $k_{\text{обс}} = 20$ м/сут = $0,00023$ м/с, коэффициент пористости обсыпки $n = 0,25$; коэффициент приемистости и удельный дебит скважины равны между собой, $q_1 = q_2 = 4$ м²/ч = $0,0011$ м²/с.

Решение.

1) Задаём $z = 6$ м, тогда время подъема свабы на эту отметку составит

$$t = \frac{z}{U} = \frac{6}{0,3} = 20 \text{ с}.$$

2) Определяем величину коэффициента A из выражения (12)

$$A = \frac{\left(\frac{0,018}{20} + \frac{0,0011(9 - 0,3 \cdot 20)}{9} \right) \cdot 9}{0,0011 \cdot (0,3 \cdot 20)} = 1,727.$$

3) Находим значения коэффициентов, входящих в уравнение (14)

Тогда, согласно (12), $\Delta h_{\text{св}} = 1,727 \cdot 4,122 = 7,120$ м.

4) Находим скорость движения жидкости через сечение обсыпки с учетом выражения (7):

характер изменения промывной скорости $v'_{\text{обс}}$ при подъеме свабы объясняется снижением значения градиента фильтрации l , обусловленного ростом множителя $U \cdot t$ и уменьшением значения $\Delta h_{\text{св}}$.

С ростом скорости подъема свабы U в диапазоне от 0,3 до 0,9 м/с происходит увеличение промывных скоростей в 1,1–1,5 раза. Наибольшая степень роста промывных скоростей наблюдается в нижней части фильтра.

Достиженные значения промывных скоростей $v'_{\text{обс}} = (1,8–7,5)$ см/с при минимальной скорости подъема свабы $U = 0,3$ м/с обеспечивают создание условий для выноса фильтрационным потоком мелких частиц колыманта из пор гравийной обсыпки и увеличения ее проницаемости.

Графики зависимости промывной скорости в порах обсыпки $v'_{\text{обс}}$ от положения свабы при скорости подъема свабы $U = 0,3$ м/с при различных глубинах воды над верхом фильтра H ($1 - H = 30$ м, $2 - H = 60$ м, $3 - H = 90$ м) представлены на рисунке 3.

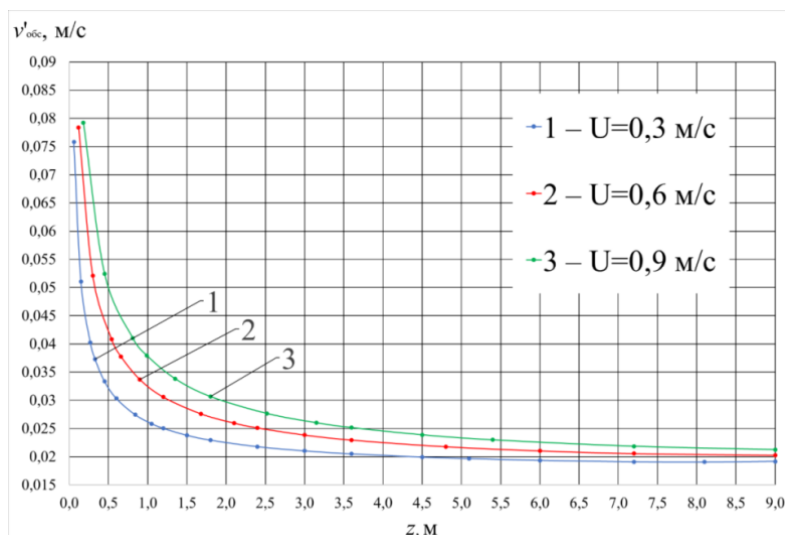


Рисунок 2 – Графики зависимости промывной скорости в порах обсыпки от положения сваба в фильтре скважины $v'_{обс} = f(z)$ при различных скоростях его рабочего хода (1 – $U = 0,3$ м/с, 2 – $U = 0,6$ м/с, 3 – $U = 0,9$ м/с)

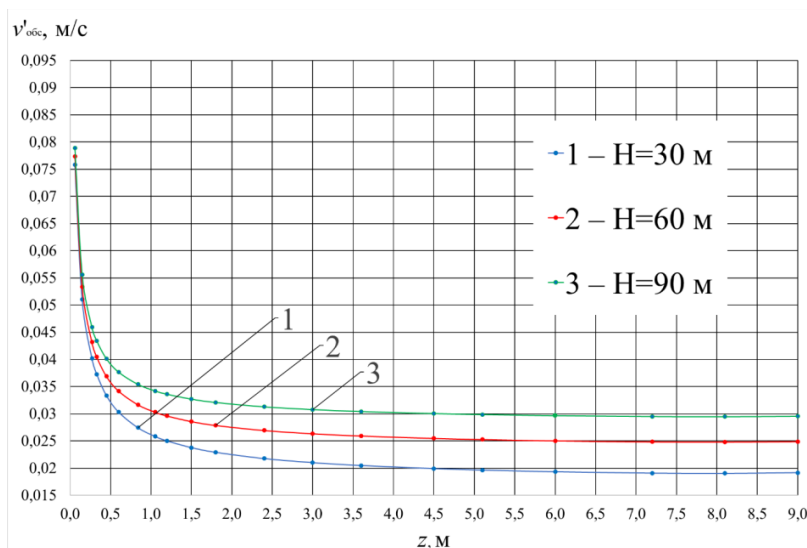


Рисунок 3 – Графики зависимости скорости движения жидкости в порах обсыпки $v'_{обс}$ от положения сваба при скорости подъема сваба $U = 0,3$ м/с при различных глубинах воды над верхом фильтра H (1 – $H = 30$ м, 2 – $H = 60$ м, 3 – $H = 90$ м)

Анализ графиков показал, что с увеличением глубины H в диапазоне от 30 до 90 м происходит рост промывных скоростей в среднем в 1,5 раза при неизменной скорости подъема сваба. Это достигается ростом градиента фильтрации I с увеличением глубины H .

Выводы

1. Проведенный анализ применения способа свабирования в водозаборных скважинах показал, что этот способ широко применяется для освоения водозаборных скважин после бурения с целью удаления оставшейся на прифильтровой поверхности пласта глинистой корки, механических примесей из прифильтровой зоны и фильтра. Отмечено, что этот способ может также применяться для регенерации снизивших дебит скважин в процессе эксплуатации, фильтры которых закольматированы рыхлыми отложениями. В этом случае он может использоваться как самостоятельный способ регенерации. Для регенерации длительно эксплуатирующихся скважин, закольматированных прочными отложениями, способ свабирования можно применять как завершающий этап комплексной импульсно-реагентной обработки, для удаления остаточных отложений из прифильтровой зоны скважин. Указано на отсутствие теоретических исследований, позволяющих рассчитать гидравлические параметры промывных фильтрационных потоков при свабировании в зависимости от геометрических размеров водоза-

борных скважин, гидрогеологических условий их эксплуатации и технологических параметров обработки.

2. Разработана расчетная схема движения фильтрационных потоков в прифильтровой зоне водозаборной скважины при свабировании.

Предложена методика гидравлического расчета скорости промывного фильтрационного потока в порах гравийной обсыпки, которая предусматривает решение системы уравнений баланса воды в стволе и прифильтровой зоне скважины при рабочем ходе сваба. Методика позволяет получить значения промывной скорости в зависимости от скорости движения сваба, геометрических размеров скважины и ее гидравлических характеристик. Установлено, что промывная скорость в порах обсыпки $v'_{обс}$ уменьшается по экспоненциальной зависимости с увеличением высоты подъема сваба z в фильтре и возрастает с увеличением глубины воды H над верхом фильтра и скорости U сваба.

Приведен пример расчета свабирования скважины диаметром 150 мм. С ростом скорости подъема сваба U в диапазоне от 0,3 до 0,9 м/с произошло увеличение промывных скоростей в 1,1–1,5 раза. Наибольшая степень роста промывных скоростей наблюдается в нижней части фильтра.

Достижение значений промывных скоростей в диапазоне $v'_{обс} = (1,8–7,5)$ см/с (при минимальной скорости подъема сваба

$U = 0,3$ м/с) обеспечивает создание достаточных условий для выноса фильтрационным потоком мелких частиц колыманта из пор гравийной обсыпки и увеличения ее проницаемости.

Показано что с увеличением глубины H в диапазоне от 30 до 90 м происходит рост промывных скоростей в среднем в 1,5 раза при неизменной скорости подъема свабы. Это достигается ростом градиента фильтрации i с увеличением глубины H .

Список цитированных источников

1. Тугай, А. М. Эксплуатация и ремонт систем артезианского водоснабжения / А. М. Тугай, И. Т. Прокопчук. – Киев : Будивельник, 1988. – 176 с.
2. Алексеев, В. С. Учебная книга мастера по ремонту скважин на воду / В. С. Алексеев, Г. А. Волоховский, В. Т. Гребенников. – М. : Колос, 1983. – 255 с.
3. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду / В. В. Дубровский, М. М. Керченский, В. И. Плохов [и др.]. – М. : Недра, 1972. – 512 с.
4. Тугай, А. М. Водоснабжение из подземных источников : справочник / А. М. Тугай, И. Т. Прокопчук. – Киев : Урожай, 1990. – 264 с.
5. Квашнин, Г. П. Технология вскрытия и освоения водоносных пластов / Г. П. Квашнин. – М. : Недра, 1987. – 247 с.
6. Sterrett, R. J. Groundwater and wells : a comprehensive guide for the design, installation and maintenance of a water well / R. J. Sterrett. – 3rd ed. – New Brighton : Johnson screens, 2007. – 798 p.
7. Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells / L. Aller, R. J. Petty, J. H. Lehr [et al.]. – Las Vegas : U.S. Environmental Protection Agency, 1991. – 221 p.
8. Морозов, Э. А. Справочник по эксплуатации и ремонту водозаборных скважин / Э. А. Морозов, А. В. Стецюк. – Киев : Будівельник, 1984. – 96 с.
9. Ahmed, N. Hydraulics of Wells Design, Construction, Testing, and Maintenance of Water Well Systems / N. Ahmed, S.W. Taylor, Z. Sheng. – Reston : American Society of Civil Engineers, 2014. – 498 p.
10. Shuter, E. Techniques of Water-Resource Investigations of the United States Geological Survey : in 2 books / Department of the interior, U.S. Geological survey. – Washington : U.S. Government Printing Office, 1989. – Book 2 : Chapter F1 Application of drilling, coring, and sampling techniques to test holes and wells / E. Shuter, W. E. Teasdale. – Book 2. Chapter F1. Drilling and Construction of Water Wells / U.S. Geological Survey. – 97 p.
11. Ground Water Manual : a guide for the investigation, development, and management of ground-water resources / W.T. Moody, R. E. Glover, R.W. Ribbens [et al.]. – U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. – 2nd ed. – Denver : U.S. Government Printing Office, 1995. – 580 p.
12. Башкатов, Д. Н. Справочник по бурению скважин на воду / Д. Н. Башкатов, В. Я. Вальдман, Г. П. Квашнин ; под ред. Д. Н. Башкатова. – М. : Недра, 1979. – 500 с.
13. Валовский, В. М. Техника и технология свабирования скважин / В. М. Валовский, К. В. Валовский. – М. : ОАО «ВНИИОЭГ», 2003. – 396 с.
14. Мордвинов, А. А. Освоение эксплуатационных скважин : учебное пособие / А. А. Мордвинов. – Ухта : УГТУ, 2004. – 107 с.
15. Реагентная декольматация водозаборных скважин методом свабирования в замкнутых камерах / В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко, Ю. А. Медведева [и др.] // Мелиорация. – 2018. – № 2 (84). – С. 20–27.
16. Медведева, Ю. А. Расчет режимов регенерации водозаборной скважины методом линейного свабирования / Ю. А. Медведева, И. Е. Амелишко, В. В. Ивашечкин // Мелиорация. – 2023. – № 1. – С. 31–38.
17. Патент ВУ 16996, МПК E03B 3/15 (2006.01). Устройство для реагентной обработки скважины на воду : № а 20101725 : заявлено 01.12.2010 : опубликовано 30.04.2013 / Автушко П. А., Ивашечкин В. В., Автушко А. В. ; заявитель Белорусский национальный технический университет. – 3 с.
18. List, J. Analysis of Development Methods for Gravel Envelope Wells / J. List. – Auckland : University of Auckland, 1985.
19. Справочное руководство гидрогеолога : в 2 т. / под ред. В. М. Максимова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Недра, 1979. – Т. 2 / С. П. Албул, В. Д. Бабушкин, Б. В. Боровский [и др.]. – 295 с.
20. Гордеев, П. В. Гидрогеология : учебник для геологоразведочных техникумов / П. В. Гордеев, В. А. Шемелина, О. К. Шулякова. – М. : Высшая школа, 1990. – 448 с.

References

1. Tugaj, A. M. Eksploatacyja i remont sistem artezijskogo vodosnabzheniya / A. M. Tugaj, I. T. Prokopchuk. – Kiev : Budivelnik, 1988. – 176 s.
2. Alekseev, V. S. Uchebnaya kniga mastera po remontu skvazhin na vodu / V. S. Alekseev, G. A. Volohovskij, V. T. Grebennikov. – M. : Kolos, 1983. – 255 s.
3. Spravochnik po bureniu i oborudovaniyu skvazhin na vodu / V. V. Dubrovskij, M. M. Kerchenskij, V. I. Plohov [i dr.]. – M. : Nedra, 1972. – 512 s.
4. Tugaj, A. M. Vodosnabzhenie iz podzemnyh istochnikov : spravochnik / A. M. Tugaj, I. T. Prokopchuk. – Kiev : Urozhaj, 1990. – 264 s.
5. Kvashnin, G. P. Tekhnologiya vskrytiya i osvoeniya vodonosnyh plastov / G. P. Kvashnin. – M. : Nedra, 1987. – 247 s.
6. Sterrett, R. J. Groundwater and wells : a comprehensive guide for the design, installation and maintenance of a water well / R. J. Sterrett. – 3rd ed. – New Brighton : Johnson screens, 2007. – 798 p.
7. Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells / L. Aller, R. J. Petty, J. H. Lehr [et al.]. – Las Vegas : U.S. Environmental Protection Agency, 1991. – 221 p.
8. Morozov, E. A. Spravochnik po eksploatacii i remontu vodozabornyh skvazhin / E. A. Morozov, A. V. Stecyuk. – Kiev : Budivelnik, 1984. – 96 s.
9. Ahmed, N. Hydraulics of Wells Design, Construction, Testing, and Maintenance of Water Well Systems / N. Ahmed, S.W. Taylor, Z. Sheng. – Reston : American Society of Civil Engineers, 2014. – 498 p.
10. Shuter, E. Techniques of Water-Resource Investigations of the United States Geological Survey : in 2 books / Department of the interior, U.S. Geological survey. – Washington : U.S. Government Printing Office, 1989. – Book 2 : Chapter F1 Application of drilling, coring, and sampling techniques to test holes and wells / E. Shuter, W. E. Teasdale. – Book 2. Chapter F1. Drilling and Construction of Water Wells / U.S. Geological Survey. – 97 p.
11. Ground Water Manual : a guide for the investigation, development, and management of ground-water resources / W.T. Moody, R. E. Glover, R.W. Ribbens [et al.]. – U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. – 2nd ed. – Denver : U.S. Government Printing Office, 1995. – 580 p.
12. Bashkatov, D. N. Spravochnik po bureniu skvazhin na vodu / D. N. Bashkatov, V. YA. Val'dman, G. P. Kvashnin ; pod red. D. N. Bashkatova. – M. : Nedra, 1979. – 500 s.
13. Valovskij, V. M. Tekhnika i tekhnologiya svabirovaniya skvazhin / V. M. Valovskij, K. V. Valovskij. – M. : ОАО «ВНИИОЭГ», 2003. – 396 s.
14. Mordvinov, A. A. Osvoenie eksploatatsionnyh skvazhin : uchebnoe posobie / A. A. Mordvinov. – Uhta : UGTU, 2004. – 107 s.
15. Reagentnaya dekol'matatsiya vodozabornyh skvazhin metodom svabirovaniya v zamknutyh kamerah / V. V. Ivashechkin, A. M. Shejko, YU. A. Medvedeva [i dr.] // Melioratsiya. – 2018. – № 2 (84). – S. 20–27.
16. Medvedeva, YU. A. Raschet rezhimov regeneracii vodozabornoj skvazhiny metodom linejnogo svabirovaniya / YU. A. Medvedeva, I. E. Amelishko, V. V. Ivashechkin // Melioratsiya. – 2023. – № 1. – S. 31–38.
17. Patent BY 16996, MPK E03B 3/15 (2006.01). Ustrojstvo dlya reagentnoj obrabotki skvazhiny na vodu : № а 20101725 : zayavleno 01.12.2010 : opublikovano 30.04.2013 / Avtushko P. A., Ivashechkin V. V., Avtushko A. V. ; zayavitel' Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet. – 3 s.
18. List, J. Analysis of Development Methods for Gravel Envelope Wells / J. List. – Auckland : University of Auckland, 1985.
19. Spravochnoe rukovodstvo gidrogeologa : v 2 t. / pod red. V. M. Maksimova. – 3-e izd., pererab. i dop. – Leningrad : Nedra, 1979. – T. 2 / S. P. Albul, V. D. Babushkin, B. V. Borevskij [i dr.]. – 295 s.
20. Gordeev, P. V. Gidrogeologiya : uchebnik dlya geologorazvedochnykh tekhnikumov / P. V. Gordeev, V. A. SHe melina, O. K. SHulyakova. – M. : Vysshaya shkola, 1990. – 448 s.

Материал поступил 09.07.2026, одобрен 14.07.2026, принят к публикации 15.07.2026

УДК 624.012.35(043.3)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ИЗ КЕРАМЗИТОБЕТОНА С ПОПЕРЕЧНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

П. В. Кривицкий¹, А. А. Невдах²

¹ К. т. н., доцент, заведующий отраслевой лабораторией «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве», Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: krivitskiy@mail.ru

² Младший научный сотрудник отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве», Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: alina.nevdah@mail.ru

Реферат

В статье рассматриваются результаты оценки применимости современных методик расчета сопротивления срезу при действии поперечных сил железобетонных балок из конструкционного керамзитобетона с поперечным армированием. Актуальность темы обусловлена широкими перспективами применения лёгких бетонов в несущих конструкциях, сочетая в себе характеристики ограждающих конструкций. При этом тема остается недостаточно изученной: отсутствуют расчётные методики, учитывающие особенности структуры легких бетонов. Структура лёгкого бетона, обусловленная наличием пористого заполнителя, предопределяет особенности его работы при действии поперечных сил.

Выполнен обзор исследований конструкционного керамзитобетона, включая вклад отечественной научной школы в изучение его физико-механических свойств и в развитие методов расчёта железобетонных конструкций, в частности сопротивления срезу. Систематизированы расчётные модели сопротивления срезу, заложенные в отечественных и зарубежных нормативных документах, отмечены способы учета особенностей лёгкого бетона. Сформирована обширная экспериментальная база результатов испытаний балочных образцов из лёгких бетонов, из которой по ряду основных критериев выделена целевая выборка балок с поперечным армированием из керамзита или близких ему по свойствам пористых заполнителей. Выполнен расчёт отобранных образцов по различным методикам с последующей статистической обработкой результатов. Данный расчет позволил оценить степень соответствия нормативных моделей экспериментальным данным и выявить особенности их применения к конструкциям из легких бетонов. По итогам анализа обоснована необходимость дальнейшего изучения влияния основных конструктивных и физико-механических параметров на сопротивление керамзитобетонных балок срезу. Обоснована необходимость применения численного моделирования, в частности применения программного комплекса SIMULIA Abaqus и натурного эксперимента.

Ключевые слова: керамзитобетон, легкий бетон, бетон нормального веса, сопротивление срезу, поперечное армирование, методики расчета, экспериментальная база данных.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF THE SHEAR RESISTANCE OF REINFORCED EXPANDED-CLAY CONCRETE BEAMS WITH TRANSVERSE REINFORCEMENT

P. V. Krivitskiy, A. A. Nevдах

Abstract

The article examines the results of assessing the applicability of current methods for calculating the shear resistance under transverse forces of reinforced concrete beams made of structural expanded-clay concrete with transverse reinforcement. The relevance of the topic stems from the broad prospects for the use of lightweight concretes in load-bearing structures, which at the same time combine the characteristics of enclosing structures. However, the topic remains insufficiently studied: there are no design methods that account for the structural features of lightweight concretes. The structure of lightweight concrete, determined by the presence of porous aggregate, governs the specific features of its behaviour under transverse forces.

A review of research on structural expanded-clay concrete is carried out, including the contribution of the national scientific school to the study of its physical and mechanical properties and to the development of methods for calculating reinforced concrete structures, in particular shear resistance. The design models of shear resistance embodied in domestic and foreign normative documents are systematized, and the ways of accounting for the features of lightweight concrete are noted. An extensive experimental database of test results for beam specimens made of lightweight concretes has been compiled, from which, according to a number of principal criteria, a target sample of beams with transverse reinforcement made of expanded clay or porous aggregates similar to it in properties has been selected. The selected specimens were calculated by various methods with subsequent statistical processing of the results. This calculation made it possible to assess the degree of agreement between the normative models and the experimental data and to identify the features of their application to lightweight concrete structures. Based on the analysis, the need for further study of the influence of the principal structural and physical-mechanical parameters on the shear resistance of expanded-clay concrete beams is substantiated. The need for applying numerical modelling, in particular the use of the SIMULIA Abaqus software package, and a full-scale experiment is justified.

Keywords: expanded-clay concrete, lightweight concrete, normal-weight concrete, shear resistance, transverse reinforcement, design methods, experimental database.

Введение

Керамзит – это обжиговый материал с большим количеством замкнутых пор, обладающий достаточной прочностью для применения в несущих конструкциях. Конструкционный керамзитобетон представляет собой достойную альтернативу бетону нормального веса в промышленном и гражданском строительстве. Конструкционный керамзитобетон – это бетон, используемый в несущих и ограждающих конструкциях зданий, сооружений и обеспечивающий, главным образом,

прочность, жесткость, трещиностойкость конструкций. Высокопрочный керамзитобетон наиболее широко применяется для изготовления крупноразмерных и большепролетных конструкций.

Легкий бетон является сложным многофункциональным материалом, который должен иметь плотную, сплошную структуру, минимальную плотность, достаточную прочность, чтобы обеспечить требуемую несущую способность, а также отличаться повышенной устойчивостью к воздействиям атмосферных осадков. Применение

Строительство

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-140-2-15-22>

пористого заполнителя обеспечивает целый ряд преимуществ: снижение собственного веса конструкций; уменьшение нагрузки на другие нижележащие конструкции и материалоемкость каркаса в целом; улучшение теплоизоляционных характеристик, что делает несущие и ограждающие элементы более энергоэффективными. В Республике Беларусь наибольшее распространение получило производство керамзитового гравия с высокими физико-механическими свойствами и характеристиками. Налаженное производство качественного керамзита на отечественных предприятиях создаёт предпосылки для расширения области применения керамзитобетона.

Современная нормативная база, регламентирующая применение конструкционного бетона в Республике Беларусь, основана на СТБ 2674-2025 «Бетоны конструкционные» [1] и СТБ 1187-2020 «Бетоны легкие» [2].

Специалистами РУП «Институт БелНИИС» были подготовлены рекомендации по подбору составов, изготовлению и применению модифицированных конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонов [3] (руководитель разработки – к. т. н. Н. С. Протыко), обобщающие результаты исследований физико-механических характеристик материалов от различных заводов-изготовителей Республики Беларусь. Данное практическое руководство использовалось при разработке составов и испытаниях опытных образцов ряда последующих исследований.

Значительный вклад в изучение технологии и свойств лёгких бетонов внёс С. М. Ицкович, чьи работы о крупнопористом бетоне [4] и заполнителях для бетона [5] заложили основу для дальнейших исследований конструкционных бетонов на пористых заполнителях.

Исследования физико-механических свойств конструкционного керамзитобетона белорусского производства наиболее полно представлены в работах научной группы под руководством д. т. н., профессора С. Д. Семенюка. С 2012 года коллективом была сформирована экспериментальная база по прочностным и деформативным характеристикам керамзитобетонов на основе сырья отечественных заводов. В частности, Э. А. Кетнером и С. Д. Семенюком проведены испытания шести серий образцов классов LC 8/10–LC 30/33, изготовленных с применением керамзита производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукмоль», ЗАО «Лидский керамзитовый завод» и ОАО «Петриковский керамзитовый завод»: определены коэффициенты цилиндрической и призмной прочности, модули продольных, поперечных и сдвиговых деформаций [6]. В работе С. Д. Семенюка и В. А. Ржевуцкой [7] исследовано влияние состава заполнителя на прочность и деформативность керамзитобетона при кратковременном центральном сжатии, установлены пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования и коэффициент Пуассона.

Ряд работ коллектива посвящён вопросу оценки усадочных деформаций армированного керамзитобетона. С. Д. Семенюком, Ю. Г. Москальковой и В. А. Ржевуцкой исследованы особенности

стесненной усадки керамзитожелезобетона [8]; в смежной работе Ю. Г. Москальковой и В. А. Ржевуцкой выполнен сравнительный анализ расчётных моделей полной усадки лёгкого бетона применительно к керамзитобетону [9].

Существенный вклад в развитие методов расчёта железобетонных конструкций, в частности сопротивления срезу, внесли отечественные исследователи. Определяющую роль сыграли профессора Т. М. Пецольд и В. В. Тур, под руководством которых разработан СНБ 5.03.01-02 [10]. Также итогом их совместной работы стало учебное пособие с изложением деформационной модели расчёта прочности элементов при действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил [11]. Опыт перехода к проектированию по европейским нормам обобщён в работах профессора Н. А. Рак [12]. Огромный вклад по расчёту железобетонных элементов на действие поперечных сил внесли исследования профессора О. А. Рочника [13], также существенный вклад в разработку расчётных моделей прочности, трещиностойкости и деформативности железобетонных конструкций внесли Н. П. Блещик, Д. Н. Лазовский и В. Н. Деркач.

Отдельное направление отечественных исследований составляет сопротивление железобетонных элементов действию поперечных сил. Этим вопросам посвящены работы В. Н. Малиновского – в том числе по работе элементов с отогнутой арматурой и по расчёту наклонных сечений [14], – а также исследования П. В. Образцова и Н. Н. Яромича. Также В. В. Бондарем совместно с Н. А. Раком проведены исследования в области сопротивления местному сжатию элементов из лёгкого бетона, в частности керамзитобетона [15].

Таким образом, отечественными учёными заложена теоретическая и экспериментальная основа в области свойств конструкционного керамзитобетона и его нормирования. Вместе с тем, специфическая структура керамзитобетона, обусловленная наличием пористого заполнителя, предполагает особенности его работы при действии поперечных сил. Поведение простых разрезных однопролетных балок из данного материала при срезе, в частности, сопротивление элементов с поперечным армированием, остаётся недостаточно изученным, что и определяет актуальность настоящего исследования.

Расчётные модели сопротивления срезу

Действующие отечественные и зарубежные нормы учитывают особенности лёгких бетонов преимущественно через систему понижающих коэффициентов и ограничений прочности, привязанных к плотности или прочности материала. В предшествующей работе [16] был выполнен развёрнутый обзор расчётных моделей определения прочности наклонных сечений железобетонных элементов, представленных в нормативной литературе. В таблице 1 приведена систематизация рассматриваемых документов с указанием типа расчётной модели и способа учёта особенностей лёгкого бетона.

Таблица 1 – Расчётные модели сопротивления срезу и учёт особенностей лёгкого бетона

Нормативный документ	Тип расчётной модели	Учёт особенностей лёгкого бетона
СП 5.03.01-2020 [17], ТКП EN 1992-1-1-2009 [18]	Ферменная аналогия	Понижающий коэффициент ν_x в зависимости от плотности и прочности; замена f_{ck}
СНиП 2.03.01-84 [19], СП 63.13330.2018 [20]	Предельного равновесия	Коэффициенты ϕ_{b2} и ϕ_{b3} , дифференцированные по марке средней плотности (D1800 и менее / D1900 и более)
fib Bulletin 56: Model Code 2010 [21]	MCFT, уровни аппроксимации II–III	Замена f_{ck} на сниженное значение согласно fib Bulletin 55 [22]
fib Model Code 2020 [23]	MCFT, уровни аппроксимации IIa–IIb	Замена f_{ck} ; коэффициент шероховатости критической трещины $k_{atg} = 2,0$ для лёгкого бетона
ACI 318-19 [24]	Полуэмпирическая	Коэффициент модификации $\lambda = 0,75$ для лёгкого бетона
BS 8110-1:1997 [25]	Эмпирическая	Ограничение расчётного напряжения среза ν_c до 0,8 от табличного значения; значения для лёгкого бетона по BS 8110-2:1985 [26]
CSA A23.3-04 [27]	MCFT (упрощённая)	Коэффициент модификации плотности $\lambda = 0,75 - 0,85$
JSCE №15 [28]	Эмпирическая	Расчётная прочность принимается равной 70% от прочности бетона нормального веса при отсутствии фактических данных
NZC 3101-1 [29]	Эмпирическая	Замена $\sqrt{f_c}$ через среднюю прочность на растяжение либо коэффициент 0,75-0,85 $\sqrt{f_c}$; для бетонов по NZS 3152:1974 [30]

Рассмотренные методики различаются особенностями учета конструктивных и физико-механических параметров, определяющих сопротивление наклонного сечения срезу. К числу ключевых параметров относятся прочность легкого бетона на сжатие f_{lk} , пролет среза a/d , рабочая высота сечения d , коэффициент продольного армирования ρ_s и коэффициент поперечного армирования ρ_{sv} .

Следует отметить, что данные расчетные модели в большинстве своем не учитывают состав легкого бетона, тип заполнителя и ограничиваются лишь применением понижающих коэффициентов или ограничением прочности легкого бетона.

База экспериментальных данных

На данном этапе работы была сформирована обширная база данных результатов экспериментальных исследований балочных образцов из легких бетонов, выполненных зарубежными и отечественными авторами [31–39], представленная в таблице 2. В неё вошли железобетонные балки на различных видах легких крупных заполнителей (керамзит, вспученный сланец, вспученный доменный шлак и др.), отличающиеся схемами армирования, геометрическими характеристиками сечения и типом нагружения. Все образцы имели прямоугольное поперечное сечение.

Таблица 2 – Распределение различных параметров в железобетонных балках из легкого бетона

b , мм	Range	≤ 50	50...100	100...150	150...200	200...250	250...300	> 300	–	Всего
	ALWC	–	–	–	26	–	–	–	–	26
	SLWC	–	24	35	29	1	–	6	–	95
d , мм	Range	≤ 100	100...200	200...300	300...400	400...500	> 500	–	–	Всего
	ALWC	–	–	22	4	–	–	–	–	26
	SLWC	24	1	26	38	6	–	–	–	95
a/d	Range	$\leq 2,0$	2,0...2,5	2,5...3,0	3,0...3,5	3,5...4,0	4,0...4,5	4,5...5,0	$> 5,0$	Всего
	ALWC	1	4	–	20	–	–	1	–	26
	SLWC	23	40	9	18	1	–	4	–	95
ρ_s , %	Range	$\leq 0,5$	0,5...1,0	1,0...2,0	2,0...3,0	3,0...4,0	4,0...5,0	$> 5,0$	–	Всего
	ALWC	–	–	3	15	–	8	–	–	26
	SLWC	–	4	47	16	24	4	–	–	95
ρ_{sv} , %	Range	0	0...0,25	0,25...0,5	0,5...0,75	0,75...1,0	1,0...1,5	$> 1,5$	–	Всего
	ALWC	–	–	–	–	–	–	–	–	0
	SLWC	91	2	13	9	2	2	2	–	121
f_{cm} , МПа	Range	≤ 10	10...20	20...30	30...40	40...50	50...60	60...70	> 70	Всего
	ALWC	–	–	12	9	2	2	–	1	26
	SLWC	–	26	21	11	33	4	–	–	95

Примечание – ALWC – all-lightweight concrete (полностью легкий бетон) – состоит из легких заполнителей, как для крупного, так и мелкого заполнителя;

SLWC – sand-lightweight concrete (легкий бетон с песком) – включает легкий крупный заполнитель; обычный мелкий заполнитель (песок).

Поскольку предметом настоящего исследования является работа балок из керамзитобетона с поперечным армированием, из общего массива данных в итоговую базу (таблица 3) включены образцы с учётом совокупности факторов, обеспечивающих сопоставимость образцов с предметом исследования [31–33]. Основным критерием

служило наличие поперечного армирования, но также учитывались состав бетона, схема нагружения, характер разрушения и полнота приведённых в источнике данных. База данных предназначена для оценки применимости расчётных моделей к железобетонным балкам из керамзитобетона с поперечным армированием.

Таблица 3 – Распределение ключевых параметров в базе экспериментальных данных

Параметр	Обозначение	Диапазон значений
Высота сечения	h	120...400 мм
Рабочая высота	d	100...362 мм
Относительный пролет среза	a/d	2,0...4,0
Прочность бетона на сжатие	f_{cm}	13,9...52,3 МПа
Кэф. продольного армирования	ρ_s	1,75...3,85 %
Кэф. поперечного армирования	ρ_{sv}	0,10...0,90 %

Статистическая оценка расчетных моделей

Сформированная база экспериментальных данных послужила основой для валидации существующих нормативных и теоретических моделей сопротивления срезу железобетонных балок с поперечным армированием.

Валидация проводилась путем сопоставления экспериментальных значений перерезывающей силы при разрушении (V_{Exp}) с расчетными значениями (V_{Rd}), полученными по пяти различным моде-

лям (ТКП EN 1992-1-1-2009 [18], СП 5.03.01-2020 [17], Model Code 2010 [21], Model Code 2020 [23] и СП 63.13330.2018 [20]).

Все расчёты выполнены по средним, фактически измеренным в эксперименте прочностям бетона и арматуры при частных коэффициентах безопасности $\gamma_c = \gamma_s = 1$. Это убирает заложенный в нормы проектный запас и позволяет оценивать точность самой модели. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Экспериментальные и расчетные значения сопротивления срезу отобранных образцов из экспериментальной базы

Источник	Эксперимент 1 – Аль-Хужейри Х.М. [31]	Эксперимент 2 – С. Li et al. [32]	Эксперимент 3 – М. Medhlohm [33]
Кол-во образцов	12	10	6
V_{Exp} , кН	19,5–30,0	156,0–201,0	33,0–77,0
V_{Rd} по ТКП EN 1992-1-1-2009 [15]	14,89–22,50	58,63–96,03	19,33–35,15
V_{Rd} по СП 5.03.01-2020 [14]	13,59–19,74	58,63–96,03	19,33–35,15
V_{Rd} по Model Code 2010 [18]	18,71–28,81	89,59–97,83	21,37–27,29
V_{Rd} по Model Code 2020 [20]	15,55–23,67	88,50–95,80	20,50–26,46
V_{Rd} по СП 63.13330.2018 [17]	24,72–36,96	222,90–322,21	59,75–68,71

Статистическая обработка выполнена по приложению Г СН 2.01.01-2022 [40]. Для каждого образца сопоставляются экспериментальное сопротивление r_e (соответствует V_{Exp}) и прогнозируемое значение r_i , вычисленное по функции сопротивления соответствующей нормы $g_n(X)$ (соответствует V_{Rd}). Для каждой модели вычислялись средний поправочный коэффициент b , характеризующий систематическое смещение модели, значение вектора ошибки для каждого образца δ_i , коэффициент вариации погрешности V_δ и угол систематического отклонения $\theta = \arctg b$ (при $\theta > 45^\circ$ ($b > 1$) модель недооценивает несущую способность; при $\theta < 45^\circ$ – напротив,

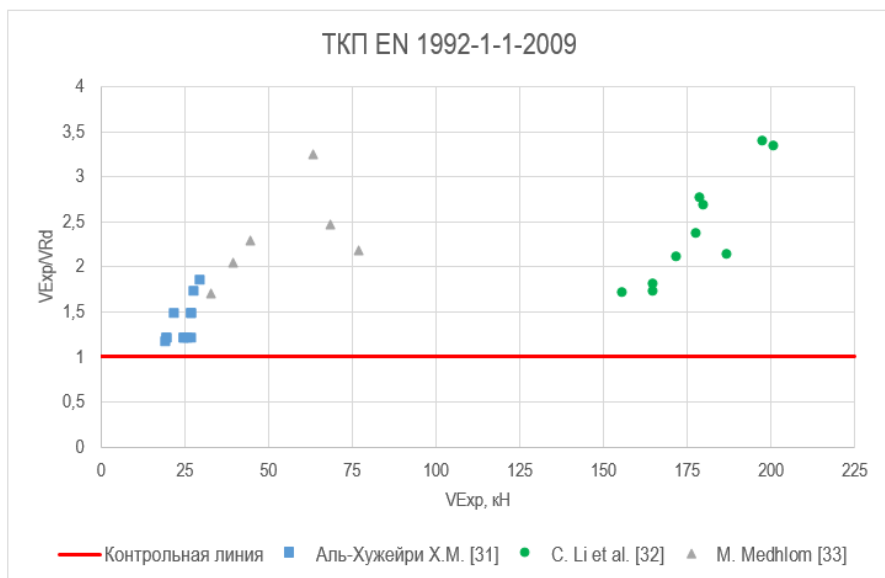
переоценивает. Дополнительно для каждой нормы вычислено среднее отношение $\bar{\lambda} = V_{Exp}/V_{Rd}$. Показатели рассчитаны по всему массиву отобранных образцов, результаты сведены в таблицу 5.

На рисунках 1-3 отношение $\lambda = V_{Exp}/V_{Rd}$ показано в зависимости от уровня экспериментальной поперечной силы V_{Exp} для каждой из рассмотренных норм. Горизонтальная контрольная линия $\lambda = 1$ отвечает точному совпадению расчёта с экспериментом и разделяет две качественно разные области – область запаса ($\lambda > 1$) и область переоценки ($\lambda < 1$).

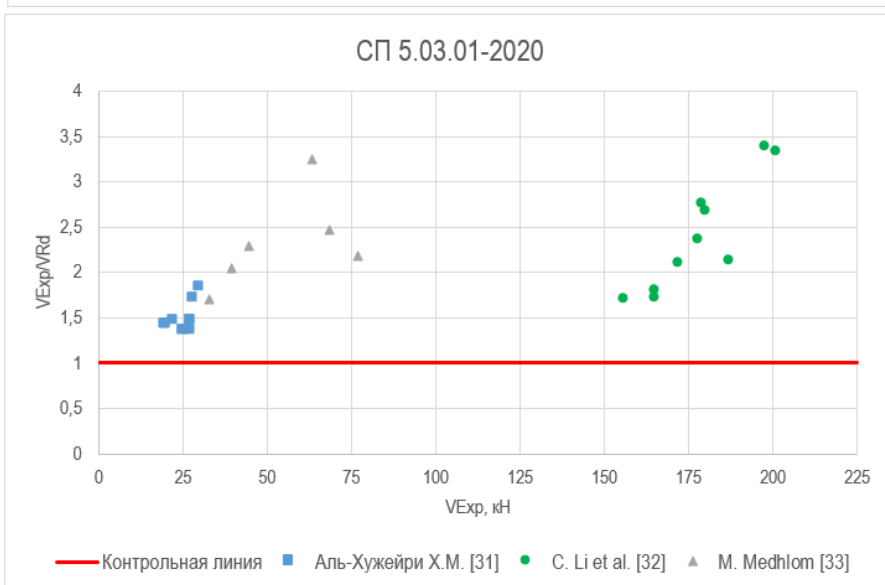
Таблица 5 – Статистические показатели соответствия расчётных моделей опытным данным

Нормативный документ	n	b	θ	V_δ	$\bar{\lambda}$	COV(λ)
ТКП EN 1992-1-1-2009 [18]	28	2,157	65,12°	0,350	1,94	35,09 %
СП 5.03.01-2020 [17]		2,172	65,28°	0,299	1,99	31,48 %
Model Code 2010 [21]		1,840	61,48°	0,385	1,61	37,78 %
Model Code 2020 [23]		1,905	62,23°	0,309	1,73	32,07 %
СП 63.13330.2018 [20]		0,689	34,57°	0,167	0,77	17,63 %

а)

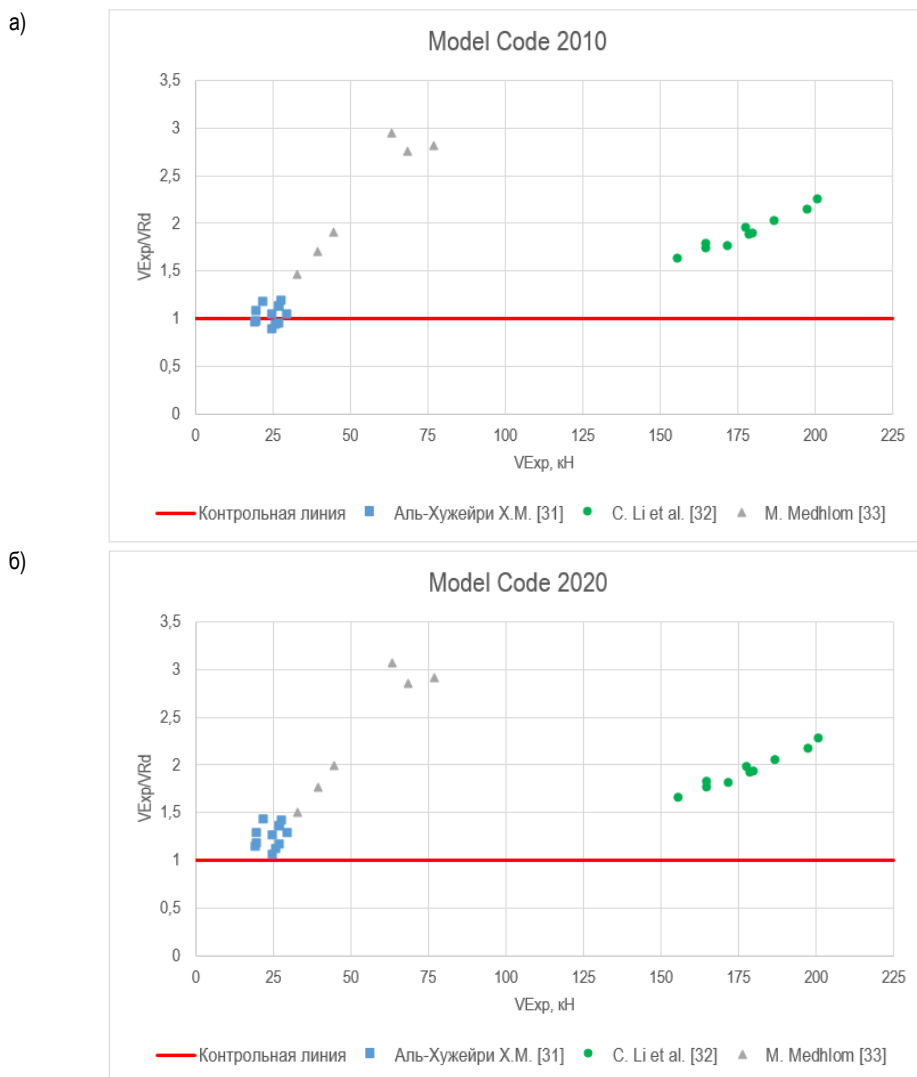


б)

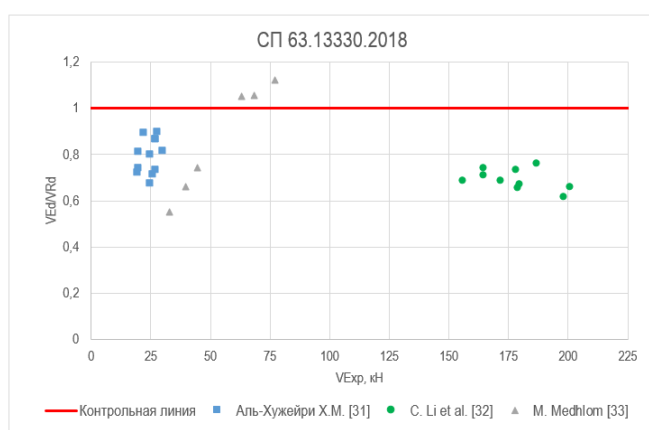


а) диаграмма для ТКП EN 1992-1-1-2009 [18]; б) то же для СП 5.03.01-2020 [17]

Рисунок 1 – Отношение $\lambda = V_{Exp}/V_{Rd}$ в зависимости от V_{Exp}



а) диаграмма для Model Code 2010 [21]; б) то же для Model Code 2020 [23]

Рисунок 2 – Отношение $\lambda = V_{Exp}/V_{Rd}$ в зависимости от V_{Exp} **Рисунок 3** – Отношение $\lambda = V_{Exp}/V_{Rd}$ в зависимости от V_{Exp} : диаграмма для СП 63.13330.2018 [19]

Результаты заметно различаются в зависимости от нормативных документов. ТКП EN 1992-1-1-2009 [18] и СП 5.03.01-2020 [17] дают наиболее выраженную заниженную оценку прочности: поправочный коэффициент b равен 2,16 и 2,17, угол систематического отклонения θ – 65,12° и 65,28°, коэффициент вариации V_δ – 0,35 и

0,30 соответственно. Фактическая несущая способность почти вдвое превышает расчетную ($\bar{\lambda}$ равна 1,94 и 1,99), что подтверждает консерватизм данных норм в отношении легких бетонов.

Схожая ситуация в Model Code 2010 [21] и Model Code 2020 [23], данные модели также занижают прочность и имеют большое рассеивание результатов: b – 1,84 и 1,91; θ – 61,48° и 62,23°; V_δ – 0,39 и 0,31 соответственно. Расчет устойчиво недооценивает прочность, но степень недооценки колеблется от образца к образцу.

Расчет по СП 63.13330.2018 [19] показал обратный эффект: нормы систематически переоценивают несущую способность (поправочный коэффициент $b = 0,69$ ($\theta = 34,57^\circ < 45^\circ$)). При этом модель показала наименьший разброс значений ($V_\delta = 0,17$).

Также необходимо отметить, что в базе образцов присутствуют образцы с фиброй. Однако в целом, фибровые образцы не выпадают из общего поля рассеяния и не меняют качественной картины сопоставления, что позволяет рассматривать их в рамках единой базы с оговоркой о неучтённом вкладе фибрового армирования.

Полученная картина показывает следующее: ни одна из моделей не обеспечивает надёжного прогноза сопротивления керамзитобетонных балок срезу. Все эти модели откалиброваны на бетоне нормального веса, где значительная часть перерезывающих усилий передаётся зацеплением по берегам наклонной трещины по крупному заполнителю. В керамзитобетоне трещина проходит сквозь пористый заполнитель, а не огибает его, что снижает вклад зацепления – механизм, нормами напрямую не учитываемый.

Численное моделирование и натурный эксперимент

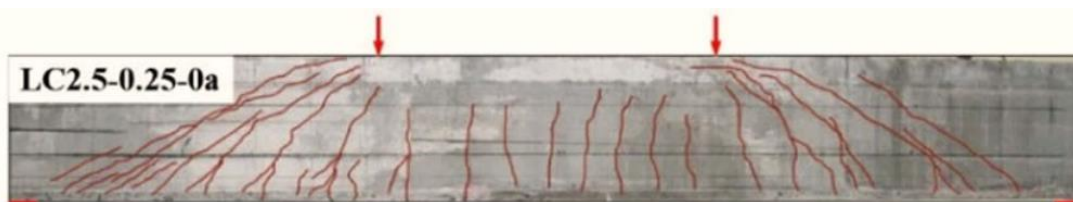
Полученные результаты ставят закономерный вопрос: какие именно факторы в наибольшей степени определяют сопротивление керамзитобетонных балок срезу и как при варьировании этих параметров меняется сам механизм их разрушения. Для ответа на данный вопрос необходим контролируемый эксперимент, в котором интересующие параметры будут варьироваться поочередно при прочих равных условиях.

Реализация такой объемной программы исследований потребовала бы изготовления и испытания большого числа образцов. Поэтому в качестве вспомогательного инструмента параметрического исследования выбрано численное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе SIMULIA Abaqus. Его широкие возможности позволяют воспроизвести нелинейную работу железобетонного элемента до разрушения, проследить зарождение и развитие наклонных трещин и оценить вклад отдельных факторов

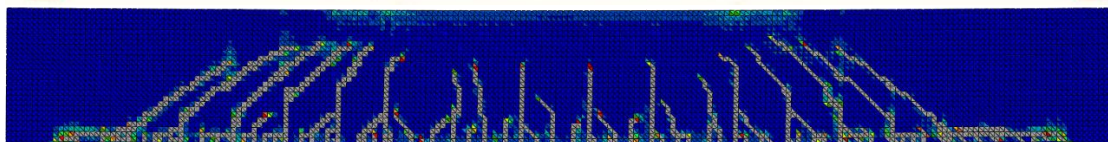
при поочередном их изменении. Однако численная модель остаётся достоверной лишь в рамках строго заданных, жёстких и контролируемых параметров. Поэтому её разработка неотделима от натурного эксперимента, который служит одновременно источником эталонных данных для верификации и средством контроля адекватности расчётной модели. Использование численного моделирования позволит сузить и обосновать программу натурных испытаний, сосредоточив их на наиболее значимых факторах.

На первом этапе разработанная конечно-элементная модель прошла апробацию на балках из лёгкого бетона, испытания которых описаны в [32] и [33]. Поведение бетона описывалось моделью повреждаемой пластичности Concrete Damaged Plasticity (CDP), решение выполнялось в квазистатической постановке (Dynamic, Implicit). Модель корректно воспроизвела не только несущую способность образцов, но и качественную картину их разрушения — траекторию наклонной трещины, её развитие и зону исчерпания прочности (рисунок 4).

а)



б)



а) фото эксперимента из статьи [32], б) моделирование в SIMULIA Abaqus
Рисунок 4 – Сопоставление характера разрушения балки LC2.5-0.25-0a

Параллельно была выполнена подготовка программы натурного эксперимента на опытных балках из керамзитобетона с поперечным армированием (рисунок 5). Натурные испытания обеспечивают получение достоверных опытных данных по работе керамзитобетонных балок на срез и служат основой для окончательной верификации численной модели на образцах собственного изготовления.



Рисунок 5 – Общий вид испытательной установки с опытным образцом

Таким образом, верифицированная на независимых данных численная модель в сочетании с программой натурных испытаний образует основу для последующего систематического анализа влияния ключевых параметров на сопротивление керамзитобетонных балок срезу.

Заключение

Керамзитобетон является перспективным конструкционным материалом. Вместе с тем, сопротивление керамзитобетонных балок с поперечным армированием срезу остаётся недостаточно изученным.

Анализ различных расчётных моделей показал отсутствие единой и универсальной методики расчёта сопротивления срезу, а также факт того, что особенности лёгкого бетона учитываются в них лишь косвенно – через понижающие коэффициенты и ограничения прочности, привязанные к плотности материала, а не через описание реального механизма его работы.

Для количественной оценки была сформирована обширная база экспериментальных данных, из которой выделена целевая выборка балок. Расчёт 28 образцов по пяти методикам и статистическая обработка результатов показали следующее: методики на основе ферменной аналогии и теории полей сжатия идут в значительный запас, занижая несущую способность в полтора-два раза (поправочный коэффициент b составляет от 1,84 для Model Code 2010 до 2,17 для СП 5.03.01-2020, а среднее отношение $\lambda = V_{Exp}/V_{Rd}$ достигает 1,9–2,0), тогда как модель предельного равновесия СП 63.13330.2018 завышает прочность ($b = 0,69$, $\bar{\lambda} = 0,77$), при этом демонстрируя наименьший разброс результатов ($V_{\delta} = 0,167$). Таким образом, ни одна из рассмотренных моделей не обеспечивает надёжный прогноз в работе керамзитобетонных балок на срез.

Основные предпосылки такого поведения в том, что все рассмотренные модели откалиброваны на бетоне нормального веса, в котором значительная доля перерезывающих усилий передаётся зацеплением по берегам наклонной трещины. В керамзитобетоне же трещина проходит сквозь пористый заполнитель, а не огибает его, что снижает вклад зацепления – механизм, напрямую нормами не учитываемый.

Установленный значительный разброс результатов расчета обуславливает необходимость дальнейших исследований, основой которых служит натурный эксперимент как источник достоверных данных о работе керамзитобетонных балок на срез. На предварительном этапе необходимо выполнить численное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе SIMULIA

Abaqus, позволяющее выявить параметры, в наибольшей степени влияющие на сопротивление срезу, и тем самым обосновать программу испытаний. Разработанная конечно-элементная модель прошла апробацию на балках из лёгкого бетона и корректно воспроизвела как их несущую способность, так и качественную картину разрушения. Тем самым верифицированная на независимых данных численная модель в сочетании с подготовленной программой натурных испытаний образует методическую основу для последующего систематического анализа влияния различных параметров на сопротивление керамзитобетонных балок срезу, результаты которого будут представлены в отдельной работе.

Список цитированных источников

1. Бетоны конструкционные. Технические условия = Бетоны конструкційні. Технічні умови : СТБ 2674-2025. – Взамен СТБ 1544-2005, СТБ EN 206-2016 ; введ. 01.03.2026. – Минск : Госстандарт, 2025. – 48 с.
2. Бетоны легкие. Технические условия = Бетоны легкія. Технічныя умовы : СТБ 1187-2020. – Взамен СТБ 1187-99 ; введ. 01.11.2020. – Минск : Госстандарт РБ, 2020. – 25 с.
3. Рекомендации по подбору составов, изготовлению и применению модифицированных химическими и минеральными добавками конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонных : Р 1.03.118-2013 : срок действия с 15.11.2013 / Институт БелНИИС. – Минск : Стройтехнорм, 2013. – 37 с.
4. Ицкович, С. М. Крупнопористый бетон (Технология и свойства) / С. М. Ицкович. – М. : Стройиздат, 1977. – 119 с.
5. Ицкович, С. М. Заполнители для бетона / С. М. Ицкович. – Минск : Вышэйшая школа, 1983. – 217 с.
6. Семенюк, С. Д. Прочностные и деформативные характеристики керамзитобетонных на основе сырья заводов Республики Беларусь / С. Д. Семенюк, Э. А. Кетнер // Инновационная подготовка инженерных кадров на основе европейских стандартов (Еврокодов) : материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 30 мая 2017 г. / [редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа]. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 178–190.
7. Семенюк, С. Д. Влияние компонентов легкого бетона на прочностные и деформативные характеристики / С. Д. Семенюк, В. А. Ржевуцкая // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2018. – № 4 (61). – С. 102–109.
8. Семенюк, С. Д. Особенности определения стесненной усадки керамзитожелезобетона / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Москалькова, В. А. Ржевуцкая // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр-во. Прикладные науки. – 2020. – № 8. – С. 58–65.
9. Ржевуцкая, В. А. Относительные деформации полной усадки керамзитобетона / В. А. Ржевуцкая, Ю. Г. Москалькова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр-во. Прикладные науки. – 2021. – № 16. – С. 99–105.
10. Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01-02. – Взамен СНиП 2.03.01-84* ; введ. 20.06.2002. – Минск : Минстройархитектуры, 2003. – 174 с.
11. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования : учебное пособие для студентов строительных специальностей // Н. П. Блещик, Д. Д. Жуков, Д. Н. Лазовский [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2003. – 380 с.
12. Пецольд, Т. М. Опыт внедрения в Республике Беларусь европейских нормативных документов по проектированию железобетонных конструкций / Т. М. Пецольд, В. В. Тур, Н. А. Рак // Строительная наука и техника. – 2012. – № 2-С. – С. 94–96.
13. Васильев, П. И. Сопротивление железобетонных элементов поперечным силам / П. И. Васильев, О. А. Рочняк. – Минск : Наука и техника. – 1978. – 88 с.
14. Рочняк, О. А. Прочность балок с отогнутой стержневой арматурой при действии поперечных сил / О. А. Рочняк, В. Н. Малиновский // Бетон и железобетон. – 1985. – № 5. – С. 33–34.
15. Бондарь, В. В. Деформации элементов из легкого бетона в условиях концентричного местного сжатия / В. В. Бондарь, Н. А. Рак // Инновации в бетоне: сборник статей по материалам Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева, Минск, 9–10 июня 2016 г. : в 2 ч. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: Э. И. Батяновский, В. В. Бабицкий. – Минск, 2016. – Ч. 2. – С. 44–50.
16. Модели сопротивления срезу балочных элементов из легких бетонов с продольным и поперечным армированием / П. В. Кривицкий, А. А. Невдах, И. В. Ткачук [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 1 (133). – С. 40–47. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-41-47.
17. Бетонные и железобетонные конструкции = Бетонныя і жалезабетонныя канструкцыі : СП 5.03.01-2020. – Взамен СНиП 2.03.01-84*, СНБ 5.03.01-02 ; введ. 20.05.2022. – Минск : Стройтехнорм, 2022. – 244 с.
18. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Общие правила и правила для зданий = Еўракод 2. Праектаванне жалезабетонных канструкцый. Агульныя правылы і правылы для будынкаў : ТКП EN 1992-1-1-2009. – Введ. 01.09.2019. – Минск : Стройтехнорм, 2021. – Ч. 1-1. – 310 с.
19. Бетонные и железобетонные конструкции : СНиП 2.03.01-84*. – Введ. 01.01.1986. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. – 82 с.
20. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 63.13330.2018. – Введ. 20.06.2019. – М. : НИЦ Строительство, 2019. – 124 с.
21. Model Code 2010. First complete draft. Fib Bulletin. – Lausanne, 2010. – Vol. 2, No. 56. – 293 p.
22. Model Code 2010. First complete draft. Fib Bulletin. – Lausanne, 2010. – Vol. 1, No. 55. – 297 p.
23. Fib Model Code for Concrete Structures 2020. Final draft. – May 2023. – 1256 p.
24. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19). – Michigan, 2019. – 628 p.
25. Structural use of Concrete – Code of practice for design and construction. BS 8110-1:1997. – London, 1997. – Part 1. – 160 p.
26. Structural use of Concrete – Code of practice for special circumstances. BS 8110-2:1985. – London, 1985. – Part 2. – 68 p.
27. Design of concrete structures. CSA A23.3-04. – Canada, 2004. – 232 p.
28. Standard specifications for concrete structures – 2007. "Design". JSCE Guidelines for concrete No. 15. – Japan, 2007. – 502 p.
29. Concrete structures standard – The design of concrete structures. NZC 3101-1. – Wellington, 2006. – 309 p.
30. Specification for the manufacture and use of structural and insulating lightweight concrete – Metric Units. NZS 3152:1974. – Wellington, 1974. – 23 p.
31. Аль-Хужейри, Х. М. Прочность и трещиностойкость наклонных сечений керамзитовофиброжелезобетонных балок и их прогибы с учетом сдвиговых деформаций : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Халед Махмуд Аль-Хужейри ; Ростовский гос. строит. ун-т. – Воронеж, 1997. – 27 с.
32. Effect of Steel Fiber Content on Shear Behavior of Reinforced Expanded-Shale Lightweight Concrete Beams with Stirrups / C. Li, M. Zhao, X. Zhang [et al.] // MDPI. – 2021. – Vol. 14. – Paper 1107. – DOI: 10.3390/ma14051107.
33. Mu'taz, K. Laboratory investigation of shear repair of reinforced lightweight aggregate concrete beams with stirrups / K. Mu'taz, M. Medhlohm // Journal of Engineering and Sustainable Development. 2021. – Vol. 19 (4). – P. 20.
34. Ivey, Don L. Shear Capacity of Lightweight Concrete Beams / Don L. Ivey, Eugene Buth // ACI Journal. – 1967. – Vol. 64. – P. 634–643.
35. Hanson, J. A. Shear Strength of Lightweight Reinforced Concrete Beams / J. A. Hanson // Journal of the American Concrete Institute. – 1957. – Vol. 55. – P. 387–403.
36. Shear Testing of Steel Fiber-Reinforced Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcement / T. H.-K. Kang, W. Kim, Y.-K. Kwak, S.-G. Hong // ACI Structural Journal. – 2011. – Vol. 108. – P. 553–561.
37. Effect of Aggregate Size on Shear Behavior of Lightweight Concrete Continuous Slender Beams / K.-H. Yang, J.-I. Sim, B.-J. Choi, E.-T. Lee // ACI Materials Journal. – 2011. – Vol. 108. – P. 501–509.
38. Testing and Prediction of Shear Performance for Steel Fiber Reinforced Expanded-Shale Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcements / X. Li, C. Li, M. Zhao [et al.] // MDPI. – 2019. – Vol. 12 (10). – Paper 1594. – DOI: 10.3390/ma12101594.
39. Cho, S. Effect of Aggregate Type on the Shear Behavior of Reinforced Lightweight Concrete Beams / S. Cho, M. O. Kim // MDPI. – 2024. – Vol. 14 (14). – Paper 5992. – <https://doi.org/10.3390/app14145992>.

40. Основы проектирования строительных конструкций = Основы проектирования будайных канструкций : СН 2.01.01-2022. – Взамеи СН 2.01.01-2019 ; введ. 09.06.2025. – Минск : Стройтехнорм, 2025. – 65 с.

References

1. Betony konstrukcionnye. Tekhnicheskie usloviya = Betony kanstrukciynyya. Tekhnichnyya ŷmovy : STB 2674-2025. – Vзамеи STB 1544-2005, STB EN 206-2016 ; введ. 01.03.2026. – Минск : Gosstandart, 2025. – 48 s.
2. Betony legkie. Tekhnicheskie usloviya = Betony legkiya. Tekhnichnyya ŷmovy : STB 1187-2020. – Vзамеи STB 1187-99 ; введ. 01.11.2020. – Минск : Gosstandart RB, 2020. – 25 s.
3. Rekomendacii po podboru sostavov, izgotovleniyu i primenenyu modifitsirovannyh himicheskimi i mineral'nyimi dobavkami konstrukcionno-teploizolyacionnogo i konstrukcionnogo keramzitobetonov : R 1.03.118-2013 : srok dejstviya s 15.11.2013 / Institut BelNII. – Минск : Strojtekhnorm, 2013. – 37 s.
4. Ickovich, S. M. Krupnoporistyj beton (Tekhnologiya i svoystva) / S. M. Ickovich. – M. : Strojizdat, 1977. – 119 s.
5. Ickovich, S. M. Zapolniteli dlya betona / S. M. Ickovich. – Минск : Vyshejshaya shkola, 1983. – 217 s.
6. Semenyuk, S. D. Prochnostnye i deformativnye karakteristiki keramzitobetonov na osnove syrya zavodov Respubliki Belarus' / S. D. Semenyuk, E. A. Ketner // Innovacionnaya podgotovka inzhenernyh kadrov na osnove evropejskih standartov (Evrokodov) : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Минск, 30 maya 2017 g. / [redkol.: V. F. Zverev, S. M. Koleda]. – Минск : BNTU, 2017. – S. 178–190.
7. Semenyuk, S. D. Vliyanie komponentov legkogo betona na prochnostnye i deformativnye karakteristiki / S. D. Semenyuk, V. A. Rzhavuckaya // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2018. – № 4 (61). – S. 102–109.
8. Semenyuk, S. D. Osobennosti opredeleniya stesnennoj usadki keramzitozhelezobetona / S. D. Semenyuk, YU. G. Moskal'kova, V. A. Rzhavuckaya // Vestn. Poloc. gos. un-ta. Ser. F. Str-vo. Prikladnye nauki. – 2020. – № 8. – S. 58–65.
9. Rzhavuckaya, V. A. Otnositel'nye deformacii polnoj usadki keramzitobetona / V. A. Rzhavuckaya, YU. G. Moskal'kova // Vestn. Poloc. gos. un-ta. Ser. F. Str-vo. Prikladnye nauki. – 2021. – № 16. – S. 99–105.
10. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SNB 5.03.01-02. – Vзамеи SNiP 2.03.01-84* ; введ. 20.06.2002. – Минск : Minstrojarkhitektury, 2003. – 174 s.
11. Zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovy teorii, rascheta i konstruirovaniya : uchebnoe posobie dlya studentov stroitel'nyh special'nostej // N. P. Bleshchik, D. D. Zhukov, D. N. Lazovskij [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2003. – 380 s.
12. Pecol'd, T. M. Opyt vnedreniya v Respublike Belarus' evropejskih normativnyh dokumentov po proektirovaniyu zhelezobetonnyh konstrukcij / T. M. Pecol'd, V. V. Tur, N. A. Rak // Stroitel'naya nauka i tekhnika. – 2012. – № 2-S. – S. 94–96.
13. Vasil'ev, P. I. Soprotivlenie zhelezobetonnyh elementov poperechnym silam / P. I. Vasil'ev, O. A. Rochnyak. – Минск : Nauka i tekhnika. – 1978. – 88 s.
14. Rochnyak, O. A. Prochnost' balok s otognutoj sterzhnevoj armaturoj pri dejstvii poperechnykh sil / O. A. Rochnyak, V. N. Malinovskij // Beton i zhelezobeton. – 1985. – № 5. – S. 33–34.
15. Bondar', V. V. Deformacii elementov iz legkogo betona v usloviyah koncentrichnogo mestnogo szhatiya / V. V. Bondar', N. A. Rak // Innovacii v betonovedenii, stroitel'nom proizvodstve i podgotovke inzhenernyh kadrov: sbornik statej po materialam Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya I. N. Ahverdova i S. S. Ataeva, Минск, 9–10 iyunya 2016 g. : v 2 ch. / Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet ; redkol.: E. I. Batyanovskij, V. V. Babickij. – Минск, 2016. – CH. 2. – S. 44–50.
16. Modeli soprotivleniya srezu balochnyh elementov iz legkih betonov s prodol'nym i poperechnym armirovaniem / P. V. Krivickij, A. A. Nevdah, I. V. Tkachuk [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 1 (133). – S. 40–47. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-41-47.
17. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii = Betonnyya i zhelezobetonnyya kanstrukcii : SP 5.03.01-2020. – Vзамеи SNiP 2.03.01-84*, SNB 5.03.01-02 ; введ. 20.05.2022. – Минск : Strojtekhnorm, 2022. – 244 s.
18. Evrokod 2. Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij. Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy = Eyrakod 2. Praektavanne zhelezobetonnyh kanstrukcij. Agul'nyya pravily i pravily dlya budynkay : TKP EN 1992-1-1-2009. – Vвед. 01.09.2019. – Минск : Strojtekhnorm, 2021. – CH. 1-1. – 310 s.
19. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SNiP 2.03.01-84*. – Vвед. 01.01.1986. – M. : NIIZHB Gosstroya SSSR, 1986. – 82 s.
20. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SP 63.13330.2018. – Vвед. 20.06.2019. – M. : NIC Stroitel'stvo, 2019. – 124 s.
21. Model Code 2010. First complete draft. Fib Bulletin. – Lausanne, 2010. – Vol. 2, No. 56. – 293 p.
22. Model Code 2010. First complete draft. Fib Bulletin. – Lausanne, 2010. – Vol. 1, No. 55. – 297 p.
23. Fib Model Code for Concrete Structures 2020. Final draft. – May 2023. – 1256 p.
24. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19). – Michigan, 2019. – 628 p.
25. Structural use of Concrete – Code of practice for design and construction. BS 8110-1:1997. – London, 1997. – Part 1. – 160 p.
26. Structural use of Concrete – Code of practice for special circumstances. BS 8110-2:1985. – London, 1985. – Part 2. – 68 p.
27. Design of concrete structures. CSA A23.3-04. – Canada, 2004. – 232 p.
28. Standard specifications for concrete structures – 2007. "Design". JSCE Guidelines for concrete No. 15. – Japan, 2007. – 502 p.
29. Concrete structures standard – The design of concrete structures. NZC 3101-1. – Wellington, 2006. – 309 p.
30. Specification for the manufacture and use of structural and insulating lightweight concrete – Metric Units. NZS 3152:1974. – Wellington, 1974. – 23 p.
31. Al'-Huzhejri, H. M. Prochnost' i treshchinost' naklonnyh sechenij keramzitofibrozelezobetonnyh balok i ih progiby s uchetom sdvigovyh deformacij : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.01 / Haled Mahmud Al'-Huzhejri ; Rostovskij gos. stroit. un-t. – Voronezh, 1997. – 27 s.
32. Effect of Steel Fiber Content on Shear Behavior of Reinforced Expanded-Shale Lightweight Concrete Beams with Stirrups / C. Li, M. Zhao, X. Zhang [et al.] // MDPI. – 2021. – Vol. 14. – Paper 1107. – DOI: 10.3390/ma14051107.
33. Mu'taz, K. Laboratory investigation of shear repair of reinforced lightweight aggregate concrete beams with stirrups / K. Mu'taz, M. Medhlor // Journal of Engineering and Sustainable Development. 2021. – Vol. 19 (4). – P. 20.
34. Ivey, Don L. Shear Capacity of Lightweight Concrete Beams / Don L. Ivey, Eugene Buth // ACI Journal. – 1967. – Vol. 64. – P. 634–643.
35. Hanson, J. A. Shear Strength of Lightweight Reinforced Concrete Beams / J. A. Hanson // Journal of the American Concrete Institute. – 1957. – Vol. 55. – P. 387–403.
36. Shear Testing of Steel Fiber-Reinforced Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcement / T. H.-K. Kang, W. Kim, Y.-K. Kwak, S.-G. Hong // ACI Structural Journal. – 2011. – Vol. 108. – P. 553–561.
37. Effect of Aggregate Size on Shear Behavior of Lightweight Concrete Continuous Slender Beams / K.-H. Yang, J.-I. Sim, B.-J. Choi, E.-T. Lee // ACI Materials Journal. – 2011. – Vol. 108. – P. 501–509.
38. Testing and Prediction of Shear Performance for Steel Fiber Reinforced Expanded-Shale Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcements / X. Li, C. Li, M. Zhao [et al.] // MDPI. – 2019. – Vol. 12 (10). – Paper 1594. – DOI: 10.3390/ma12101594.
39. Cho, S. Effect of Aggregate Type on the Shear Behavior of Reinforced Lightweight Concrete Beams / S. Cho, M. O. Kim // MDPI. – 2024. – Vol. 14 (14). – Paper 5992. – <https://doi.org/10.3390/app14145992>.
40. Osnovy proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij = Asnovy praektavannya budaynyh kanstrukcij : SN 2.01.01-2022. – Vзамеи SN 2.01.01-2019 ; введ. 09.06.2025. – Минск : Strojtekhnorm, 2025. – 65 s.

Материал поступил 25.06.2026, одобрен 06.07.2026, принят к публикации 06.07.2026

УДК 624.012.45

УЧЕТ ПРОДОЛЬНЫХ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В РАСЧЕТЕ ПРОГИБОВ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Д. Н. Лазовский¹, Д. О. Глухов²

¹ Д. т. н., профессор, профессор кафедры строительных конструкций УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: d.lazovski@psu.by

² К. т. н., доцент, ведущий инженер-программист ООО «Софтклуб», Минск, Беларусь, e-mail: dzmitry.hlukhau@outlook.com

Реферат

Изгибаемые железобетонные конструкции, широко применяемые в современном строительстве зданий и сооружений, имеют различное очертание поперечного сечения от простого прямоугольного до сложного двутаврового (таврового), с отверстиями в их ребрах, многослойного и др. Конструктивной особенностью изгибаемых железобетонных элементов со сложным поперечным сечением является сосредоточение сжимающих и растягивающих усилий у противоположных граней и уменьшение поперечного сечения вблизи нейтрального слоя, что увеличивает плечо внутренней пары сил и уменьшает расход материалов, позволяя проектировать их экономичными.

Нелинейная деформационная модель для расчета железобетонных конструкций позволяет получать параметры их напряженно-деформированного состояния на любой стадии деформирования, учитывать физическую нелинейность работы материалов без учета продольных сдвиговых деформаций, которые при высокой податливости соединений превращают конструкцию из цельной в составную, снижая сопротивление и увеличивая деформативность.

На основе нелинейной деформационной расчетной модели предложен новый подход к численному моделированию железобетонных балок с учетом продольных сдвиговых деформаций, применимый как для научных исследований, так и для практического проектирования, включая случаи нелинейного поведения материалов и связей. Выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с учетом продольных сдвиговых деформаций в нейтральном слое.

Ключевые слова: железобетонный элемент, сдвиговые деформации, сопротивление изгибу.

ACCOUNTING FOR LONGITUDINAL SHEAR DEFORMATIONS IN THE CALCULATION OF DEFLECTIONS AND RESISTANCE OF CONCRETE ELEMENTS BASED ON A NON-LINEAR DEFORMATION MODEL

D. N. Lazowski, D. O. Gluhov

Abstract

Reinforced concrete structures, which are widely used in modern construction of buildings and structures, have a variety of cross-sectional shapes, ranging from simple rectangular to complex I-shaped (T-shaped), with holes in their ribs, multilayer, etc. A distinctive feature of flexural reinforced concrete elements with complex cross-sections is the concentration of compressive and tensile forces at opposite faces and the reduction of the cross-section near the neutral layer, which increases the lever arm of the internal pair of forces and reduces the material consumption, allowing for cost-effective design. A nonlinear deformation model for calculating reinforced concrete structures allows you to obtain the parameters of their stress-strain state at any stage of deformation, and to take into account the physical nonlinearity of material behavior without considering longitudinal shear deformations, which, when the joints are highly compliant, transform the structure from a solid to a composite one, reducing resistance and increasing deformability. Based on a nonlinear deformation calculation model, a new approach to numerical modeling of reinforced concrete beams taking into account longitudinal shear deformations is proposed, which is applicable for both scientific research and practical design, including cases of nonlinear behavior of materials and connections. The stress-strain state of reinforced concrete beams is modeled taking into account longitudinal shear deformations in the neutral layer.

Keywords: reinforced concrete (RC), shear strain, bending resistance.

Введение

При расчете изгибаемых железобетонных элементов в нормативных документах разных стран [1–7] рассматривают отдельно продольные нормальные напряжения от изгибающего момента (поперечный изгиб) и касательные напряжения от поперечной силы (поперечный сдвиг). Однако из закона парности касательных напряжений следует, что при поперечном изгибе в продольных сечениях балки (параллельных нейтральному слою) возникают такие же по величине касательные напряжения сдвига. Это и есть продольный сдвиг. Именно эти напряжения стремятся сдвинуть слои бетона друг относительно друга. Если связи между слоями не рассчитаны на это сдвигающее усилие, изгибаемый элемент перестает воспринимать силовое воздействие как единое целое и превращается в составную конструкцию, у которой резко возрастает деформативность и снижается ее прочность.

Применительно к изгибаемым железобетонным элементам проверка прочности при продольном сдвиге может быть актуальна при сосредоточении сдвигающего усилия у противоположных граней элемента и уменьшении его поперечного сечения вблизи нейтральной плоскости (балки двутаврового (таврового) с тонкой стенкой, многослойные панели и др.).

Классическая формула для касательных напряжений τ при изгибе (Д. И. Журавский, 1855 г.) является базовой для оценки продольного сдвига в упругой постановке

$$\tau = \frac{V \cdot S}{J \cdot b}, \quad (1)$$

где V – поперечное усилие; S – статический момент отсеченной части поперечного сечения; J – момент инерции всего сечения, $b(y)$ – ширина поперечного сечения на уровне y рассматриваемого продольного сечения, которое воспринимает сдвигающее усилие T_{sh} .

$$T_{sh} = \tau \cdot b = \frac{V \cdot S_{sh}}{J}, \quad (2)$$

где S_{sh} – статический момент относительно нейтральной оси «сдвигаемой» части сечения.

При этом продольное сечение элемента, воспринимающее сдвигающее усилие T_{sh} , деформируется с модулем сдвига G_c (для бетона: без трещин – $G_c = 0,4E_c$, [1] (E_c – начальный модуль упругости бетона); с трещинами – $G_c = 0,4E_c\varphi_{cr}$, ($\varphi_{cr} = 0,5$ – коэффициент, учитывающий влияние трещин на деформации сдвига). Классическая теория изгиба (гипотеза Бернулли) не учитывает влияние продольного сдвига между слоями элемента в поперечном сечении на деформативность и сопротивление элемента.

Наиболее строгая теория, учитывающая податливость связей сдвига, разработана А. Р. Ржаницыным [8]. В отличие от формулы Журавского, которая предполагает монолитность и бесконечную жесткость взаимодействия слоев элемента, теория Ржаницына вводит коэффициент жесткости связей. Распределение относительных деформаций между слоями становится нелинейным (не подчиняется гипотезе плоских сечений Бернулли) и зависит от податливости шва рассматриваемого продольного сечения.

Учет продольного сдвига при нелинейной работе материалов (физическая нелинейность) сложнее линейного подхода. Формула Журавского и метод Ржаницына перестают быть справедливыми, как только в бетоне и арматуре появляются пластические деформации. В нелинейной постановке нарушается линейная зависимость между изгибающим моментом и продольным сдвигающим усилием, как функцией сложного напряженно-деформированного состояния в каждый момент нагружения.

После появления трещин нормального отрыва в растянутой зоне бетон выключается из работы. Нейтральная ось смещается, плечо внутренней пары сил изменяется, эпюра касательных напряжений перестает быть параболической. Сдвиг начинает концентрироваться в зоне над трещиной, что резко увеличивает градиент касательных напряжений τ . В нелинейной постановке постулат о парности и непрерывности деформаций сдвига заменяется условием совместности деформаций с учетом поврежденности.

Увеличение производительности компьютерной техники дало возможность практического применения нелинейной деформационной расчетной модели (НДМ) на основе нелинейных диаграмм деформирования материалов, гипотезы плоских сечений для распределения относительных деформаций по высоте сечения в плоскости изгиба не только для определения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) в поперечных сечениях железобетонных элементов на любой стадии их деформирования, но и возможность учета продольных сдвиговых деформаций [9–20].

Целью настоящего исследования является разработка методики и практическое применение НДМ расчета прогибов и прочности изгибаемых железобетонных элементов с учетом продольных сдвиговых деформаций в нейтральном слое.

Учет продольных сдвиговых деформаций в НДМ для железобетонных элементов

На первом этапе расчет параметров НДС железобетонного элемента выполняется без учета продольных сдвиговых деформаций. Согласно НДМ, поперечное сечение изгибаемого железобетонного элемента рассматривается как совокупность элементарных площадок, в пределах которых нормальные напряжения (связанные с относительными деформациями диаграммами деформирования материалов) считаются равномерно распределенными. Распределение относительных деформаций по поперечному сечению железобетонного элемента подчиняется гипотезе плоских сечений для усредненных относительных деформаций. Аппроксимации диаграмм деформирования бетона и арматуры в настоящем исследовании приняты в соответствии с [1].

Система уравнений равновесия и совместности деформаций НДМ на первом этапе расчета при воздействии изгибающего момента M имеет вид:

$$\begin{cases} \sum \sigma_c(\epsilon_c(y)) (y_c - y_0) A_c(y) + \sum \sigma_s(\epsilon_s)(y_s - y_0) A_s - M = 0 \\ \sum \sigma_c(\epsilon_c(y)) A_c(y) + \sum \sigma_s(\epsilon_s) A_s = 0 \\ \epsilon_c(y)_l = (1/r)(y_c - y_0) \\ \epsilon_{sl} = (1/r)(y_s - y_0) \end{cases}, \quad (3)$$

где $\sigma_c(y)_l$, $\epsilon_c(y)_l$ и σ_{sl} , ϵ_{sl} – нормальные напряжения, относительные деформации на первом этапе расчета в элементарной площадке бетона с координатами y_c и арматуры; $(1/r)$ – кривизна продольной оси поперечного сечения железобетонного элемента; A_c , A_s – площадь элементарной площадки бетона, арматуры поперечного сечения; y_0 – расстояние от выбранной оси до центра тяжести поперечного сечения железобетонного элемента без учета сдвига по контакту шву;

$$y_0 = \frac{[\sum E_c(y_c) \cdot A_c(y_c) \cdot y_c + \sum E_s \cdot A_s \cdot y]}{[\sum E_c(y_c) \cdot A_c(y_c) + \sum E_s \cdot A_s]},$$

E_c и E_s – секущие модули деформаций бетона и арматуры.

Результатом итерационного решения системы уравнений (2) является распределение относительных деформаций в элементарных площадках поперечного сечения железобетонного элемента при отсутствии продольных сдвиговых деформаций в нейтральном слое (рисунок 1). Вычисленные на первом этапе расчета параметры НДС изгибаемого железобетонного элемента будут являться начальными на втором этапе расчета – при учете продольных сдвиговых деформаций в нейтральном слое изгибаемого железобетонного элемента.

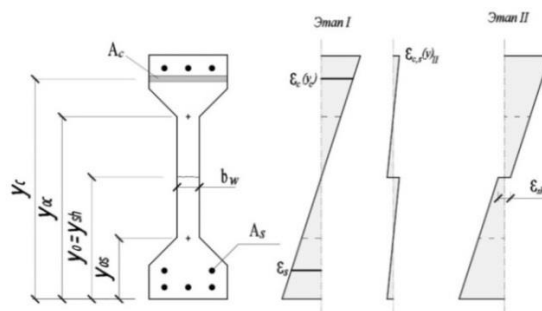


Рисунок 1 – Расчетная схема поперечного сечения железобетонного элемента с учетом продольных сдвиговых деформаций

Относительная деформация сдвига ϵ_{sh} , зависящая от величины сдвигающего усилия T_{sh} в расчетном сечении, определяется исходя из линейных сдвиговых деформаций Δ_{sh} , распределенных по длине нейтрального слоя l_{sh} ,

$$\epsilon_{sh} = \frac{\Delta_{sh}}{l_{sh}}. \quad (4)$$

Сдвигающее усилие T_{sh} в расчетном поперечном сечении вычисляется суммированием нормальных напряжений в одной из его части (по одну сторону от нейтрального слоя) [20]

$$T_{sh} = \sum \sigma_{c,s}(\epsilon_{c,s}(y)) A_{c,s}(y) \quad (5)$$

и, в свою очередь, зависит от величины ϵ_{sh} (рисунок 1).

Сдвиговые линейные деформации Δ_{sh} для контактного шва определяются жесткостью связей, обеспечивающих их совместную работу частей поперечного сечения.

$$T_{sh} = K_{sh} \Delta_{sh}, \quad (6)$$

где K_{sh} – коэффициент жесткости связей при сдвиге (определяется экспериментально или вычисляется теоретически), Н/мм.

$$K_{sh} = G_c \cdot b, \quad (7)$$

b – ширина поперечного сечения железобетонного элемента на уровне нейтрального слоя, мм.

В случае линейной зависимости деформаций сдвига Δ_{sh} от сдвигающего усилия T_{sh} коэффициент жесткости связей $K_{sh} = \text{const}$; при нелинейной зависимости – применяется секущий коэффициент жесткости связей $K_{sh} = f(\Delta_{sh})$.

Вынужденные относительные деформации сдвига ϵ_{sh} в нейтральном слое, которые являются дополнительными к относительным деформациям элементарных площадок поперечного сечения железобетонного элемента, вычисленным на первом этапе расчета, распределяются пропорционально расстоянию от нейтрального слоя до центра тяжести части поперечного сечения, условно отделенного нейтральным слоем в соответствии с кривизной $(1/r_{sh})$ (рисунок 1). С учетом условия совместности относительных деформаций сдвига в нейтральном слое (равенство кривизн частей поперечного сечения) [33, 35] дополнительные сдвиговые относительные деформации на уровне нейтрального слоя y_0 в сжатой части $\epsilon_{sh,c}$ и растянутой части $\epsilon_{sh,s}$ поперечного сечения вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} (1/r_{sh})_c &= \frac{\varepsilon_{sh,c}}{y_0 - y_{0,c}}; \quad (1/r_{sh})_s = \frac{\varepsilon_{sh,s}}{y_0 - y_{0,s}}; \\ (1/r_{sh})_c &= (1/r_{sh})_s = (1/r_{sh}); \\ \varepsilon_{sh} &= \varepsilon_{sh,c} + \varepsilon_{sh,s}; \\ \varepsilon_{sh,c} &= \frac{\varepsilon_{sh} \cdot (y_0 - y_{0,c})}{y_{0,c} - y_{0,s}}; \quad \varepsilon_{sh,s} = \frac{\varepsilon_{sh} \cdot (y_0 - y_{0,s})}{y_{0,c} - y_{0,s}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Система уравнений равновесия и совместности деформаций НДМ на втором этапе расчета (с учетом сдвиговых относительных деформаций ε_{sh} в нейтральном слое) имеет вид:

$$\begin{cases} \sum \sigma_c(\varepsilon_c(y_c))_{II} (y_c - y_0) A_c(y) + \sum \sigma_s(\varepsilon_s)_{II} (y_s - y_0) A_s - M_{II} = 0 \\ \sum \sigma_c(\varepsilon_c(y_c))_{II} A_c(y_c) + \sum \sigma_s(\varepsilon_s)_{II} A_s = 0 \\ \varepsilon_c(y)_{II} = \varepsilon_c(y)_I + (1/r_{sh})(y_{0,c} - y_c) \\ \varepsilon_{sl} = \varepsilon_{sl} + (1/r_{sh})(y_{0,s} - y_s) \end{cases}, \quad (9)$$

где $\sigma_c(y_c)_{II}$, $\varepsilon_c(y_c)_{II}$ и σ_{sl} , ε_{sl} – нормальные напряжения, относительные деформации на втором этапе расчета в элементарной площадке бетона и арматуры; $y_{0,c}$ и $y_{0,s}$ – расстояние от выбранной оси до центра тяжести верхней и нижней частей поперечного сечения, разделенного нейтральным слоем; $(1/r_{sh})$ – кривизна продольной оси железобетонного элемента от сдвига в рассматриваемом поперечном сечении в плоскости действия изгибающего момента M_{II} .

Решение системы уравнений (9) выполняется до равновесного состояния по изгибающему моменту M_{II} . Дополнительные сдвиговые относительные деформации на уровне нейтрального слоя в сжатой $\varepsilon_{sh,c}$ и растянутой $\varepsilon_{sh,s}$ части поперечного сечения железобетонного элемента изменяют его НДС с уменьшением, изгибающего момента M_{II} и соответственно сдвигающего усилия T_{sh} (формула 5) и относительных деформаций сдвига ε_{sh} в нейтральном слое. Уменьшение относительных деформаций сдвига ε_{sh} на следующей итерации расчета повлечет за собой увеличение изгибающего момента M_{II} .

$$K_{sh} = G_c \cdot b_w = 0,4 \cdot E_c \cdot \varphi_{cr} = 0,4 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 300 = 1,2 \cdot 10^6 \text{ Н/мм.}$$

$$\varepsilon_{sh} = \frac{\Delta_{sh}}{l_{sh}} = \frac{(T_{sh}/K_{sh})}{l_{sh}} = \frac{T_{sh}}{(K_{sh} \cdot l_{sh})} = \frac{9,7425 \cdot 10^5}{(1,2 \cdot 10^6 \cdot 6000)} = 13,5 \cdot 10^{-5}.$$

В результате итерационного вычисления устанавливается равновесное НДС по изгибающему моменту M_{II} на смежных итерациях с заданной точностью. Из-за влияния сдвиговых деформаций в нейтральном слое значение M_{II} , вычисленное на втором этапе расчета меньше исходного M_I (первый этап расчета). Для вычисления предельного по прочности изгибающего момента M_u последовательно увеличивают M_{II} и производя описанные выше итерационные вычисления находят максимальное значение M_{II} , при котором итерационный процесс сходится.

Практическая реализация учета продольных сдвиговых деформаций

Рассмотрим моделирование учета продольных сдвиговых деформаций на конкретных примерах изгибаемых железобетонных элементов.

Пример 1. Железобетонная подкрановая балка марки БК-БС для мостового крана грузоподъемностью 20 т среднего режима работы номинальной длиной 6 м ($l_{eff} = 5,8$ м) таврового поперечного сечения ($h = 1000$ мм; $b_w = 300$ мм; $b'_f = 570$ мм; $h'_f = 120$ мм) (серия КЭ-01-13). Балка выполнена из бетона марки М200 ($f_{cd} = 9$ МПа; $f_{ctd} = 0,72$ МПа; $E_c = 20 \cdot 10^3$ МПа), армирована горячекатаной арматурой Ст5 ($f_{yd} = 240$ МПа; $E_s = 2,1 \cdot 10^5$ МПа). Расчетное значение предельного изгибающего момента 940 кН·м.

Результаты расчета прочности подкрановой балки без учета продольных сдвиговых деформаций по предлагаемой методики (первый этап) представлена на рисунке 2. Предельный изгибающий момент (расчетное значение) равен $M_{u,d} = 1006,4$ кН·м. Кривизна балки в предельной стадии по прочности составляет $1/r = 6,2551 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, что при равномерно распределенной нагрузке соответствует прогибу

$$a_{max} = \frac{5}{48} (1/r) l_{eff}^2 = \frac{5}{48} (6,2551 \cdot 10^{-3}) \cdot 5,8^2 = 0,022 \text{ м} = 22 \text{ мм.}$$

Принимаем линейную зависимость продольных деформаций сдвига от сдвигающего усилия в нейтральном слое. Тогда

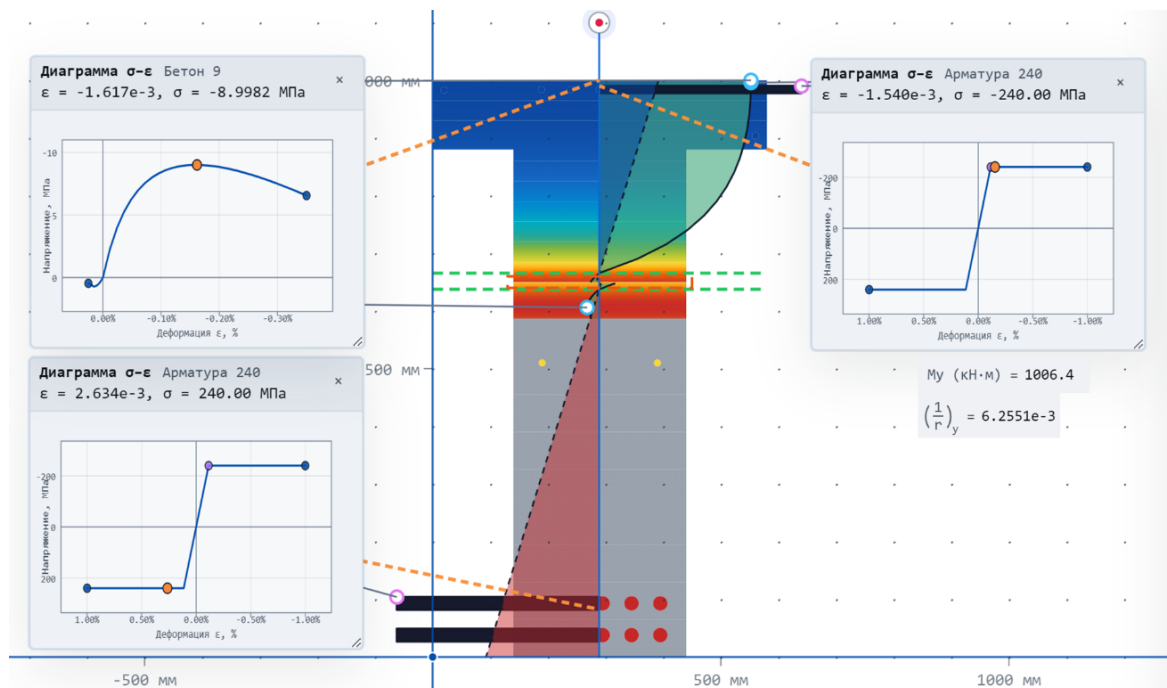


Рисунок 2 – Результаты расчета подкрановой балки по прочности (первый этап) $M_{u,d} = 1006,4$ кН·м: распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте поперечного сечения; диаграммы деформирования наиболее нагруженных элементарных площадок бетона и арматуры с указанием положения (красной точкой)

Дополнительная эпюра распределения продольных сдвиговых деформаций по высоте поперечного сечения представлена на рисунке 3.

Предельный изгибающий момент (расчетное значение) равен $M_{u,d,lI} = 999,99$ кН·м, что меньше соответствующего изгибающего момента без учета сдвига ($M_{u,d,I} = 1006,4$) кН·м. Кривизна балки в предельной стадии по прочности составляет $1/r = 6,5784 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, что при равномерно распределенной нагрузке соответствует прогибу

$$a_{\max} = \frac{5}{48} (1/r) l_{\text{eff}}^2 = \frac{5}{48} (6,5884 \cdot 10^{-3}) \cdot 5,8^2 = 0,023 \text{ м} = 23 \text{ мм}.$$

При этом кривизна от продольных деформаций сдвига в нейтральном слое равна $1/r = 0,0926 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, что соответствует дополнительному прогибу

$$a_{sh} = \frac{5}{48} (1/r) l_{\text{eff}}^2 = \frac{5}{48} (0,0926 \cdot 10^{-3}) \cdot 5,8^2 = 0,0032 \text{ м} = 0,32 \text{ мм}.$$

Вычисление параметров напряженно-деформированного состояния железобетонной балки в предельном состоянии по прочности с учетом деформаций сдвига в контактном шве (рисунок 4) показывает, что разрушение балки начинается с растянутой зоны бетона балки с последующим переходом нормальных напряжений бетона на нисходящую ветвь своей диаграммы деформирования. В предельной стадии в растянутом бетоне балки появляются трещины нормального отрыва, пересекающие арматуру растянутой зоны, которая достигла относительных деформаций, соответствующих ее пределу текучести.

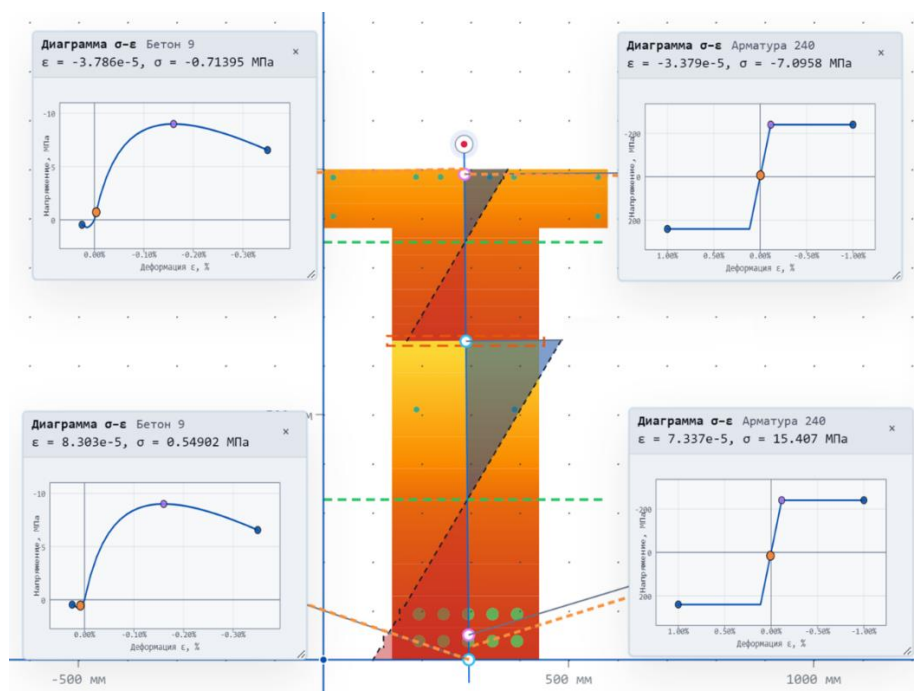


Рисунок 3 – Распределение продольных сдвиговых деформаций по высоте поперечного сечения в нейтральном слое подкрановой балки

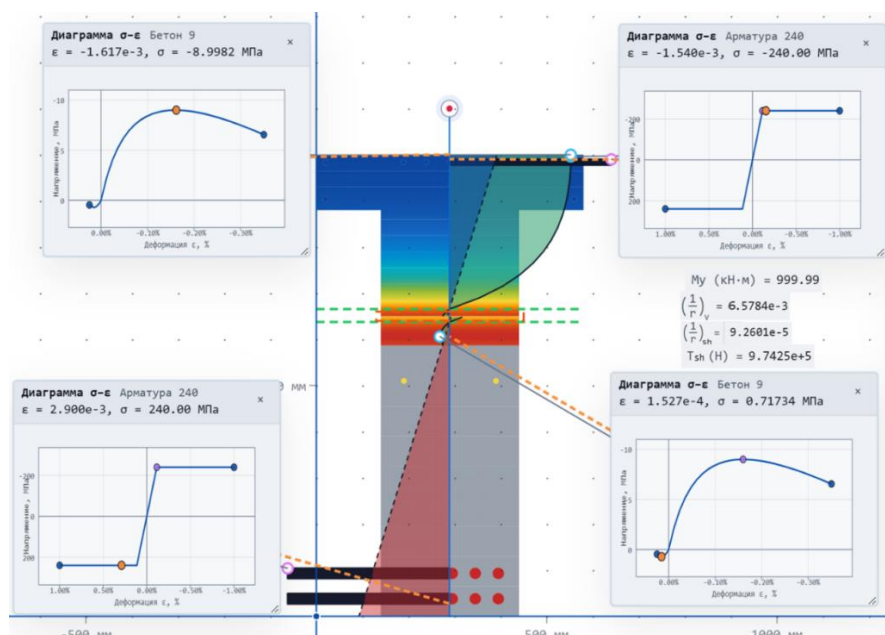


Рисунок 4 – Результаты расчета сопротивления подкрановой балки (второй этап) $M_{u,d,lI} = 999,99$ кН·м: распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте поперечного сечения; диаграммы деформирования наиболее нагруженных площадок бетона и арматуры с указанием положения (красной точкой)

Пример 2. Предварительно напряженная железобетонная балка покрытия 2Б012-5Ат-V номинальной длиной 12 м ($l_{eff} = 11,7$ м) двутаврового поперечного сечения с параллельными поясами ($h = 900$ мм; $b_w = 80$ мм; $b_f = b'_f = 280$ мм; $h_f = 150$ мм, $h'_f = 120$ мм) (серия 1.462-1 вып.1). Балка выполнена из бетона марки М500 ($f_{ck} = 25$ МПа; $f_{ctk} = 1,95$ МПа; $E_c = 28,5 \cdot 10^3$ МПа), армирована в растянутой зоне горячекатаной арматурой 5ø22 АтV ($f_{yk} = 980$ МПа; предварительное напряжение с учетом первых потерь $\sigma_p = 720$ МПа; $E_s = 1,9 \cdot 10^5$ МПа) и 6ø12 АIII ($f_{yk} = 390$ МПа; $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа). Контрольный прогиб в середине пролета при испытании балки в возрасте 28 суток равен 52 мм при изгибающем моменте $M_k = 990$ кН·м.

$$K_{sh} = G_c \cdot b_w = 0,4 \cdot E_c \cdot \varphi_{cr} = 0,4 \cdot 28,5 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 80 = 0,912 \cdot 10^6 \text{ Н/мм},$$

$$\Delta_{sh} = \frac{T_{sh}}{K_{sh}} = 1,2703 \cdot 10^6 / 0,912 \cdot 10^6 = 1,4 \text{ мм}.$$

Результаты расчета (рисунок 5) показывают, что суммарная кривизна железобетонной балки составляет $(1/r) = 2,0663 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, в случае равномерно распределенной нагрузки соответствует прогибу в середине пролета $\Delta_{max} = 29,5$ мм, что меньше контрольного значения 52 мм. При этом кривизна от продольных деформаций сдвига в нейтральном слое равна $1/r = 0,032589 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, что соответствует дополнительному прогибу 0,5 мм.

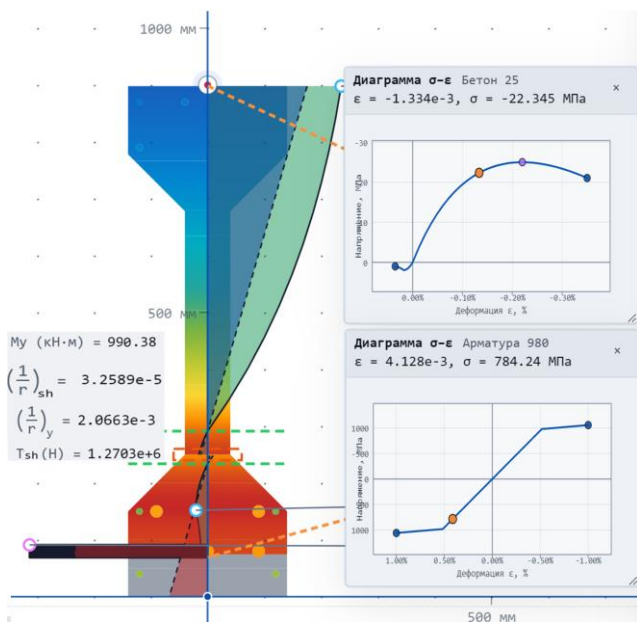


Рисунок 5 – Результаты расчета железобетонной балки с учетом сдвига в нейтральном слое при $M_{k,II} = 990,38$ кН·м: распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте поперечного сечения; диаграммы деформирования с указанием положения (красной точкой) наиболее сжатого волокна бетона и нижней арматуры

Для сопоставления и выявления участия продольных сдвиговых деформаций в увеличении прогиба железобетонной балки произведен расчет без учета сдвиговых деформаций в нейтральном слое (абсолютно жесткое соединение) (рисунок 6). Прогиб балки при изгибающем моменте $M_{k,I} = 990,12$ кН·м ($1/r = 2,0268 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$) равен 28,9 мм, что меньше расчетного значения с учетом продольных сдвиговых деформаций в нейтральном слое (29,5 мм).

Наличие продольных деформаций сдвига в изгибаемых элементах увеличивает изгибные деформации каждой составляющей поперечного сечения по обе стороны от нейтрального слоя. Проявление названной особенности работы изгибаемых элементов усиливается с увеличением сдвиговых деформаций. Предпосылки нелинейной деформационной расчетной модели в соответствии с предлагаемой методикой расчета позволяют, не теряя физический смысл, учесть

Железобетонная балка в направлении ее пролета при действующем усилии имеет трещины нормального отрыва, но на уровне арматуры растянутой зоны относительные деформации растянутого бетона $\varepsilon_{ct} = 1,949 \cdot 10^{-4}$ не превышают предельных $\varepsilon_{ct,u} = 3,5 \cdot 10^{-4}$ (трещина нормального отрыва не пересекает рабочую арматуру и не выходит на ребро двутавра, в котором концентрируются деформации сдвига ($\varphi_{cr} = 1,0$). Сдвигающее усилие в нейтральном слое в месте расчетного поперечного сечения при действии изгибающего момента воздействий $M_k = 990,38$ кН·м составляет $T_{sh} = 1270,3$ кН при сдвиговых деформациях согласно (7)

особенности работы изгибаемых элементов при наличии продольных сдвиговых деформаций. Рассмотренные примеры расчета изгибаемых железобетонных элементов таврового и двутаврового поперечного сечения показывает применимость НДМ для их расчета с учетом деформаций продольного сдвига. Влияние продольных сдвиговых деформаций на прочность и жесткость изгибаемых железобетонных элементов возрастет при увеличении податливости слоя, разделяющего сжатую и растянутую зону (например, в трехслойных плитах с железобетонными крайними слоями и средним слоем изолирующим слоем; наличии сквозных отверстий, трещин в тонкостенных ребрах балок и т. д.)

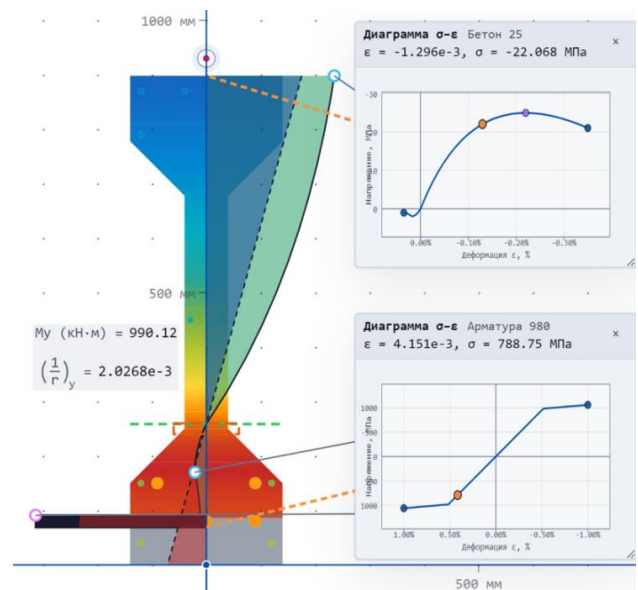


Рисунок 6 – Результаты расчета железобетонной балки с учетом сдвига в нейтральном слое при $M_{k,I} = 990,12$ кН·м: распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте поперечного сечения; диаграммы деформирования с указанием положения (красной точкой) наиболее сжатого волокна бетона и нижней арматуры

Заключение

Предложена методика и продемонстрировано практическое применение нелинейной деформационной расчетной моделью для вычисления параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов с учетом нелинейности деформирования материалов и продольных сдвиговых деформаций в нейтральном слое.

Новый подход к численному моделированию изгибаемых железобетонных элементов с податливым нейтральным слоем может быть применен как для научных исследований, так и для практического проектирования других видов изгибаемых конструкций с нелинейным поведением материалов и связей.

Список цитированных источников

1. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Взамен ТКП 45-5.03-131-2009 ; введ. 01.11.2020. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 144 с.
2. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 63.13330.2018 : актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 : введ. 20.06.2019 / Минстрой России. – М. : Минстрой России, 2018. – Раздел 8 : Расчет железобетонных элементов по прочности ; Приложение Н : Расчет железобетонных элементов на выносливость. – 143 с.
3. EN 1992-1-1 (Еврокод 2). Проектирование железобетонных конструкций ; EN 1994-1-1 (Еврокод 4). Проектирование сталежелезобетонных конструкций. Разд. 6.2 : Сдвиг между полкой и стенкой. – М. : Стандартинформ, 2020. – 1 с.
4. Fib Model Code for Concrete Structures 2010. – 1st ed. – Berlin : Ernst & Sohn ; Wiley, 2013. – Section 6.1 : Bond and anchorage. – 434 p.
5. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования : свод правил : СП 164.1325800.2014. – Введ. 01.08.2014. – М. : Минстрой России, 2014. – 43 с.
6. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования : СП 266.1325800.2016 : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1030/пр. – Введ. 01.07.2017. – М. : Минстрой России, 2017. – V, 113 с.
7. Конструкции сталежелезобетонные покрытий и перекрытий. Правила проектирования : ТКП 45-5.03-16-2005 (02250) : технический кодекс установившейся практики / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Введен впервые ; введ. 01.07.2006. – Минск : Минстройархитектуры, 2006. – II, 71 с.
8. Ржаницын, А. Р. Составные стержни и пластинки / А. Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1986. – 318 с.
9. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М. : Стройиздат, 1996. – 416 с.
10. Лapidus, A. A. Особенности расчета сдвигающих усилий в зоне контакта бетона и фибробетона при нелинейной работе материалов / А. А. Лapidus, А. Г. Тамразян // Жилищное строительство. – 2015. – № 7. – С. 14–18.
11. Мухамедиев, Т. А. Расчет прочности сталежелезобетонных колонн с использованием деформационной модели / Т. А. Мухамедиев, О. И. Старчикова // Бетон и железобетон. – 2006. – № 4 (541). – С. 18–20.
12. Бондаренко, В. М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона / В. М. Бондаренко, С. В. Бондаренко. – М. : Стройиздат, 1982. – 287 с.
13. Тамразян, А. Г. Сталежелезобетонные перекрытия, новые методы их расчета / А. Г. Тамразян, Ф. С. Замалиев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – № 4 (70). – С. 118–130.
14. Замалиев, Ф. С. Учет нелинейных свойств материалов и податливости слоев при расчете прочности сталежелезобетонных перекрытий / Ф. С. Замалиев // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 5. – С. 38–40.
15. Schnabl, S. The influence of shear on the bending of composite beams / S. Schnabl, I. Planinc // Composites Part B: Engineering. – 2011. – Vol. 42, Iss. 7. – P. 1964–1975.
16. Oehlers, D. J. Composite Steel and Concrete Structural Members: Fundamental Behaviour / D. J. Oehlers, M. A. Bradford. – Pergamon, 1995. – 568 p.
17. Chen, J. F. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete / J. F. Chen, J. G. Teng // Journal of Structural Engineering, ASCE. – 2001. – Vol. 127, No. 7. – P. 784–791.
18. Пецольд, Т. М. Расчёт усиления железобетонных эксплуатируемых строительных сооружений / Т. М. Пецольд, Д. Н. Лазовский // Бетон и железобетон. – 1998. – № 6. – С. 16–19.
19. Пецольд, Т. М. Расчёт усиления железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений / Т. М. Пецольд, Д. Н. Лазовский // Бетон и железобетон. – 1999. – № 1. – С. 11–14.
20. Лазовский, Д. Н. Деформационный подход к расчету прочности при поперечном изгибе деревянных элементов с учетом сдвига / Д. Н. Лазовский, А. И. Гиль, Д. О. Глухов // Вестник МГСУ. – 2025. – Т. 20, Вып. 8. – С. 1187–1198. – DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198.

References

1. Betonnyye i zhelezobetonnyye konstrukcii : SP 5.03.01-2020. – Vzaмен TKP 45-5.03-131-2009 ; vved. 01.11.2020. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2020. – 144 s.
2. Betonnyye i zhelezobetonnyye konstrukcii : SP 63.13330.2018 : aktualizirovannaya redakciya SNiP 52-01-2003 : vved. 20.06.2019 / Minstroj Rossii. – M. : Minstroj Rossii, 2018. – Razdel 8 : Raschet zhelezobetonnyh elementov po prochnosti ; Prilozhenie N : Raschet zhelezobetonnyh elementov na vynoslivost'. – 143 s.
3. EN 1992-1-1 (Evrokod 2). Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij ; EN 1994-1-1 (Evrokod 4). Proektirovanie stalezhelezobetonnyh konstrukcij. Razd. 6.2 : Sdvig mezhdru polkoj i stenkoy. – M. : Standartinform, 2020. – 1 c.
4. Fib Model Code for Concrete Structures 2010. – 1st ed. – Berlin : Ernst & Sohn ; Wiley, 2013. – Section 6.1 : Bond and anchorage. – 434 p.
5. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami. Pravila proektirovaniya : svod pravil : SP 164.1325800.2014. – Vved. 01.08.2014. – M. : Minstroj Rossii, 2014. – 43 s.
6. Konstrukcii stalezhelezobetonnyye. Pravila proektirovaniya : SP 266.1325800.2016 : utverzhden Prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii ot 30 dekabrya 2016 g. № 1030/pr. – Vved. 01.07.2017. – M. : Minstroj Rossii, 2017. – V, 113 s.
7. Konstrukcii stalezhelezobetonnyye pokrytij i perekrytij. Pravila proektirovaniya : TKP 45-5.03-16-2005 (02250) : tekhnicheskij kodeks ustanovivshejsya praktiki / Ministerstvo arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus'. – Vveden v pervye ; vved. 01.07.2006. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2006. – II, 71 s.
8. Rzhanicyn, A. R. Sostavnye sterzhni i plastinki / A. R. Rzhanicyn. – M. : Strojizdat, 1986. – 318 s.
9. Karpenko, N. I. Obschie modeli mekhaniki zhelezobetona / N. I. Karpenko. – M. : Strojizdat, 1996. – 416 s.
10. Lapidus, A. A. Osobennosti rascheta sdvigayushchih usilij v zone kontakta betona i fibrobetona pri nelinejnoj rabote materialov / A. A. Lapidus, A. G. Tamrazyan // Zhilishchnoe stroitel'stvo. – 2015. – № 7. – S. 14–18.
11. Muhamediev, T. A. Raschet prochnosti stalezhelezobetonnyh kolonn s ispol'zovaniem deformatsionnoj modeli / T. A. Muhamediev, O. I. Starchikova // Beton i zhelezobeton. – 2006. – № 4 (541). – S. 18–20.
12. Bondarenko, V. M. Inzhenernye metody nelinejnoj teorii zhelezobetona / V. M. Bondarenko, S. V. Bondarenko. – M. : Strojizdat, 1982. – 287 s.
13. Tamrazyan, A. G. Stalezhelezobetonnyye perekrytiya, novye metody ih rascheta / A. G. Tamrazyan, F. S. Zamaliev // Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. – 2024. – № 4 (70). – S. 118–130.
14. Zamaliev, F. S. Uchet nelinejnyh svojstv materialov i podatlivosti sloev pri raschete prochnosti stalezhelezobetonnyh perekrytij / F. S. Zamaliev // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2013. – № 5. – S. 38–40.
15. Schnabl, S. The influence of shear on the bending of composite beams / S. Schnabl, I. Planinc // Composites Part B: Engineering. – 2011. – Vol. 42, Iss. 7. – P. 1964–1975.
16. Oehlers, D. J. Composite Steel and Concrete Structural Members: Fundamental Behaviour / D. J. Oehlers, M. A. Bradford. – Pergamon, 1995. – 568 p.
17. Chen, J. F. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete / J. F. Chen, J. G. Teng // Journal of Structural Engineering, ASCE. – 2001. – Vol. 127, No. 7. – P. 784–791.
18. Pecol'd, T. M. Raschyot usileniya zhelezobetonnyh ekspluatiruemyh stroitel'nyh sooruzhenij / T. M. Pecol'd, D. N. Lazovskij // Beton i zhelezobeton. – 1998. – № 6. – S. 16–19.
19. Pecol'd, T. M. Raschyot usileniya zhelezobetonnyh konstrukcij ekspluatiruemyh stroitel'nyh sooruzhenij / T. M. Pecol'd, D. N. Lazovskij // Beton i zhelezobeton. – 1999. – № 1. – S. 11–14.
20. Lazovskij, D. N. Deformatsionnyj podhod k raschetu prochnosti pri poperechnom izgibe derevyannyh elementov s uchedom sdviga / D. N. Lazovskij, A. I. Gil', D. O. Gluhov // Vestnik MGSU. – 2025. – T. 20, Vyp. 8. – S. 1187–1198. – DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198.

Материал поступил 10.06.2026, одобрен 25.06.2026,
принят к публикации 29.06.2026

УДК 692.21

ПРОЧНОСТЬ ИСТОРИЧЕСКОГО КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА ПРИ СЖАТИИ ПОД РАЗЛИЧНЫМИ УГЛАМИ К ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

П. И. Матяс¹, В. Н. Деркач²

¹ Ведущий инженер-конструктор, Филиал НТЦ РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», аспирант, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: matyas.ntc@gmail.com

² Д. т. н., профессор, иностр. член РААСН, директор, Филиал НТЦ РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», Брест, Беларусь, e-mail: v-derkach@yandex.ru

Реферат

Степень анизотропии механических характеристик кирпича зависит от технологических процессов, которые совершенствовались на протяжении истории его производства. Исследовалась анизотропия прочности на сжатие трех видов исторического керамического кирпича, произведенного во второй половине XIX – начале XX века. Отбор кирпича выполнялся из каменной кладки сооружений Брестской крепости. Приведены результаты экспериментальных исследований прочности на сжатие кирпича при действии сжимающего усилия под различными углами к его опорной поверхности. Определение степени анизотропии прочности на сжатие производилось на основании испытаний сжимающей нагрузкой образцов-кубов с ребром 40 мм, выпиленных из тела кирпичей под углами к нормали к опорной поверхности 0°, 22,5°, 45°, 67,5°, 90°. Разрушение опытных образцов носило хрупкий характер и проявлялось в виде образования трещин, параллельных направлению сжимающего усилия с последующим раскалыванием образца и образовыванием пирамиды, с отрывом боковых граней. Для всех видов испытанных кирпичей минимальное значение прочности на сжатие получено при угле 22,50. Указанное значение оказалось ниже значения прочности в направлении ортогональном опорной поверхности кирпича на 13–26 %. Выявленная анизотропия прочности на сжатие кирпича, объясняется технологией его производства и ориентацией частиц глинистых минералов в исходном материале. Степень анизотропии прочностных характеристик кирпича ручной формовки существенно выше, чем кирпича, изготовленного механизированным методом. Полученные результаты следует учитывать при расчете методом конечных элементов ответственных фрагментов или узлов исторических каменных конструкций при раздельном учете в расчетной модели каменной кладки кирпича и растворных швов.

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

COMPRESSIVE STRENGTH OF HISTORICAL CERAMIC BRICK UNDER DIFFERENT ANGLES TO THE BEARING SURFACE

P. I. Matyas, V. N. Derkach

Abstract

The degree of anisotropy of the mechanical characteristics of brick depends on the technological processes that have been improved throughout the history of its production. The anisotropy of compressive strength was studied for three types of historical ceramic bricks manufactured in the second half of the 19th – early 20th centuries. The bricks were taken from the masonry of the structures of the Brest Fortress. The results of experimental studies on the compressive strength of brick under a compressive force applied at various angles to its bearing surface are presented. The degree of anisotropy of compressive strength was determined based on compressive load tests of 40 mm cube specimens cut from the brick body at angles of 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, and 90° to the normal to the bearing surface. The failure of the test specimens was brittle in nature and manifested itself in the formation of cracks parallel to the direction of the compressive force, followed by splitting of the specimen, the formation of a pyramid, and the detachment of the side faces. For all types of bricks tested, the minimum compressive strength value was obtained at an angle of 22.5°. This value was found to be 13–26 % lower than the strength value in the direction orthogonal to the bearing surface of the brick. The revealed anisotropy of the compressive strength of brick is explained by the production technology and the orientation of clay mineral particles in the original material. The degree of anisotropy of the strength characteristics of handmoulded bricks is significantly higher than that of bricks manufactured by mechanized methods. The obtained results should be taken into account when calculating critical fragments or nodes of historical masonry structures using the finite element method, with separate consideration of bricks and mortar joints in the computational model of the masonry.

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

Введение

Напряженно-деформированное состояние (НДС) каменных конструкций исторических зданий в настоящее время, как правило, определяют на основе расчетов методом конечных элементов при помощи современных вычислительных комплексов. В численных моделях каменных конструкций, в зависимости от уровня детализации, каменная кладка может быть представлена макромеханической (далее – макромоделю) или микромеханической (далее – микромоделю) моделями [1–5].

В макромоделях каменную кладку рассматривают как однородный (однородный) материал, наделенный обобщенными деформационными характеристиками кирпича и раствора, которые определяют по результатам предварительно выполненных испытаний образцов кладки при простых видах напряженного состояния. Доступность применения данной модели сочетается с невозможностью представления о локальных особенностях взаимодействия кирпича и растворных швов. Достоинством данной модели является то, что

сетка конечных элементов (КЭ) не привязана к форме и размерам камня и не определяется расположением растворных швов в кладке.

Предположение об однородности каменной кладки может быть ошибочным в случае выполнения численного анализа НДС ответственных фрагментов или узлов каменных конструкций. В этом случае используют метод микромоделирования каменной кладки, согласно которому ее рассматривают как конструкцию или гетерогенное (неоднородное) тело, состоящее из кирпичей и растворных швов, характеристики жесткости и прочности которых учитываются раздельно. В КЭ модели каждый кирпич и растворный шов заменяется совокупностью мелких КЭ. В ряде случаев вводятся дополнительные КЭ нулевой толщины, которые учитывают особые свойства контактных поверхностей между кирпичом и растворными швами (прочность нормального и касательного сцепления, силы трения). Микромодель позволяет выявить особенности распределения напряжений в растворных швах и кирпичах. Она наиболее полно представляет контактное взаимодействие материалов каменной

кладки и может отражать локальные нарушения сцепления, проскальзывание или разрыв между раствором швом и кирпичом. В отличие от макромоделей микромоделей в явном виде учитывает анизотропию и нелинейность деформационных свойств каменной кладки. В микромоделях кирпичи обычно представляются как линейно упругие КЭ, а нелинейное поведение кладки при действии сдвигающих, растягивающих или сжимающих усилий моделируется контактными КЭ и КЭ растворных швов. При выполнении численных расчетов с использованием микромоделей принципиально важным является набор исходных данных, включающих корректные и обоснованные значения механических характеристик кирпича и растворных швов.

Каменные конструкции исторических зданий в основном подвержены сжимающим усилиям. При действии нагрузок или вынужденной деформации, например, при неравномерной осадке фундаментов, возникающие в каменной кладке силовые потоки могут быть направлены под различными углами к горизонтальным растворным швам. В каменной кладке кирпич является основным конструктивным эле-

ментом, прочность на сжатие которого оказывает ключевое влияние на прочность каменной кладки. Собственные исследования [6–7] и исследования ряда других авторов [8–12] показывают, что материал керамического кирпича обладает анизотропными свойствами. При этом степень анизотропии механических характеристик кирпича зависит от технологических процессов, которые совершенствовались на протяжении истории его производства. Вопрос анизотропии механических характеристик исторического кирпича, в частности его прочности на сжатие, малоизучен, что определяет актуальность настоящей статьи.

Материалы и методы

С целью получения данных о степени анизотропии прочности на сжатие исторического керамического кирпича при действии сжимающего усилия под различными углами к опорной поверхности были выполнены исследования кирпичей, отобранных из каменной кладки сооружений Брестской крепости. На опорной поверхности кирпичей нанесены клейма БЛК 1905, БЛК 1864, ASIS KA (рисунок 1).



Рисунок 1 – Общий вид исторического кирпича, отобранного для испытаний

Аббревиатура «БЛК» означает Брест-Литовская крепость, числа 1864 и 1905 указывают на конкретный год выпуска партии. Данный кирпич изготавливался на казенном кирпичном заводе, который располагался в деревне Гершоны в окрестностях Брест-Литовска. Указанный завод выпускал кирпичи с клеймом «БЛК» с 1864 г. по 1911 г. На опорной поверхности кирпича с клеймом ASIS KA нанесено шесть точек в виде неглубоких отверстий, которые возможно являются счетными метками, для фиксации количества выпускаемой продукции в сотнях или тысячах штук.

Кирпичи имели следующие размеры: длина – 265–267 мм, ширина – 132–134 мм, высота – 65–67 мм. Этим размерам соответствует керамический кирпич, производимый согласно указаниям «Правил для единообразной и прочной выделки кирпича, долженствующего употребляться как в С-Петербурге, так и в других местах России, на казенных и частных заводах», которые были изданы в 1848 г. В Правилах указано, что для отличия продукции разных заводов «на каждом кирпиче должно быть непременно клеймо того завода, на котором он выделан».

Предварительно кирпичи были испытаны на сжатие и изгиб. Подготовка кирпичей к испытаниям и их испытания выполнялись в соответствии с ГОСТ 8462. Кроме значений прочности на сжатие и растяжение при изгибе определялась плотность материала кирпичей. Средние значения физико-механических характеристик кирпича приведены в таблице 1.

Анизотропия прочности на сжатие кирпича при действии сжимающего усилия под различными углами к опорной поверхности устанавливалась на основании испытаний, выпиленных из тела кирпича кубов с размером ребра 40 мм. Схема выпиливания образцов-кубов и их общий вид приведены на рисунке 2.

Для каждого испытания из кирпичей изготавливалось не менее пяти керамических образцов-кубов. Грани куба, контактирующие с плитами пресса, выравнивались тонким слоем гипсового раствора.

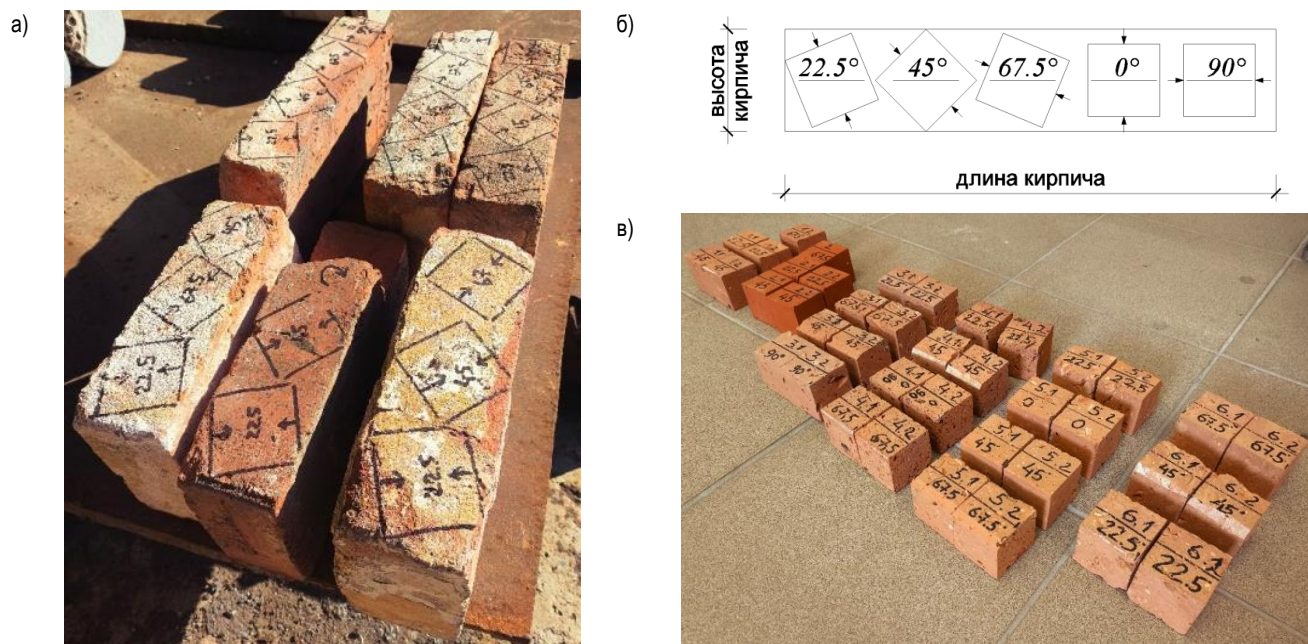
Таблица 1 – Результаты испытаний кирпича

Вид кирпича	Прочность на сжатие f_b (МПа)	Прочность на растяжение при изгибе $f_{лв}$ (МПа)	Плотность ($кг/м^3$)
БЛК 1905	11,1	3,9	1625
БЛК 1864	10,9	4,3	1712
ASIS KA	10,4	4,1	1550

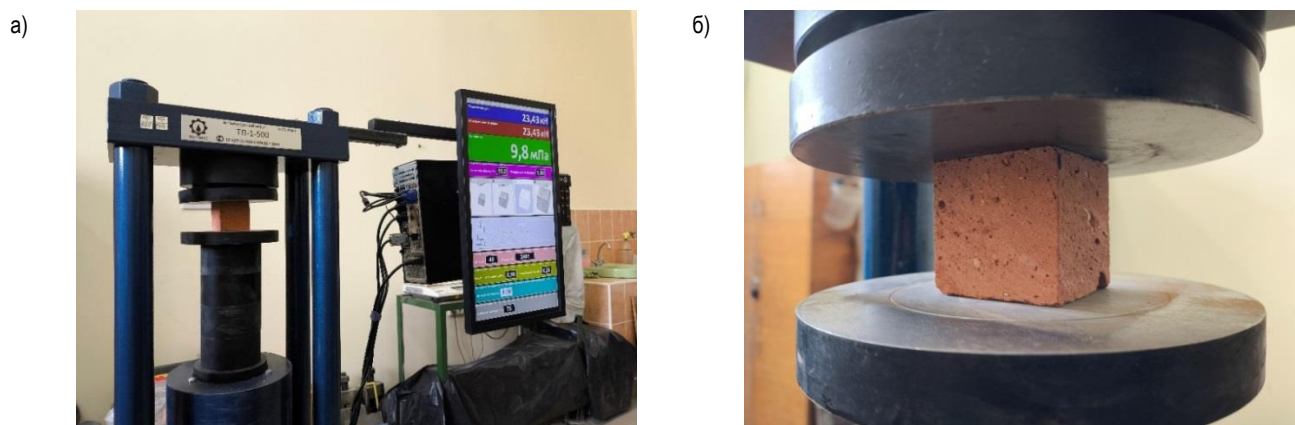
Испытание на сжатие опытных образцов-кубов производилось при помощи испытательного пресса ТП-1-500. Керамические кубы устанавливались одной из выбранных граней на нижнюю опорную плиту пресса центрально относительно его продольной оси. После установки образца на опорную плиту, верхняя плита пресса совмещалась с верхней опорной гранью образца, так, чтобы их плоскости полностью прилегали одна к другой. Нагружение образца производилось непрерывно, со скоростью, обеспечивающей его разрушения в пределах 30 секунд. Общий вид керамического образца-куба в испытательной установке и характер его разрушения показаны на рисунке 3.

Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытаний, принималось за разрушающую нагрузку. Прочность на сжатие образца определялась, как частное от деления разрушающей нагрузки на рабочую площадь его поперечного сечения. По результатам испытаний образцов-кубов определялись средние значения прочности на сжатие кирпича под углами $\theta = 0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ, 90^\circ$ к нормали к его опорной поверхности (рисунок 4).

При угле $\theta = 0^\circ$ нагрузка приложена перпендикулярно к опорной поверхности кирпича, что характерно для большинства случаев работы каменной кладки, а при $\theta = 90^\circ$ перпендикулярно торцевой поверхности кирпича.



а) разметка кирпича; б) схема выпиливания; в) опытные образцы-кубы
Рисунок 2 – Образцы-кубы для испытаний на сжатие



а) общий вид испытаний; б) характер разрушения
Рисунок 3 – Испытания образцов-кубов

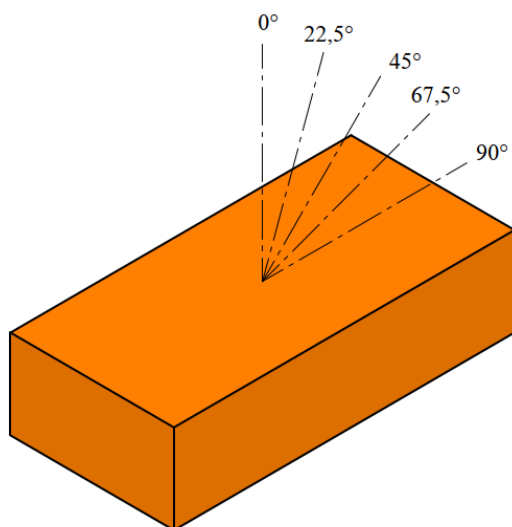


Рисунок 4 – Углы определения прочности на сжатие кирпича

Результаты исследования

Разрушение опытных образцов в подавляющем большинстве случаев носило хрупкий характер и проявлялось в виде образования трещин, параллельных направлению сжимающего усилия с последующим раскалыванием образца. При этом в верхней и нижней частях образца под воздействием сил трения между плитами прессы и гранями куба образовывались пирамиды, с отрывом боковых граней. Типичный характер разрушения опытных образцов, показан на рисунке 5.

В таблице 2 приведены средние значения прочности на сжатие керамических образцов-кубов и коэффициенты вариации прочности, полученные по результатам испытаний.



Рисунок 5 – Характер разрушения опытных образцов

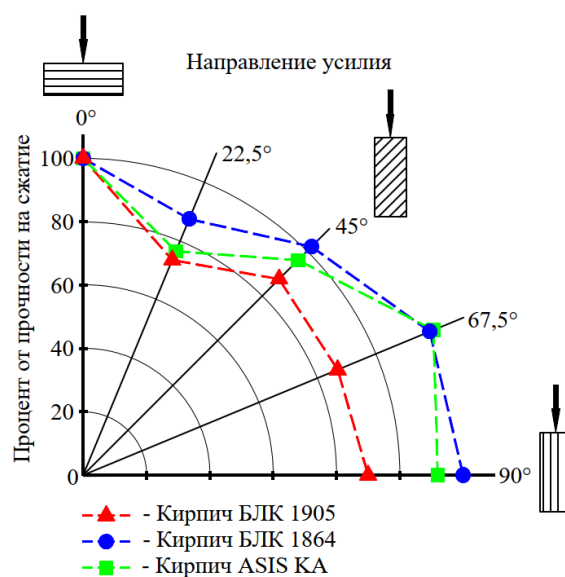
Таблица 2 – Результаты испытаний образцов-кубов

Угол наклона θ°	Количество испытанных образцов n	Среднее значение прочности на сжатие $f_{B(0)}$ (МПа)	Коэффициент вариации V %
Кирпич БЛК 1905			
0	5	18,7	20
22,5	6	13,8	11
45	5	16,4	30
67,5	7	16,3	16
90	5	16,9	32
Кирпич БЛК 1864			
0	5	13,5	19
22,5	5	11,8	23
45	5	13,8	35
67,5	5	16,0	31
90	5	16,2	25
Кирпич ASIS KA			
0	5	17,5	21
22,5	5	13,4	34
45	6	16,8	23
67,5	5	21,0	13
90	6	19,6	15

Из таблицы 2 следует, что для всех кирпичей минимальное значение прочности на сжатие имеет место при угле $\theta = 22,5^\circ$. Прочность кирпича на сжатие при $\theta = 22,5^\circ$ $f_{B(22,5)}$ оказалась ниже значения прочности в направлении ортогональном опорной плоскости $f_{B(0)}$ на 13–26 %. В диапазоне углов $\theta = 22,5^\circ$ – 45° наблюдается увеличение прочности на сжатие. При углах $\theta \geq 45^\circ$ прочность на сжатие кирпича БЛК 1905 оставалась практически постоянной и отличалась в меньшую сторону от прочности на сжатие $f_{B(0)}$ на 10–12 %. Для кирпичей БЛК 1864 и ASIS KA прочность на сжатие при $\theta = 67,5^\circ$ и 90° превышала значение $f_{B(0)}$.

Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рисунке 6.

В работе [13] представлены результаты испытаний кернов диаметром 45 мм, которые выбуривались под разными углами к опорной плоскости современного и исторического кирпича. Для исторического кирпича прочность на сжатие под углами $35^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ на 20–25 % превысила значение прочности $f_{B(0)}$. При этом минимальные значения прочности на сжатие имели место при $\theta = 20^\circ$. Значение прочности на сжатие $f_{B(20)}$, оказалось ниже значения $f_{B(0)}$ на 30 %, что удовлетворительно согласуется с результатами собственных исследований. Для современного кирпича анизотропия прочности на сжатие была менее выражена и при углах $\theta \leq 60^\circ$ отличалась не более чем на 6 % от прочности на сжатие ортогонально опорной поверхности, $f_{B(0)}$.

Рисунок 6 – Графики изменения прочности на сжатие в зависимости от угла θ°

Заключение

Выявленная анизотропия прочности на сжатие кирпича, объясняется технологией его производства и ориентацией частиц глинистых минералов в исходном материале [14–17]. На территории современной Беларуси практически до конца XIX века изготавливался кирпич ручной формовки. Ручная формовка кирпичей производилась в деревянных формах – глину уплотняли, а ее излишки срезали деревянной строганной рейкой. Из-за несовершенства технологии геометрические размеры исторического кирпича не выдерживались. Поверхность такого кирпича обычно имеет шероховатую фактуру с неровными гранями, следами деревянных форм и характеризуется наличием мелких трещин. При разломе кирпича часто наблюдается слоистость материала, каверны и различные минеральные включения [18, 20]. Данные факторы в значительной степени определяют анизотропию прочностных характеристик материала кирпича. По результатам выполненных исследований были получены новые экспериментальные данные об анизотропии прочности на сжатие керамического кирпича, используемого во второй половине XIX – начале XX века при строительстве зданий и оборонительных сооружений Брестской крепости. Установлено, что в диапазоне углов к нормали к опорной поверхности кирпича 0° – $22,5^\circ$ значение прочности на сжатие снижается, а в диапазоне углов $22,5^\circ$ – 90° возрастает. Для испытанных кирпичей значение прочности на сжатие при $\theta = 22,5^\circ$ оказалась ниже, чем в направлении ортогональном опорной поверхности на 13–26 %. Данное обстоятельство рекомендуется учитывать при выполнении численного анализа методом

конечных элементов микромоделей ответственных фрагментов или узлов исторических каменных конструкций.

С конца XIX века в производство кирпича начали внедряться новые технологии, основанные на механизированных процессах подготовки сырья и формовки кирпича. Большое значение имело также внедрение для обжига кирпича туннельных и кольцевых печей. Механический способ подготовки сырья, формовка под давлением, обжиг в стационарных печах при температурах выше 900 °С. позволили получать кирпич более плотной и однородной структуры по сравнению с кирпичом ручной формовки. Прочность кирпича увеличилась, улучшились его физико-механические характеристики, а также уменьшились различия в прочностных характеристиках материала кирпича в зависимости от направления сжимающего усилия [6, 10, 11].

Известно, что при испытании на сжатие образцов кладочных изделий их размеры влияют на результаты испытаний. При испытании на сжатие керамических кубов большое влияние на прочность оказывают силы трения по поверхности, контактирующей с плитами пресса. В связи с этим представляет интерес отношение прочности на сжатие керамических кубов с ребром 40 мм при $\theta = 0^\circ$ к прочности на сжатие кирпича, установленной в соответствии с ГОСТ 8462. Для кирпичей БЛК 1905 и АСИС КА данное значение составило 1,7, для кирпича БЛК 1864 – 1,3.

В работе [17] приведены результаты экспериментальных исследований различных видов керамических кирпичей. Данные исследования подтвердили возможность использования нестандартных кубических образцов размером 40 × 40 × 40 мм для определения прочности кирпичей на сжатие. Образцы-кубы часто являются более предпочтительными, по сравнению с стандартизированными образцами, при оценке прочности на сжатие полнотелых керамических кирпичей в существующих каменных конструкциях. Отмечено, что среди прочих преимуществ образцы-кубы с ребром 40 мм позволяет характеризовать анизотропию прочности на сжатие керамических кирпичей, по результатам испытаний на сжатие. Это особенно актуально для исторических каменных сооружений, когда отбор кладочных изделий ограничен. Исследование [17] показало, что экструированные полнотелые глиняные кирпичи обладают умеренной анизотропией прочности на сжатие, при этом наибольшая прочность наблюдается вдоль направления, перпендикулярного к экструзионной плоскости (это может быть толщина или длина в зависимости от процесса изготовления). Для кирпичей ручной формовки имела место выраженная анизотропия прочности на сжатие, что подтверждается результатами собственных исследований [6].

Список цитированных источников

1. Lourenço, P. B. A multi-surface interface model for the analysis of masonry structures / P. B. Lourenço, J. G. Rots // *Journal of Structural Engineering*, ASCE. – 1997. – Vol. 123 (7). – P. 660–668.
2. Lourenço, P. B. Computational strategies for masonry structures: PhD Dissertation / P. B. Lourenço ; Delfi University of Technology, Delfi University Press, The Netherlands. – 1996. – 210 p.
3. Malyszko, L. Modelowanie zniszczenia w konstrukcjach murowych z uzglednieniem anizotropii / L. Malyszko. – Olsztyn : Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, 2005. – 157 p.
4. Галалюк, А. В. Математическое моделирование образцов каменной кладки при сжатии / А. В. Галалюк, И. Е. Демчук // *Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС ; редкол.: М. Ф. Марковский [и др.]*. – Минск, 2012. – Вып. 4. – С. 20–29.
5. Демчук, И. Е. Моделирование испытаний образцов каменной кладки при сжатии вдоль горизонтальным раствором швам / И. Е. Демчук, А. В. Галалюк // *Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура*. – 2013. – № 1. – С. 122–128.
6. Матяс, П. И. Анизотропия прочности на сжатие керамического кирпича // П. И. Матяс, В. Н. Деркач, А. В. Галалюк // *Вестник Брестского государственного технического университета*. – 2026. – № 1 (139). – С. 59–63. – DOI: 10.36773/1818-1112-2026-139-1-59-63.
7. Деркач, В. Н. Каменные и армокаменные конструкции. Оценка технического состояния, ремонт и усиление / В. Н. Деркач. – Минск : СтройМедиа Проект, 2021. – 256 с.
8. Орлович, Р. Б. Оценка технического состояния исторических каменных зданий / Р. Б. Орлович, С. С. Зимин. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 209 с.
9. Tkacz, P. Wybrane sposoby określania wytrzymałości muru w budynkach istniejących / P. Tkacz, R. Orłowicz // XXXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta WPPK: Materiały Konferencyjne, Gliwice, 5–8 marca 2019. – Gliwice, 2019. – S. 227–242.
10. Улыбин, А. В. О методах контроля прочности керамического кирпича при обследовании зданий и сооружений / А. В. Улыбин, С. В. Зубков // *Инженерно-строительный журнал*. – № 3. – 2013. – С. 29–34.
11. Стандартная и альтернативная методики определения прочности кирпича при обследовании зданий и сооружений / А. В. Улыбин, С. В. Зубков, О. Ю. Сударь, Е. А. Лаптев // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. – 2014. – № 3 (18). – С. 9–24.
12. Matysek, P. Identyfikacja wytrzymałości na ściskanie i odkształcalności murów ceglanych w obiektach istniejących / P. Matysek. – Kraków : Politechnika Krakowska, 2014. – 167 s.
13. Einfluss der Belastungsrichtung auf die einaxiale Druckfestigkeit von Proben aus Vollziegeln / A. Krawtschuk, O. Zeman, J. Schellander [et al.] // *Mauerwerk*. – 2014. – № 2. – P. 98–104.
14. Иванова, О. А. Минералогический анализ как основа керамического кирпича / О. А. Иванова, В. А. Клевакин // *Строительные материалы*. – 2010. – № 12. – С. 13–15.
15. Bartusch, R. Laminations in Extrusion / R. Bartusch, F. Händle // *Extrus. Ceram. Eng. Mater. Process*. – Berlin : Springer, 2009. – P. 187–210.
16. Cabané, A. Measurement of Solid Brick Compressive Strength and Anisotropy on Non-Standard Small Cubic Specimens / A. Cabané, L. Pela, P. Roca // *Structural Analysis of Historical Constructions : SAHC 2023 / ed.: Y. Endo, T. Hanazato*. – Cham : Springer, 2024. – P. 591–602. – (RILEM Bookseries ; vol. 47). – DOI: 10.1007/978-3-031-39603-8_48.
17. Cabané A. Anisotropy and compressive strength evaluation of solid fired clay bricks by testing small specimens / A. Cabané, L. Pela, P. Roca // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 344. – Art. 128195. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128195.
18. Инчик, В. В. Исследование Петербургского кирпича, изготовленного в VIII–IX вв., прошедшего многолетнюю эксплуатацию / В. В. Инчик // *Вестник гражданских инженеров*. – 2018. – № 4. – С. 107–115.
19. Желдаков, Д. Ю. Определение долговечности строительной керамики / Д. Ю. Желдаков, В. Т. Ерофеев // *Вестник МГСУ*. – 2024. – Т. 19, Вып. 3. – С. 394–402. – DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.394-402.
20. Желдаков, Д. Ю. Проблемы сохранности и реставрации кирпичной кладки зданий и сооружений / Д. Ю. Желдаков, В. Б. Дорохов // *Современные подходы к сохранению историко-культурного наследия стран СНГ : сб. ст. Междунар. науч. форума, Полоцк, 29 сент.–3 окт. 2025 г. / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой ; под науч. ред. В. Е. Овсейчика*. – Полоцк : Новополюк : Полоцкое книжное издательство ; ПГУ им. Е. Полоцкой, 2025. – С. 195–203. – DOI: 10.52928/978-985-531-917-8-2025-195-203.

References

1. Lourenço, P. B. A multi-surface interface model for the analysis of masonry structures / P. B. Lourenço, J. G. Rots // *Journal of Structural Engineering*, ASCE. – 1997. – Vol. 123 (7). – P. 660–668.
2. Lourenço, P. B. Computational strategies for masonry structures: PhD Dissertation / P. B. Lourenço ; Delfi University of Technology, Delfi University Press, The Netherlands. – 1996. – 210 p.
3. Malyszko, L. Modelowanie zniszczenia w konstrukcjach murowych z uzglednieniem anizotropii / L. Malyszko. – Olsztyn : Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, 2005. – 157 p.
4. Galalyuk, A. V. Matematicheskoe modelirovanie obrazcov kamennoj kladki pri szhatii / A. V. Galalyuk, I. E. Demchuk // *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona: sb. nauch. tr. / In-t BelNIIS ; redkol.: M. F. Markovskij [i dr.]*. – Minsk, 2012. – Vyp. 4. – S. 20–29.

5. Demchuk, I. E. Modelirovanie ispytaniy obrazcov kamennoy kladki pri szhatii vdol' gorizonta'nym rastvornym shvam / I. E. Demchuk, A. V. Galalyuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2013. – № 1. – S. 122–128.
6. Matyas, P. I. Anizotropiya prochnosti na szhatie keramicheskogo kirpicha // P. I. Matyas, V. N. Derkach, A. V. Galalyuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2026. – № 1 (139). – S. 59–63. – DOI: 10.36773/1818-1112-2026-139-1-59-63.
7. Derkach, V. N. Kamennye i armokamennye konstrukcii. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya, remont i usilenie / V. N. Derkach. – Minsk : StrojMedia Proekt, 2021. – 256 s.
8. Orlovich, R. B. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya istoricheskikh kamennykh zdaniy / R. B. Orlovich, S. S. Zimin. – SPb. : POLITEKH-PRESS, 2024. – 209 s.
9. Tkacz, P. Wybrane sposoby określania wytrzymałości muru w budynkach istniejących / P. Tkacz, R. Orłowicz // XXXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta WPPK: Materiały Konferencyjne, Gliwice, 5–8 marca 2019. – Gliwice, 2019. – S. 227–242.
10. Ulybin, A. V. O metodah kontrolya prochnosti keramicheskogo kirpicha pri obsledovanii zdaniy i sooruzhenij / A. V. Ulybin, S. V. Zubkov // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. – № 3. – 2013. – S. 29–34.
11. Standartnaya i al'ternativnaya metodiki opredeleniya prochnosti kirpicha pri obsledovanii zdaniy i sooruzhenij / A. V. Ulybin, S. V. Zubkov, O. YU. Sudar', E. A. Laptev // Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenij. – 2014. – № 3 (18). – C. 9–24.
12. Matysek, P. Identyfikacja wytrzymałości na ściskanie i odkształcalności murów ceglanych w obiektach istniejących / P. Matysek. – Kraków : Politechnika Krakowska, 2014. – 167 s.
13. Einfluss der Belastungsrichtung auf die einaxiale Druckfestigkeit von Proben aus Vollziegeln / A. Krawtschuk, O. Zeman, J. Schellander [et al.] // Mauerwerk. – 2014. – № 2. – P. 98–104.
14. Ivanova, O. A. Mineralogicheskij analiz kak osnova keramicheskogo kirpicha / O. A. Ivanova, V. A. Klevakin // Stroitel'nye materialy. – 2010. – № 12. – S. 13–15.
15. Bartusch, R. Laminations in Extrusion / R. Bartusch, F. Händle // Extrus. Ceram. Eng. Mater. Process. – Berlin : Springer, 2009. – P. 187–210.
16. Cabané, A. Measurement of Solid Brick Compressive Strength and Anisotropy on Non-Standard Small Cubic Specimens / A. Cabané, L. Pela, P. Roca // Structural Analysis of Historical Constructions : SAHC 2023 / ed.: Y. Endo, T. Hanazato. – Cham : Springer, 2024. – P. 591–602. – (RILEM Bookseries ; vol. 47). – DOI: 10.1007/978-3-031-39603-8_48.
17. Cabané A. Anisotropy and compressive strength evaluation of solid fired clay bricks by testing small specimens / A. Cabané, L. Pela, P. Roca // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 344. – Art. 128195. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128195.
18. Inchik, V. V. Issledovanie Peterburgskogo kirpicha, izgotovlenno go v VIII–IX vv., proshedshego mnogoletnyuyu ekspluatatsiyu / V. V. Inchik // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2018. – № 4. – S. 107–115.
19. Zheldakov, D. YU. Opredelenie dolgovechnosti stroitel'noj keramiki / D. YU. Zheldakov, V. T. Erofeev // Vestnik MGSU. – 2024. – T. 19, Vyp. 3. – S. 394–402. – DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.394-402.
20. Zheldakov, D. YU. Problemy sohrannosti i restavratsii kirpichnoj kladki zdaniy i sooruzhenij / D. YU. Zheldakov, V. B. Dorohov // Sovremennye podhody k sohraneniyu istoriko-kul'turnogo naslediya stran SNG : sb. st. Mezhdunar. nauch. foruma, Polock, 29 sent.– 3 okt. 2025 g. / Poloc. gos. un-t im. Evfrosinii Polockoj ; pod nauch. red. V. E. Ovsejchika. – Polock ; Novopolock : Polockoe knizhnoe izdatel'stvo ; PGU im. E. Polockoj, 2025. – S. 195–203. – DOI: 10.52928/978-985-531-917-8-2025-195-203.

Материал поступил 16.05.2026, одобрен 08.06.2026,
принят к публикации 08.06.2026

УДК 624.042.42

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СНЕГОВЫХ НАГРУЗОК НА ПОВЕРХНОСТИ КУБА И ОБРАЗОВАНИЯ СНЕЖНЫХ ЗАНОСОВ ВОКРУГ КУБА

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 рассматривается моделирование снеговых нагрузок на здания и сооружения, а также анализ процессов переноса снега воздушными потоками. Рассмотрены механизмы формирования снеговой нагрузки и факторы, влияющие на её величину и распределение: количество выпадающих осадков, форма покрытия здания, перенос снега воздушными массами (способен значительно изменять месторасположение и количество снега на различных поверхностях) и теплотехнические характеристики кровли. Изложены полевые наблюдения за распределением снега, проведённые на заранее выбранных площадках. Описаны особенности выбранного участка, расположенного в равнинной местности с учетом специфики климатических условий и ветровых режимов. Приведены технические параметры весоизмерительной установки, включающие использование датчиков и автоматизированной системы записи данных. Подробно описана методика проведения полевых измерений, включая автоматический сбор данных о запасе воды в снеге, температуре и скорости ветра. Результаты полевых исследований демонстрируют детальное изменение снежного покрова в зимний период. Подготовка точных исходных данных – важнейший этап, который закладывает основу для успешного численного анализа. Ошибки или неточности могут привести к искажениям и неверным прогнозам в моделируемых сценариях. На основе данных, полученных весоизмерительной установкой и датчиками, определяющими скорость и направление ветра, было выполнено численное моделирование распределения снега на поверхности куба и образования снежных заносов вокруг куба на поверхности земли. В статье отображено сравнение результатов полевых наблюдений за кубом и результатов, полученных при помощи математического моделирования на основе метода предложенного М. Нааим. Актуальность данной темы обусловлена необходимостью более точного определения снеговых нагрузок, что способствует повышению надежности строительных конструкций и инфраструктуры.

Ключевые слова: снеговая нагрузка, распределение, моделирование, гидродинамика.

ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF SNOW LOADS ON THE SURFACE OF THE CUBE AND THE FORMATION OF SNOW DRIFT AROUND THE CUBE

A. G. Aliokh

Abstract

This article examines the modeling of snow loads on buildings and structures, as well as the analysis of snow transport by air currents. It examines the mechanisms of snow load formation and the factors influencing its magnitude and distribution, including precipitation amount, building roof shape, snow transport by air masses (which can significantly alter the location and amount of snow on various surfaces), and roof thermal performance. Field observations of snow distribution, conducted at pre-selected sites, are presented. The features of the selected site, located in flat terrain, are described, taking into account the specific climatic conditions and wind patterns. The technical parameters of the weighing rig, including the use of sensors and an automated data recording system, are presented. The methodology for conducting field measurements is described in detail, including automatic data collection on snow water content, temperature, and wind speed. The results of the field studies demonstrate detailed changes in snow cover during the winter. Preparing accurate initial data is a crucial step, laying the foundation for successful numerical analysis. Errors or inaccuracies can lead to distortions and incorrect predictions in simulated scenarios. Using data obtained from a weighing system and sensors measuring wind speed and direction, a numerical simulation of snow distribution on the surface of a snow cube and the formation of snow drifts around the cube on the ground surface was performed. This article compares the results of field observations of the cube with those obtained through mathematical modeling based on the method proposed by M. Naaim. The relevance of this topic stems from the need to more accurately determine snow loads, which contributes to improving the reliability of building structures and infrastructure.

Keywords: snow load, distribution, simulation, hydrodynamics.

Введение

Снеговая нагрузка на кровлю формируется под воздействием ряда факторов.

1. Количество выпадающих в зимнее время твердых осадков – значение веса снегового покрова (веса воды) на квадратный метр поверхности земли. Зависит от высоты местности над уровнем моря.

2. Форма покрытия и распределения снеговых отложений по поверхности кровельного покрытия. Является причиной ссыпания снега с наклонных поверхностей (в отличие от сдувания, вызывается действием силы тяжести, а не ветра). Вероятность сползания слоя снега зависит от шероховатости поверхности, уклона покрытия и теплопроводности кровли (подтаивший на поверхности покрытия снег играет роль своеобразной смазки), а также от состояния самого снежного покрова, которое в значительной степени определяется температурой воздуха во время его залегания.

3. Сдувание снега с покрытия (ветровая защищенность или перенос снега, приводящий к неравномерным отложениям по поверхности по-

крытия и к сносу некоторой части выпавшего снега с покрытия). Зависит от конфигурации и шероховатости поверхности покрытия, направления и скорости ветра, а также от состояния снежного покрова, которое определяется температурой воздуха во время его залегания.

4. Теплотехнические характеристики кровли и влияние подтаивания снега.

5. Качество снега (температура, диаметр частиц, сила сцепления частиц).

В нормативных документах для определения значения снеговых нагрузок на покрытия зданий и сооружений предусмотрены схемы распределения снеговой нагрузки. Однако их количество ограничено. Поэтому для определения снеговых нагрузок, распределенных на покрытии, форма или конфигурация которого отсутствует среди схем, предложенных в нормативных документах, рекомендуется проводить модельные испытания [1]. Наиболее эффективным в настоящее время методом прогнозирования является проведение экспериментов в аэродинамической трубе с модельным снегом [2, 3]. Однако

до сих пор существуют неопределенности относительно законов подобию между реальным и аэродинамическим снегом, включая их физические свойства [4–8]. В последние годы, благодаря развитию компьютерных технологий и широкому распространению программного обеспечения для вычислительной гидродинамики – CFD (от англ. Control Fluid Dynamic), численное моделирование воздушного потока с помощью CFD становится всё более популярным [9]. Метод вычислительной гидродинамики имеет преимущество перед экспериментальными методами моделирования в том, что параметры модели являются контролируемыми без ограничений [10].

1 Полевые наблюдения за распределением снега на поверхности куба и образования снежных заносов вокруг куба на поверхности земли

Для верификации результата численного моделирования снеготранспорта методами вычислительной гидродинамики были проведены полевые наблюдения за распределением снега на поверхности куба и образования снежных заносов вокруг куба на поверхности земли.

1.1 Характеристики места проведения полевых наблюдений

Выбор места определялся как наиболее подходящий из доступных. Местность – равнинная, в большой удаленности от крупных рек и озер. В северном и западном направлениях ограничена деревьями высотой от пяти до восьми метров, в восточном – деревьями высотой до пяти метров и кустарниками, ограничивающими наметание снега с пахотных земель, со стороны южного направления – одноэтажной постройкой хозяйственно-бытового назначения.

Остальные характеристики участка:

- высота над уровнем моря – 142,26 м [11];
- преобладающее направление ветра за декабрь – февраль – западный ветер [12];

- среднее количество (сумма) осадков за ноябрь – март – 185 мм [12];
- максимальная суточная высота снежного покрова за зиму на последний день декады – 45 см [12];
- дата появления первого снега (самая ранняя) – 13 октября 1973 г. [13];
- дата появления первого снега (средняя) – 21 ноября [13];
- дата последнего схода снега (средняя) – 30 марта [13];
- дата последнего схода снега (самая поздняя) – 28 апреля 1984 г. [13].

Измерения проводились на двух площадках расположенных в непосредственной близости друг от друга.

Площадка № 1 (см. рисунок 1) находится в месте защищенном от ветра со всех сторон с установленной весоизмерительной платформой со следующими техническими характеристиками.

Максимальная нагрузка – 200 кг.

Минимальная статическая нагрузка – 0 кг.

Чувствительность весовой платформы – $\pm 0,005$ кг.

Пределы допускаемой погрешности, кг:

- от 0 до 10 000·v включительно: $\pm 0,35$ v;
- свыше 10 000·v: $\pm 0,70$ v,

где v – значение поверочного интервала, кг ($v = E_{\max}/6n_{\max}$);

$E_{\max}$ – максимальная нагрузка;

$n_{\max}$ – максимальное число поверочных интервалов (3000).

Рабочий диапазон температур – от минус 35 °C до 80 °C.

Степень защиты – IP68.

Для определения температуры наружного воздуха установлен термометр сопротивления платиновый на высоте 1,1 м. Для определения скорости ветра на высоте 1,6 м установлен анемометр чашечный.



Рисунок 1 – Площадка № 1. Установка для измерения массы снега

Площадка № 2 (см. рисунок 2) представляет собой ровную устойчивую поверхность размером 12 м × 18 м, не защищенную от ветра с восточного и юго-восточного направлений. За опорную поверхность принимается граница в нижней части снежного покрова или снеготалопа – поверхность земли.

На площадке был установлен куб (размер – 1,03 м × 1,03 м × 1,03 м). Для исключения скольжения снега по поверхности куба он был изготовлен из материала с нескользящей поверхностью. Для измерения высоты снега, скопившегося на поверхности земли возле куба (снежных заносов) и на кубе использовалось метрологическое ве-

ренное измерительное оборудование: линейки (цена деления – 1 мм), штангенциркуль (цена деления – 0,1 мм).

Измерения проводились вручную, после снегопадов. Погрешность измерений: 0,05 мм – при определении высоты скопившегося снега на поверхности куба, 5 мм – при определении высоты снежного заноса на поверхности земли.

Рядом с Площадкой № 2 (см. рисунок 2) на высоте 1,2 м над поверхностью земли установлен датчик для измерения скорости и направления ветра. Полученные показания скорости осреднены за 10-ти минутный период, непосредственно предшествующий сроку наблюдения.

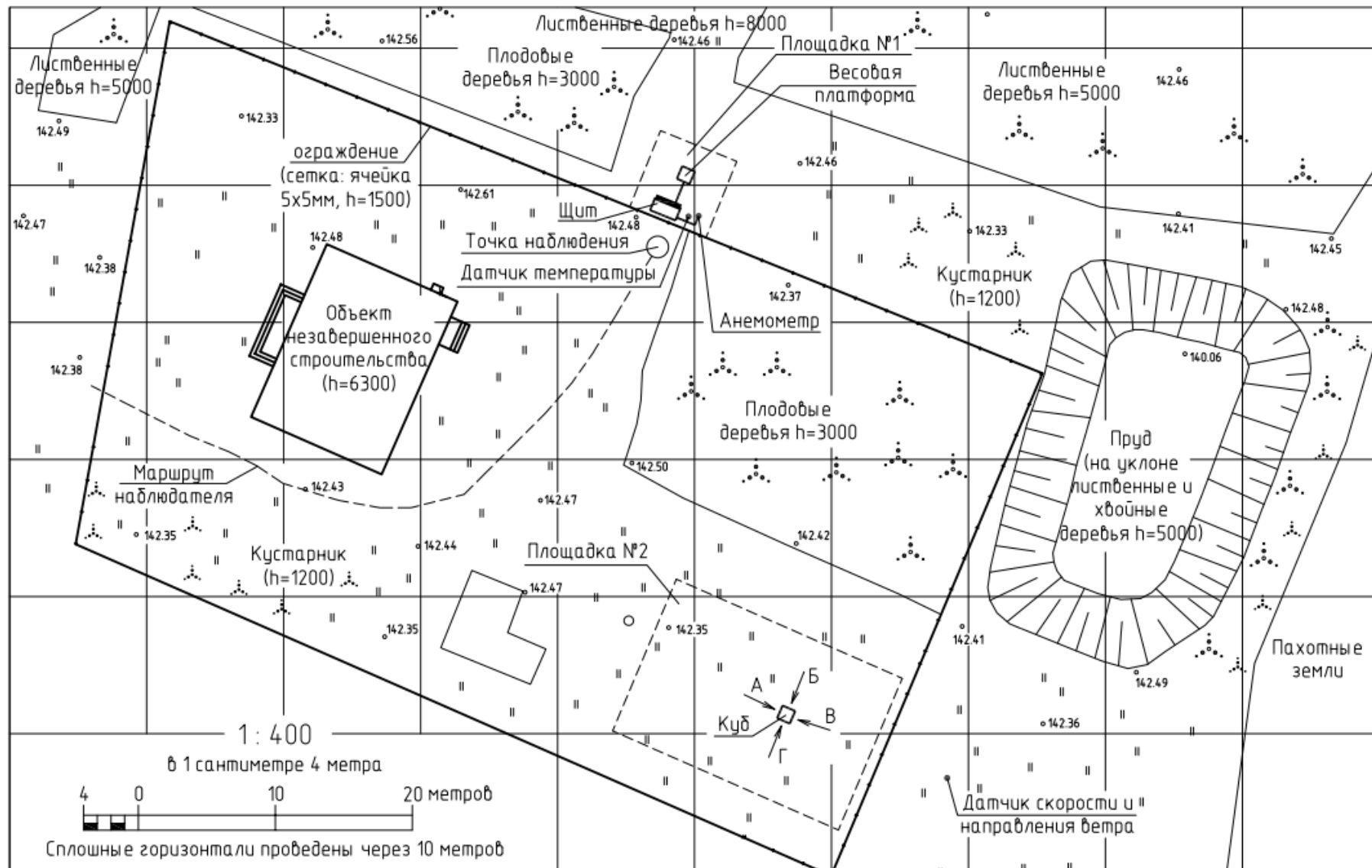


Рисунок 2 – Схема наблюдательного участка

1.2 Обработка полученных результатов

Измерения массы снега, температуры и скорости ветра на Площадке № 1 проводились автоматически каждые 5 мин. Результаты наблюдений были усреднены и сведены в таблицу 1.

На рисунке 5а представлена схема высоты снежного покрова, на рисунках 6а–8а – наблюдаемое распределение высоты снежного покрова на момент наблюдения.

2. Построение карты распределения снега с помощью метода вычислительной гидродинамики

В качестве исходных данных примем результаты полевых наблюдений приведенные в таблице 1. Разделим процесс моделирования на два снегопада.

Первый снегопад:

1) высота снежного покрова – 45 мм;

2) снеговая нагрузка – 48,76 Па;

3) скорость ветра – отсутствует (объект наблюдения защищен от ветра);

4) плотность снега (средняя) – 90 кг/м³;

5) температура (средняя) – минус 4,42 °С;

6) продолжительность снегопада – 70 ч 40 мин;

7) интенсивность – 0,07 мм/ч;

Второй снегопад:

1) высота снежного покрова – 60 мм (свежевыпавшего – 15 мм);

2) снеговая нагрузка – 39,24 Па;

3) скорость ветра: средняя и самая продолжительная – 1,1 м/с, (кратковременные порывы ветра до 1,8 м/с);

4) направление ветра – совпадает с направлением вида «В» (Площадка № 2) в соответствии с рисунком 2;

5) плотность снега (средняя) – 149,5 кг/м³;

6) температура (средняя за 06.01.2026) – минус 3,8 °С;

7) продолжительность снегопада – 8 ч 15 мин;

8) интенсивность – 0,49 мм/ч.

Т. к. при переносе ветром кристаллы меняют свою форму и размер, поэтому было решено в качестве снега принять гранулы диаметром 1,2 мм.

Таблица 1 – Результаты наблюдений за снежным покровом

Дата	Высота снежного покрова (мм)	Снеговая нагрузка (Па)	Скорость ветра (среднее и максимальное значение) на высоте 1,2 м около Площадки № 2	Направление ветра на высоте 1,2 м над поверхностью земли	Плотность снежного покрова (кг/м ³)	Температура воздуха на высоте 1,1 м над поверхностью земли (среднее значение)	Относительная влажность (%) на высоте 2 метра над поверхностью земли ¹	Количество всех наблюдающихся облаков в период с 09:00 по 18:00 ¹	Продолжительность снегопада	Интенсивность снегопада (мм/ч)
31.12.2025	–	8,83	– ²	ВСВ ²		–12,9	73	45 %	5 ч 15 мин	0,17
01.01.2026	31	15,7	– ²	Ю ²	51,61	–7,8	85	98 %	с 12:40_01.01.2026 по 02:25_04.01.2026 непрерывный слабый снег 0,06 мм/ч	
02.01.2026	–	28,45	– ²	ЮЗ ²		–0,1	83	100 %		
03.01.2026	43	44,34	– ²	ЮЗ ²	105,12	–0,8	82	88 %		
04.01.2026	–	47,28	– ²	ЮЗ ²		–1,6	66	55 %		
05.01.2026	45	48,76	– ²	ЮЗ ²	110,44	–3,3	73	40 %	3 ч 40 мин	0,04
06.01.2026	–	88	1,1 (1,8)	В		–3,8	85	100 %	8 ч 15 мин	0,49
07.01.2026	60	88	– ²	С ²	149,50	–5,2	84	100 %	осадки не наблюдались	

– измерения высоты снежного покрова не проводились.

¹ Информация о величине относительная влажность (%) на высоте 2 метра над поверхностью земли и количестве всех наблюдающихся облаков была получена из архивных данных близлежащей метеорологической станции.

² Информация о преобладающем направлении ветра (румбы) на высоте 10–12 метров над земной поверхностью, осредненное за 10-минутный период, непосредственно предшествовавший сроку наблюдения была получена из архивных данных близлежащей метеорологической станции. Площадка № 2 в этих направлениях защищена от ветра.

Задачу построения схемы распределения снега будем решать основываясь на работе [14], которую в 1998 году опубликовал французский ученый М. Naaim. Эта работа стала основой для разработки современных моделей снегопереноса и снегоотложения [15–19]. Для моделирования массообмена между воздухом и снегом Naaim предложил «эрозийную» модель, в которой процесс массообмена зависит от характеристик турбулентности основного потока, от критической скорости потока (скорость потока, соответствующая началу переноса частиц снега) и локальной концентрации снега.

Одной из основополагающих работ, лёгшей в основу подавляющего большинства теоретических наработок по вопросу механики процессов золотого переноса, является труд «Физика выдуваемого песка и пустынных дюн» Р. А. Багнольда [20]. В нем заложены основы научного исследования динамики движения песка по преимущественно равнинной местности (как песок поднимается, транспортируется и накапливается на плоской поверхности), а также золотого переноса и аэродинамики воздушных потоков, когда они перемещаются по изогнутым поверхностям скоплений песка. Подчеркивается

также возможность воспроизведения этих природных явлений в контролируемых условиях лаборатории. Используя аэродинамическую трубу, построенную самим ученым, Р. А. Багнольд стремился получить более глубокое понимание физики, управляющей взаимодействием между воздушными потоками и песчинками, и наоборот. Помимо изучения песка и его динамики в контексте ветра, Р. А. Багнольд также выделяет различия и сходства между движением песка в воздухе и воде и сравнивает песок и сухой зернистый снег, отмечая параллели в их движении.

Снег, как и песок, участвует в эоловых процессах, но песчинки, в отличие от снежинок, не обладают свойством когезии (внутрифазного сцепления частиц). Однако, снег, который выпал при очень низких температурах, скажем -15°C , и в совершенно безветренную погоду представляет собой крайний случай отсутствия внутреннего сцепления частиц [21].

Перенос снега начинается, когда аэродинамическое поверхностное напряжение сдвига достаточно велико, чтобы преодолеть инерцию и прочность сцепления частиц в поверхностном слое снежного покрова. Затем частицы начинают перекачиваться и скользить по поверхности снега (ползучесть) и в конечном итоге, если доступной энергии вязкого сдвига достаточно, преодолевают силу тяжести и выбрасываются из снежного покрова, прыгая по поверхности (сальтация). Частицы в области сальтации сталкиваются со снежным покровом, который затем может сместить больше частиц с поверхности. Если турбулентная энергия поля потока достаточно велика, то эти частицы могут подниматься

далее вверх турбулентными вихрями (взвесью). Длительное осаждение и взвесь частиц снега расходуют турбулентную энергию жидкости-носителя, что означает, что этот процесс является самоограничивающимся, т. е. при идеальных условиях могут существовать стационарные концентрации. Кроме того, на поверхности снежного покрова может также происходить локальное размывание снега в результате набегающих потоков [22–24].

Таким образом, дрейфующий снег возникает в результате вызванного ветром движения частиц снега, оседающих на землю. Такое движение возможно, когда сила сопротивления, создаваемая воздушным потоком, превышает противодействующие эффекты когезионного сцепления между частицами, веса частиц и поверхностного трения. Этот порог аэродинамического уноса был выведен Р. А. Багнольдом и называется порогом текучести. Ученый также определил порог воздействия, который применяется при более низком поверхностном напряжении сдвига, когда частицы уже дрейфуют. Достаточно большое количество дрейфующих частиц извлекает достаточный импульс из воздушного потока, чтобы заметно снизить его скорость и снизить поверхностное напряжение сдвига ниже порогового значения для жидкости. Столкновения частиц на поверхности в этом случае помогут поддерживать дрейф, приводя в движение поверхностные частицы, облегчая перенос их более медленным воздушным потоком при меньшем поверхностном напряжении сдвига. Р. А. Багнольд также классифицировал эолово дрейфующее движение частиц на три подпроцесса: ползучесть, сальтацию и взвесь (рисунки 3).

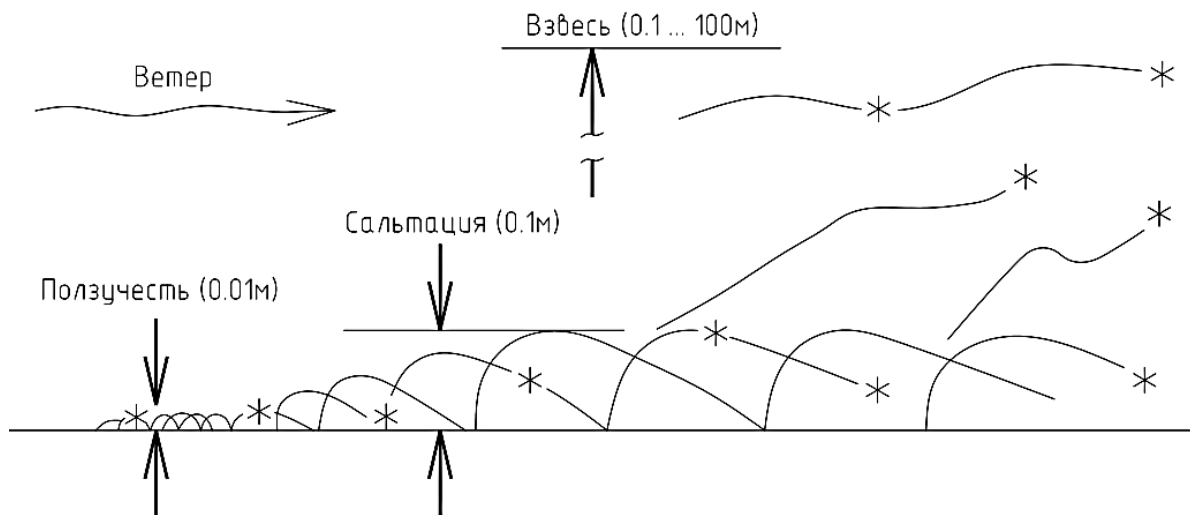


Рисунок 3 – Перенос снежных частиц ветром

Перенос снежных частиц ветром включает в себя три способа движения:

1) *ползучесть* – это явление, при котором зерна движутся за счет перекачивания, скольжения или сползания по поверхности тех частиц, которые слишком тяжелы, чтобы их мог поднять преобладающий ветер и на высоте ниже около 0,01 м, когезия которых с поверхностью сильнее силы ветра. Мигрирующие снежные волны или дюны образуются из ползущего снега, и эти дюны перемещаются вниз по ветру со скоростью, пропорциональной скорости ветра. Было определено, что при ветре со средней скоростью 8 м/с наблюдалось движение снежных волн со скоростью 5 м/ч, которые переносили около 45 кг снега в час на метр ширины по ветру. Скорость снежных волн составляет от 1,2 до 6 м/ч, длина волн варьируется от 3 до 15 м, а высота – от 0,05 до 0,2 м. Ползущие частицы обычно составляют очень малую часть общего переноса снега, за исключением очень низких скоростей ветра;

2) *сальтация* – перемещение частиц снега «скачками» или «прыжками» по поверхности снега. Слой снега, в котором происходит сальтация, не является слоем частиц однородной формы: это смесь связанных между собой кристаллов, метаморфизован-

ных под воздействием сальтационных частиц и переноса пара при транспортировке. Траектория движения частиц сальтации зависит от скорости ветра, размера частиц и состояния поверхности. Они движутся по траектории с резким, почти вертикальным подъемом и плоским, почти горизонтальным спуском. Масса материала, которую поток способен перенести в слое сальтации, определяется по формуле (2.1). Высота области сальтации составляет от 0,01 м до 0,1 м;

3) *взвешенный слой* (турбулентная диффузия, суспензия) – движение частиц снега во взвешенном потоке со средней горизонтальной скоростью, близкой к скорости движущегося воздуха. Источником взвешенных частиц является сальтационный слой, образуется из мелких наносов и включает краткосрочные (диаметр 20–70 μm , частицы возвращаются в слой сальтации), и долгосрочные (диаметр $< 20 \mu\text{m}$, материал полностью уносится потоком взвеси). Взвешенная частица становится взвешенной, когда сила сопротивления, действующая на нее со стороны движущегося вверх воздуха, превышает силу гравитации [25, 26].

Особый интерес для этого исследования представляет двусторонне связанный режим сальтации. Р. А. Багнольд [20] предложил

формулу описывающую массу материала, который ветер способен перенести в слое сальтации. Она имеет вид

$$q = C \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} \cdot \frac{\rho}{g} \cdot u_*^3, \quad (2.1)$$

где q – масса песка, который перемещается по полосе единичной ширины мимо фиксированной точки в единицу времени по поверхности сыпучего песка и градиентом ветра, который его гонит;

C – безразмерная константа (эмпирический коэффициент имеет следующие значения: 1,5 для почти однородного песка, 1,8 для песка с естественной гранулометрией, например, для песка, который встречается в дюнах, 2,8 для песка с очень широким диапазоном размеров зерен);

ρ – плотность воздуха (г/см³);

g – ускорение свободного падения (см/с²);

d – референтный размер песчинки (диаметр зерен рассматриваемого песка);

D – равномерный размер песчинок использованный Р. А. Багнольдом при проведении экспериментов (250 мкм);

u_* – скорость трения (фактическая измеренная скорость перемещения песка), выражение для которой имеет вид

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}, \quad (2.2)$$

где τ – местное напряжение сдвига на стенке;

ρ – плотность воздуха.

$$q_{ero/dep} = \begin{cases} q_{ero} = A \cdot \rho \cdot (u_*^2 - u_{*t}^2), & \text{для } u_* > u_{*t} \\ q_{dep} = \rho_s \cdot f \cdot w_f \cdot \frac{u_{*t}^2 - u_*^2}{u_{*t}^2}, & \text{для } u_* \leq u_{*t} \end{cases}, \quad (2.4)$$

где $A \cdot \rho = 7 \cdot 10^{-4}$ – коэффициент пропорциональности, характеризует силу сцепления частиц снега

u_{*t} – предельная скорость трения

$$u_{*t} = A_1 \cdot \sqrt{\frac{\rho_i - \rho_a}{\rho_i} \cdot g \cdot d_s}, \quad \text{здесь, согласно [29]:}$$

$A_1 = 0,2$ – пороговый параметр;

ρ_i – плотность частиц снега;

ρ_a – плотность воздуха;

$$f_{sal/susp} = \begin{cases} f_{sal} = \frac{0.68}{g \cdot u_* \cdot \rho_p \cdot h_{sal}} \cdot u_{*t} \cdot (u_*^2 - u_{*t}^2), & \text{для } z \leq h_{sal} \\ f_{susp} = \eta(z_r) \cdot e^{-1.55 \cdot \left[(0.05628 \cdot u_*)^{-0.544} - z^{-0.544} \right]}, & \text{для } z > h_{sal} \end{cases}, \quad (2.5)$$

$u_p = C \cdot u_{*t} = (2.3 \dots 2.8) \cdot u_{*t}$ – средняя скорость частицы снега в области сальтации;

$$h_{sal} = \frac{1.6 \cdot u_*^2}{2 \cdot g} \quad \text{– средняя высота области сальтации;}$$

$\eta(z_r) = 0.8 \text{ кг/м}^3$ – эталонная массовая концентрация для суспензии [26];

Пристеночные сдвиговые напряжения являются очень важным параметром в процессе снеготранспорта и снеготложения. Частицы снега начинают двигаться, когда пристеночные сдвиговые напряжения τ на поверхности снега превышает его предельные значения τ_t , в противном случае частицы снега остаются неподвижными. В численном моделировании пристеночное сдвиговое напряжение τ заменяется скоростью трения u_* .

Теодор фон Кармана и Прандтль в начале 1930-х годов открыли логарифмический закон скорости потока [27], в соответствии с которым формула (2.2) принимает вид

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \frac{u(z) \cdot k}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, \quad (2.3)$$

где $u(z)$ – средняя скорость (м/с) потока на высоте z ;

z – высота над поверхностью (м);

z_0 – аэродинамическая высота (м) шероховатости (высота слоя жесткости), то место, где $u(z)$ стремится к нулю (нуль профиля скорости);

k – постоянная фон Кармана равная 0,4 (определенная экспериментальным путем) [28].

Снежный поток уноса q_{ero} в упрощенном виде описывается в зависимости от скорости трения [14]. Поток осаднения q_{dep} рассчитывается как функция объемной доли f и скорость снегопада w_f . И определяется следующими выражениями:

g – ускорение свободного падения;

d_s – диаметр снежинок;

$w_f = 0,5 \text{ м/с}$ – скорость осаднения частиц снега;

ρ_s – плотность снега, кг/м³;

f – объемная доля снега представляет собой отношение концентрации частиц снега к плотности снега. Профиль концентрации частиц снега задается формулами, предложенными [30, 31]. Концентрация снега задается как постоянная в области сальтации и уменьшается экспоненциально с увеличением высоты к области взвешенного состояния.

После определенного периода времени снегопада Δt , глубина снежного покрова определяется с помощью следующей формулы:

$$h(t) = h_0 + \int_0^{\Delta t} \frac{q_{ero/dep}}{\rho_s} dt \quad (2.6)$$

h_0 – начальный снеговой покров, м;

На каждом временном шаге нестационарной задачи, сетка деформируется в соответствии с полученной новой высотой. На рисунке 4 изображена схема алгоритма расчета распределения снежного покрова.

Для результатов полевых наблюдений за кубом на Площадке № 2 построены карты распределения снега используя метод вычислительной гидродинамики, результаты численного моделирования представлены на рисунках 56–86.

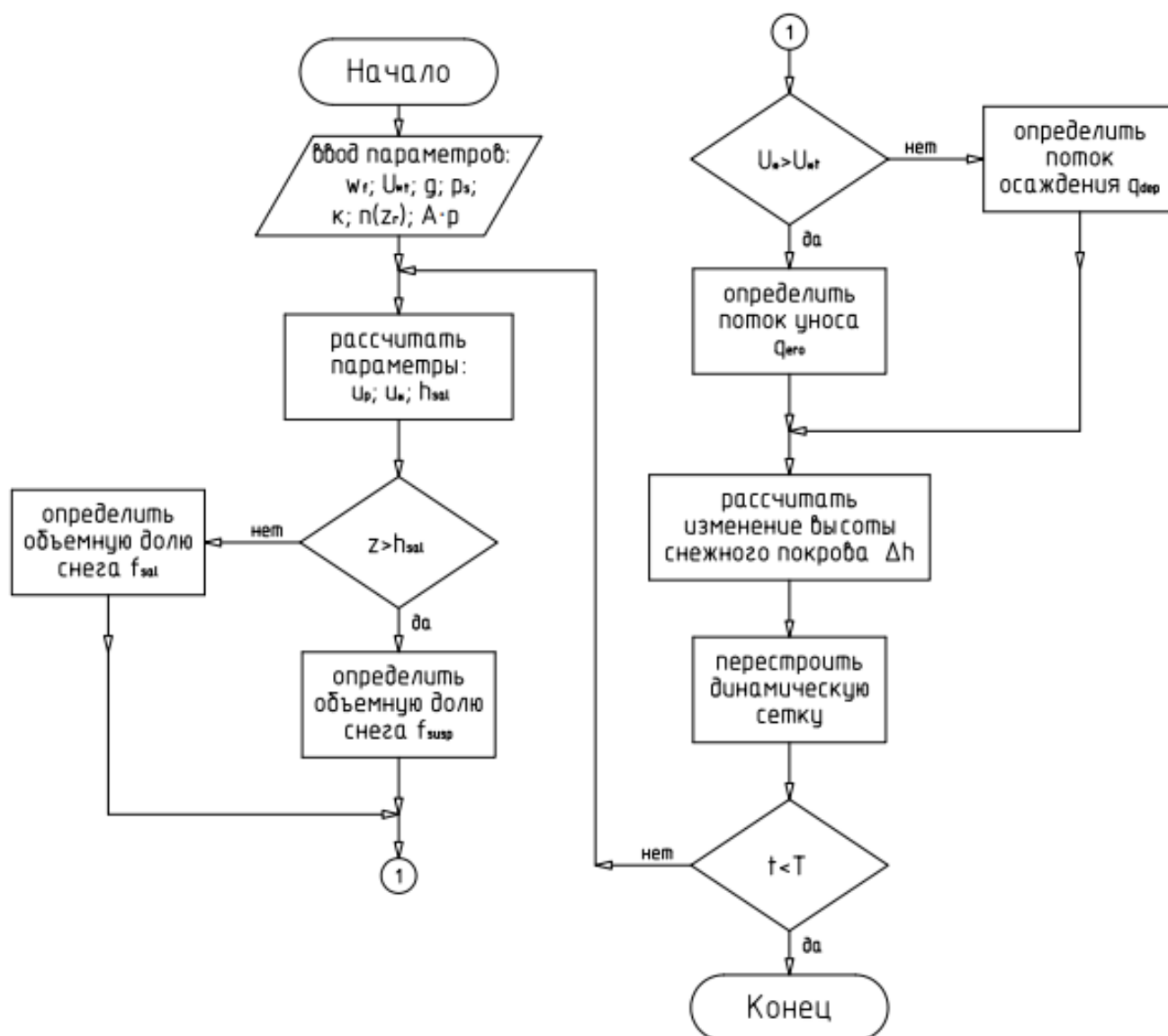
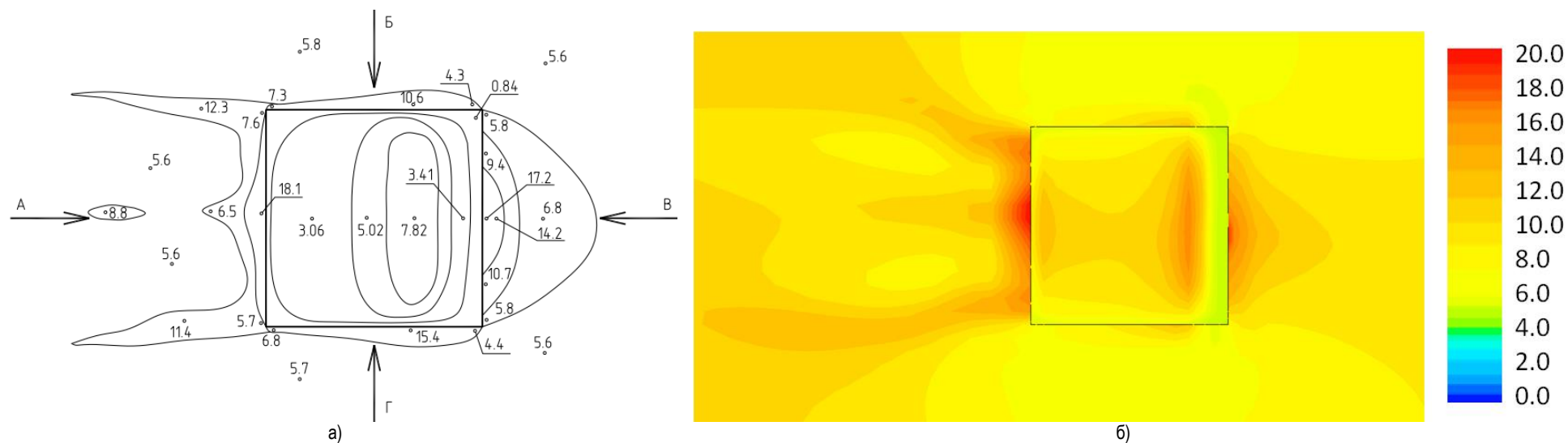
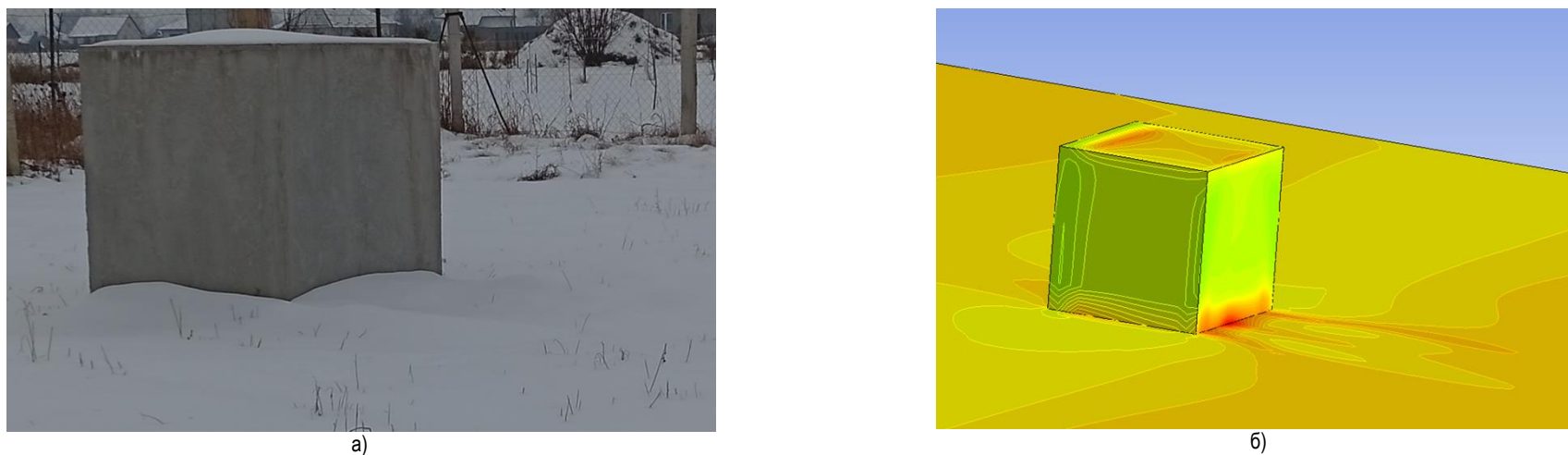


Рисунок 4 – Схема алгоритма расчета распределения снежного покрова



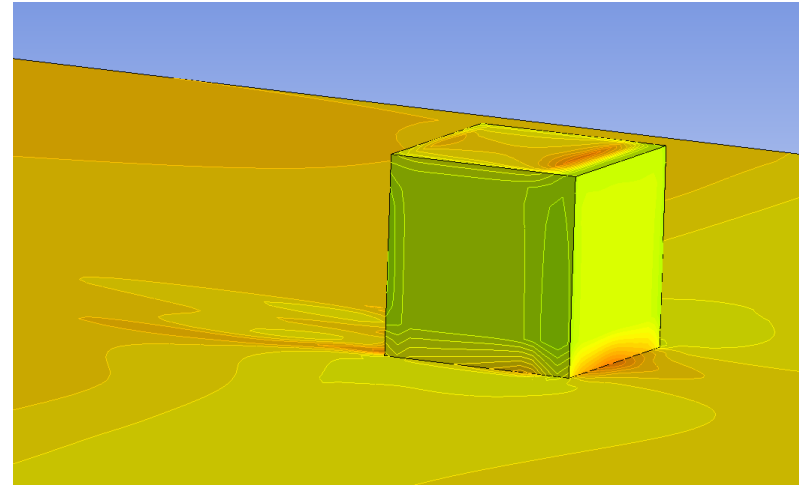
Схемы высоты снежного покрова (см): а) полевые наблюдения, б) результаты моделирования
Рисунок 5 – Площадка № 2. Куб. Направление ветра справа – налево



а) полевые наблюдения (фотография площадки), б) результаты моделирования
Рисунок 6 – Площадка № 2. Куб. Вид Б и вид А в соответствии с рисунком 2



а)



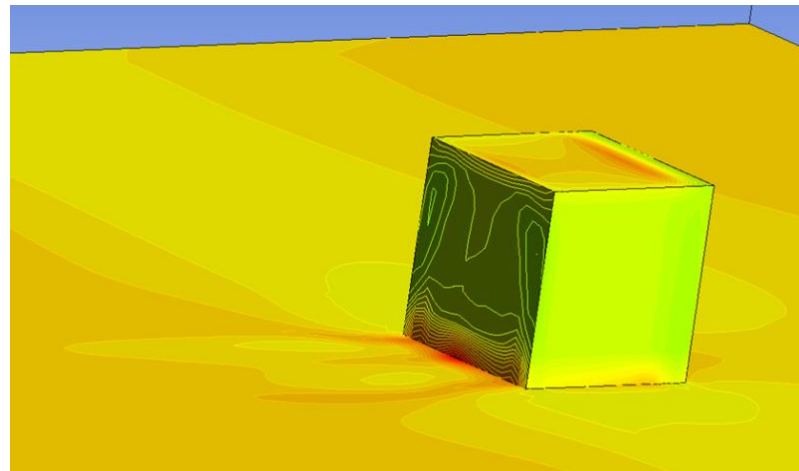
б)

а) полевые наблюдения (фотография площадки), б) результаты моделирования

Рисунок 7 – Площадка № 2. Куб. Вид Г и вид В в соответствии с рисунком 2



а)



б)

а) полевые наблюдения (фотография площадки), б) результаты моделирования

Рисунок 8 – Площадка № 2. Куб. Вид А и вид Г в соответствии с рисунком 2

В результате численного моделирования (рисунки 5–8) видно сходство по закону распределения снега на поверхности куба и на поверхности земли (сформировавшиеся снежные заносы вокруг куба). Однако степень точности занижена, это связано с рядом причин. Форма снежинок: в математической модели указана как гранула диаметром 1,5 мм, а в действительности снежинки почти всегда имеют шестиугольную (гексагональную) форму, что обусловлено структурой молекул воды. Форма снежинки зависит от температуры и влажности при которых она росла. Коэффициент, характеризующий силу сцепления частиц снега, был принят в соответствии с рекомендациями автора математической модели М. Naaim – 7·10⁻⁴ (коэффициент зависит от температуры, влажности и плотности, однако, исследований по этому вопросу не проводилось, и кривые зависимости, по которым можно было бы определить точное значение, также отсутствуют). Не учтена интенсивность сублимации (зависит от скорости ветра, суммарной радиации, температуры воздуха и относительной влажности), но учитывая условия, в которых проводились наблюдения (по данным таблицы 1: высокий процент облачности и влажности, отсутствие/низкая скорость ветра), процессом перехода из твердого состояния в газообразное минуя жидкую фазу, можно пренебречь. В математической модели также не учтено уплотняющее действие, которое оказывает ветер на выпавший снег. Но в целом карты распределения снега между полевыми наблюдениями и математическим моделированием удовлетворительны.

Заключение

Проведен сравнительный анализ результатов полевых наблюдений и численного моделирования распределения снеговых нагрузок на поверхности куба и образования снежных заносов вокруг куба на поверхности земли, на основании которого можно сделать следующие выводы.

При проверке достоверности численного моделирования было выявлено сходство в закономерностях распределения снега. Однако степень точности моделирования оказалась несколько заниженной, что объясняется рядом факторов. Основными причинами являются упрощения в описание формы снежинок, влияние уплотняющего действия ветра, что потенциально может влиять на реальную картину распределения снега. В целом, несмотря на ряд упрощений, карта распределения снега, полученная моделированием, хорошо согласуется с полевыми наблюдениями, что говорит о достаточной надежности и применимости метода для оценки снеговых нагрузок.

Использование методов CFD позволяет значительно расширить понимание механизмов формирования снеговых заносов и распределения снежных отложений.

Моделирование процессов накопления снега в различных временных и пространственных масштабах остается сложной задачей, и существующие модели во многом нуждаются в доработке.

Список цитированных источников

- Олех, А. Г. Особенности определения снеговых нагрузок на строительные конструкции = Features of determining snow loads on building structures / А. Г. Олех // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2025. – № 2 (137). – С. 35–41. – DOI: 10.36773/1818-1112-2025-137-2-35-41.
- Mitsuhashi, H. Snowdrifting in building and wind tunnel experiment using model snow / H. Mitsuhashi // Journal of the Japanese Society of Snow and Ice. – 2003. – Vol. 65. – P. 287–295.
- Shuji, S. Wind Tunnel on effect of roof wind pressure of buildings on shaping roof snow accumulations / S. Shuji, A. B. E. Osamu, J. O. H. Osamu // Journal of Structural and Construction Engineering. – 2009. – Vol. 74. – P. 451–458.
- Oikawa, S. Study of wind tunnel similarity on snowdrift around buildings / S. Oikawa, T. Tomabechi, T. Ishihara // Nagare. – 2007. – Vol. 26. – P. 319–324.
- Kind, R. J. Snow Drifting / R. J. Kind // Handbook of Snow. Principles. Processes / Management and Use ; [ed.] D. M. Gray. – Oxford : Pergamon Press, 1981. – P. 338–359.
- Iversen, J. D. Drifting-snow similitude-transport-r-rate and roughness modeling / J. D. Iversen // Journal of Glaciology. – 1980. – Vol. 94. – P. 393–403.
- Irwin, P. A. Application of Snow Simulation Model Tests to Planning and Design / P. A. Irwin, C. J. Williams // Proceedings of the Eastern Snow Conference, 28, 40th Annual Meeting. – Toronto : Eastern Snow Conference, 1983. – P. 118–130.
- Peterka, J. A. On the relaxation of saltation length as a modeling criteria for particulate transport by wind / J. A. Peterka, R. L. Petersen // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1990. – Vol. 36. – P. 867–876.
- Nara, R. Numerical simulation of snowdrift development in non-equilibrium flow fields around buildings / R. Nara, C. Groth, M. E. Biancolini // Fluids. – 2025. – Vol. 10, iss. 4. – Art. 75. – P. 1–21. – URL: <https://www.mdpi.com/2311-5521/10/4/75> (дата обращения: 08.04.2026).
- A review on the CFD analysis of urban microclimate / Y. Toparlar, B. Blocken, B. Maiheu, G. J. F. van Heijst // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 80. – P. 1613–1640. – DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.248.
- Топографические карты. Беларусь. Бесплатный интерактивный веб-сервис : [сайт]. – Минск, 2026. – URL: <https://ru-ru.topographic-map.com> (дата обращения 25.04.2026).
- Строительная климатология : СНБ 2.04.02-2000, Изменение № 1. – Минск : Минстройархитектуры, 2007. – 33 с.
- 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.
- Naaim, M. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models / M. Naaim, F. Naaim-Bouvet, H. Martinez // Annals of Glaciology. – 1998. – Vol. 26. – P. 191–196.
- Thiis, T. K. Large scale studies of development of snowdrifts around buildings / T. K. Thiis // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2003. – Vol. 91, № 6. – P. 829–839.
- Thiis, T. K. Measurements and Numerical Simulation of Development of Snow Drifts on Curved Roofs / T. K. Thiis, J. F. Ramberg // Snow Engineering VI : Proceedings of the 6th International Conference, Whistler, BC, Canada, 2008. – [S. l.] : ECI, 2008. – P. 1–5.
- Thiis, T. K. 3D numerical simulations and full scale measurements of snow depositions on a curved roof / T. K. Thiis, J. Potac, J. F. Ramberg // EACWE 5 : Proceedings of the 5th European and African Conference on Wind Engineering, Florence, Italy, 19–23 July 2009. – Florence : Firenze University Press, 2009. – P. 1–8.
- Thiis, T. K. Numerical simulation of snow drift development on a gabled roof / T. K. Thiis, J. Potac // Proceedings of the 7th European and African Conference on Wind Engineering, Amsterdam, the Netherlands, 2011. – [S. l.] : s. n., 2011. – P. 1–8.
- Computer simulation of wind speed, wind pressure and snow accumulation around buildings (SNOW-SIM) / B. Bang, A. Nielsen, P. A. Sundsbo, T. Wiik // Energy and Buildings. – 1994. – Vol. 21, № 3. – P. 235–243. – DOI: 10.1016/0378-7788(94)90039-6.
- Bagnold, R. A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes / R. A. Bagnold. – Mineola : Dover Publications, 2005. – 265 p.
- Seligman, G. Snow Structure And Ski Fields / G. Seligman ; transl. by G. Luchansky. – London : Macmillan and Co, 1936. – 555 p.
- Beyers, J. H. M. Numerical modeling of the snowdrift characteristics surrounding the SANAE IV research station, Antarctica : Ph.D. Dissertation / J. H. M. Beyers. – Stellenbosch : University of Stellenbosch, 2004. – 210 p.
- Beyers, J. H. M. Numerical simulation and verification of drifting snow around a cube / J. H. M. Beyers, P. A. Sundsbo, T. M. Harms // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2004. – Vol. 92, № 9. – P. 725–747.
- Beyers, J. H. M. Numerical simulation of snowdrift around an elevated structure / J. H. M. Beyers, T. M. Harms, P. A. Sundsbo // Proceedings of the Fifth International Snow Engineering Conference, Davos, Switzerland, 5–11 July 2004. – [S. l.] : s. n., 2004. – P. 721–731.
- Tominaga, Y. Computational fluid dynamics simulation of snowdrift around buildings: Past achievements and future perspectives / Y. Tominaga // Cold Regions Science and Technology. – 2017. – Vol. 139. – P. 53–71. – DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.05.004.

26. Pomeroy, J. W. Snowcover: Accumulation, Relocation and Management / J. W. Pomeroy, D. M. Gray. – Saskatoon : National Hydrology Research Institute, 1995. – 144 p.
 27. Богданов, А. Н. Отец сверхзвуковой аэродинамики. Памяти Теодора фон Кармана / А. Н. Богданов, И. М. Кондратьев // Вестник Российской академии наук. – 2023. – Т. 93, № 3. – С. 289–296.
 28. Snow Load Shape Coefficients and Snow Prevention Method for Stepped Flat Roofs / Z. Zhang, W. Ma, Q. Li, S. Li // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, iss. 22. – Art. 12109. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/22/12109> (дата обращения: 08.04.2026).
 29. Clifton, A. Snow saltation threshold measurements in a drifting-snow wind tunnel / A. Clifton, J.-D. Ruedi, M. Lehning // Journal of Glaciology. – 2006. – Vol. 52, № 179. – P. 585–596.
 30. Pomeroy, J. W. Saltation of Snow / J. W. Pomeroy, D. M. Gray // Water Resources Research. – 1990. – Vol. 26, № 7. – P. 1583–1594.
 31. Pomeroy, J. W. Steady-state suspension of snow / J. W. Pomeroy // Journal of Hydrology. – 1992. – Vol. 136, № 1/4. – P. 275–301.
- References**
1. Olyoh, A. G. Osobennosti opredeleniya snegovykh nagruzok na stroitel'nye konstrukcii = Features of determining snow loads on building structures / A. G. Olyoh // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2025. – № 2 (137). – S. 35–41. – DOI: 10.36773/1818-1112-2025-137-2-35-41.
 2. Mitsuhashi, H. Snowdrifting in building and wind tunnel experiment using model snow / H. Mitsuhashi // Journal of the Japanese Society of Snow and Ice. – 2003. – Vol. 65. – P. 287–295.
 3. Shuji, S. Wind Tunnel on effect of roof wind pressure of buildings on shaping roof snow accumulations / S. Shuji, A. B. E. Osamu, J. O. H. Osamu // Journal of Structural and Construction Engineering. – 2009. – Vol. 74. – P. 451–458.
 4. Oikawa, S. Study of wind tunnel similarity on snowdrift around buildings / S. Oikawa, T. Tomabechi, T. Ishihara // Nagare. – 2007. – Vol. 26. – P. 319–324.
 5. Kind, R. J. Snow Drifting / R. J. Kind // Handbook of Snow. Principles. Processes / Management and Use ; [ed.] D. M. Gray. – Oxford : Pergamon Press, 1981. – P. 338–359.
 6. Iversen, J. D. Drifting-snow similitude-transport rate and roughness modeling / J. D. Iversen // Journal of Glaciology. – 1980. – Vol. 94. – P. 393–403.
 7. Irwin, P. A. Application of Snow Simulation Model Tests to Planning and Design / P. A. Irwin, C. J. Williams // Proceedings of the Eastern Snow Conference, 28, 40th Annual Meeting. – Toronto : Eastern Snow Conference, 1983. – P. 118–130.
 8. Peterka, J. A. On the relaxation of saltation length as a modeling criteria for particulate transport by wind / J. A. Peterka, R. L. Petersen // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1990. – Vol. 36. – P. 867–876.
 9. Nara, R. Numerical simulation of snowdrift development in non-equilibrium flow fields around buildings / R. Nara, C. Groth, M. E. Biancolini // Fluids. – 2025. – Vol. 10, iss. 4. – Art. 75. – P. 1–21. – URL: <https://www.mdpi.com/2311-5521/10/4/75> (data obrashcheniya: 08.04.2026).
 10. A review on the CFD analysis of urban microclimate / Y. Toparlar, B. Blocken, B. Maiheu, G. J. F. van Heijst // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 80. – P. 1613–1640. – DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.248.
 11. Topograficheskie karty. Belarus'. Besplatnyj interaktivnyj veb-servis : [sajt]. – Minsk, 2026. – URL: <https://ru-ru.topographic-map.com> (data obrashcheniya 25.04.2026).
 12. Stroitel'naya klimatologiya : SNB 2.04.02-2000, Izmenenie № 1. – Minsk : Ministrojarhitektury, 2007. – 33 s.
 13. Tur, V. V. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote po teme «Povedenie issledovaniy izmeneniya klimaticheskikh vozdeystvij 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.
 14. Naaim, M. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models / M. Naaim, F. Naaim-Bouvet, H. Martinez // Annals of Glaciology. – 1998. – Vol. 26. – P. 191–196.
 15. Thiis, T. K. Large scale studies of development of snowdrifts around buildings / T. K. Thiis // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2003. – Vol. 91, № 6. – P. 829–839.
 16. Thiis, T. K. Measurements and Numerical Simulation of Development of Snow Drifts on Curved Roofs / T. K. Thiis, J. F. Ramberg // Snow Engineering VI : Proceedings of the 6th International Conference, Whistler, BC, Canada, 2008. – [S. l.] : ECI, 2008. – P. 1–5.
 17. Thiis, T. K. 3D numerical simulations and full scale measurements of snow depositions on a curved roof / T. K. Thiis, J. Potac, J. F. Ramberg // EACWE 5 : Proceedings of the 5th European and African Conference on Wind Engineering, Florence, Italy, 19–23 July 2009. – Florence : Firenze University Press, 2009. – P. 1–8.
 18. Thiis, T. K. Numerical simulation of snow drift development on a gabled roof / T. K. Thiis, J. Potac // Proceedings of the 7th European and African Conference on Wind Engineering, Amsterdam, the Netherlands, 2011. – [S. l. : s. n.], 2011. – P. 1–8.
 19. Computer simulation of wind speed, wind pressure and snow accumulation around buildings (SNOW-SIM) / B. Bang, A. Nielsen, P. A. Sundsbo, T. Wiik // Energy and Buildings. – 1994. – Vol. 21, № 3. – P. 235–243. – DOI: 10.1016/0378-7788(94)90039-6.
 20. Bagnold, R. A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes / R. A. Bagnold. – Mineola : Dover Publications, 2005. – 265 p.
 21. Seligman, G. Snow Structure And Ski Fields / G. Seligman ; transl. by G. Luchansky. – London : Macmillan and Co, 1936. – 555 p.
 22. Beyers, J. H. M. Numerical modeling of the snowdrift characteristics surrounding the SANAE IV research station, Antarctica : Ph.D. Dissertation / J. H. M. Beyers. – Stellenbosch : University of Stellenbosch, 2004. – 210 p.
 23. Beyers, J. H. M. Numerical simulation and verification of drifting snow around a cube / J. H. M. Beyers, P. A. Sundsbo, T. M. Harms // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2004. – Vol. 92, № 9. – P. 725–747.
 24. Beyers, J. H. M. Numerical simulation of snowdrift around an elevated structure / J. H. M. Beyers, T. M. Harms, P. A. Sundsbo // Proceedings of the Fifth International Snow Engineering Conference, Davos, Switzerland, 5–11 July 2004. – [S. l. : s. n.], 2004. – P. 721–731.
 25. Tominaga, Y. Computational fluid dynamics simulation of snowdrift around buildings: Past achievements and future perspectives / Y. Tominaga // Cold Regions Science and Technology. – 2017. – Vol. 139. – P. 53–71. – DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.05.004.
 26. Pomeroy, J. W. Snowcover: Accumulation, Relocation and Management / J. W. Pomeroy, D. M. Gray. – Saskatoon : National Hydrology Research Institute, 1995. – 144 p.
 27. Bogdanov, A. N. Otec sverhzhukovoj aerodinamiki. Pamyati Teodora fon Karmana / A. N. Bogdanov, I. M. Kondrat'ev // Vestnik Rossijskoj akademii nauk. – 2023. – Т. 93, № 3. – С. 289–296.
 28. Snow Load Shape Coefficients and Snow Prevention Method for Stepped Flat Roofs / Z. Zhang, W. Ma, Q. Li, S. Li // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, iss. 22. – Art. 12109. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/22/12109> (data obrashcheniya: 08.04.2026).
 29. Clifton, A. Snow saltation threshold measurements in a drifting-snow wind tunnel / A. Clifton, J.-D. Ruedi, M. Lehning // Journal of Glaciology. – 2006. – Vol. 52, № 179. – P. 585–596.
 30. Pomeroy, J. W. Saltation of Snow / J. W. Pomeroy, D. M. Gray // Water Resources Research. – 1990. – Vol. 26, № 7. – P. 1583–1594.
 31. Pomeroy, J. W. Steady-state suspension of snow / J. W. Pomeroy // Journal of Hydrology. – 1992. – Vol. 136, № 1/4. – P. 275–301.

Материал поступил 24.04.2026, одобрен 27.06.2026, принят к публикации 29.06.2026

УДК 697.13+697.92

ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В СОВРЕМЕННОМ МНОГОКВАРТИРНОМ ЖИЛОМ ДОМЕ С ТЁПЛЫМ ЧЕРДАКОМ

Ю. В. Потапович

Старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь, e-mail: yulya.kapereyko@mail.ru

Реферат

В статье представлены результаты экспериментального исследования вентиляционных тепловых потерь в многоквартирном жилом доме с теплым чердаком. Актуальность работы обусловлена приоритетами Государственной программы «Устойчивая энергетика и энергоэффективность» на 2026–2030 годы в Республике Беларусь, где одним из ключевых направлений остаётся повышение энергоэффективности жилищно-коммунального хозяйства. Многоквартирные дома периода массовой индустриальной застройки характеризуются повышенными теплопотерями, в том числе через систему естественной вентиляции, доля которых в общем расходе тепловой энергии на отопление может быть существенной. Особое внимание уделяется зданиям с тёплым чердаком, позволяющим объединять вытяжные каналы и снижать потери через кровлю, однако проектные расчёты часто опираются на нормативные значения кратности воздухообмена и расчетные температуры, что не всегда отражает реальные условия эксплуатации, особенно в переходные периоды отопительного сезона. Цель исследования – получение объективных экспериментальных данных о величине вентиляционных теплопотерь и оценка их доли в общем энергобалансе здания. В работе проведены натурные измерения на реальном 9-этажном кирпичном жилом доме в г. Бресте (отапливаемая площадь 2762,1 м²) с естественной вентиляцией, где индивидуальные вытяжные каналы из квартир объединяются в сборные шахты, выходящие в объём тёплого чердака. Исследование охватывало период с 10 по 20 марта 2026 года (11 суток переходного периода). Измерялись температура уходящего воздуха в вентиляционных шахтах и общей вытяжной шахте тёплого чердака с помощью логгеров Thermochron iButton, расход тепловой энергии по коммерческому теплосчётчику, температура наружного воздуха. Выполнены расчёты нормативного воздухообмена по квартирам, определение бытовых тепловыделений на основе потребления горячей воды и оценка удельных показателей энергопотребления с использованием нормативных методик и формул теплового баланса.

Установлено, что средняя температура удаляемого воздуха из сборных шахт составляет около 23,2 °С, что значительно выше проектной – 18 °С. Экспериментально подтверждена значительная доля вентиляционных теплопотерь в энергобалансе здания. Показано существенное превышение фактического удельного потребления тепловой энергии на отопление и вентиляцию по сравнению с проектными значениями. Выявлены особенности работы системы с тёплым чердаком, включая эпизодическое опрокидывание тяги. Работа подчёркивает перспективность совершенствования систем вентиляции, в том числе с применением рекуперации теплоты уходящего воздуха, для повышения энергоэффективности жилищного фонда.

Ключевые слова: тёплый чердак, естественная система вентиляции, современное строительство, тепловые потери.

EVALUATION OF THERMAL LOSSES IN A CONTEMPORARY MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDING WITH A WARM ATTIC

Y. V. Potapovich

Abstract

The article presents the results of an experimental study of ventilation heat losses in a multi-apartment residential building with a warm attic. The relevance of the work is determined by the priorities of the State Program “Sustainable Energy and Energy Efficiency” for 2026–2030 in the Republic of Belarus, where one of the key areas remains the improvement of energy efficiency in the housing and utilities sector. Multi-apartment buildings from the period of mass industrial construction are characterized by increased heat losses, including through the natural ventilation system, the share of which in the total heat energy consumption for heating can be significant. Particular attention is paid to buildings with a warm attic, which allows combining exhaust ducts and reducing heat losses through the roof. However, design calculations often rely on normative values of air exchange rate and design temperatures, which do not always reflect real operating conditions, especially during transitional periods of the heating season.

The purpose of the study is to obtain objective experimental data on the magnitude of ventilation heat losses and to assess their share in the overall energy balance of the building. The work involved full-scale measurements on a real 9-storey brick residential building in Brest (heated area 2762,1 m²) with natural ventilation, where individual exhaust ducts from apartments are combined into common shafts leading into the volume of the warm attic. The study covered the period from March 10 to March 20, 2026 (11 days of the transitional period). The temperature of the exhaust air in the ventilation shafts and the common exhaust shaft of the warm attic was measured using Thermochron iButton loggers, along with heat energy consumption according to the commercial heat meter and outdoor air temperature. Calculations of the normative air exchange for apartments were performed, domestic heat gains were determined based on hot water consumption, and specific energy consumption indicators were assessed using normative methods and thermal balance formulas.

It was established that the average temperature of the exhaust air from the common shafts is about 23,2 °C, which is significantly higher than the design value of 18 °C. A significant share of ventilation heat losses in the building's energy balance has been experimentally confirmed. A substantial excess of the actual specific heat energy consumption for heating and ventilation compared to the design values has been shown. Features of the warm attic system operation were identified, including occasional stack effect reversal. The work emphasizes the prospects of improving ventilation systems, including the use of heat recovery from exhaust air, to increase the energy efficiency of the housing stock.

Keywords: warm attic, natural ventilation system, modern construction, heat losses.

Введение

В условиях реализации Государственной программы «Устойчивая энергетика и энергоэффективность» на 2026–2030 годы в Республике Беларусь одним из ключевых приоритетов остаётся повышение энергоэффективности жилищно-коммунального хозяйства.

Жилищный фонд, значительную часть которого составляют многоквартирные дома, построенные в период массовой индустриальной застройки, характеризуется относительно высоким уровнем удельного энергопотребления на отопление и вентиляцию. Согласно экспертным оценкам, теплопотери через систему естественной

вентиляции в таких зданиях могут составлять от 20 до 40 % от общего расхода тепловой энергии на нужды отопления [1], что делает данное направление одним из наиболее перспективных для реализации энергосберегающих мероприятий.

Современное строительство предполагает применение наиболее энергетически и экономически обоснованных систем и конструкций, позволяющих эффективно использовать тепловые ресурсы.

Особое место в жилых домах повышенной этажности занимают системы с тёплым чердаком. Данное конструктивное решение позволяет объединить вытяжные вентиляционные каналы из квартир в сборную шахту и снизить теплопотери через кровлю.

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью получения объективных экспериментальных данных о величине вентиляционных теплопотерь в современных жилых зданиях. Большинство существующих расчётов основано на нормативных значениях кратности воздухообмена и усреднённых температурах, что часто не отражает реальной картины, особенно в переходные периоды отопительного сезона.

Методологическая основа исследования

Методологическая основа исследования состояла из сбора данных и комплексного анализа полученных результатов. Исследование проводилось посредством измерений и расчетов на реальном здании. Объектом исследования является многоквартирный жилой дом с тёплым чердаком, расположенный в г. Бресте Республики Беларусь.

Измерение тепловых потерь многоквартирного жилого здания

Исследуемое здание – кирпичное, 9 этажей. Общая отапливаемая площадь здания составляет 2762,1 м². Система вентиляции дома – естественная, с индивидуальными вытяжными каналами из кухонь, санузлов и ванных комнат квартир, которые объединяются в сборные вентиляционные шахты. На чердаке каналы выходят в общий объём тёплого чердака, откуда воздух удаляется через две общие вытяжные шахты. Тёплый чердак выполнен с утеплением перекрытия и кровли, что позволяет поддерживать повышенную температуру воздуха в его объёме и усиливать гравитационное давление. Теплоснабжение здания осуществляется централизованно.

Учёт тепловой энергии на нужды отопления и горячего водоснабжения производится коммерческим теплосчётчиком ТЭМ-104М.

Исследование носит экспериментальный характер и основано на анализе натурных измерений параметров за период с 10 по 20 марта 2026 года (11 суток, переходный период отопительного сезона). Измеряемые параметры:

- температура уходящего воздуха в сборных вентиляционных шахтах;
- температура воздуха в общей вытяжной шахте тёплого чердака;
- расход и количество потреблённой тепловой энергии на отопление и ГВС по показаниям теплосчётчика;
- температура наружного воздуха.

Все температурные измерения выполнялись с часовым интервалом. Для измерения температуры воздуха использовались логгеры температуры Thermochron iButton DS1921G-F5, предел допускаемой абсолютной погрешности измерений температуры ± 1 °C в диапазоне от -10 °C до $+40$ °C. Измерения температуры удаляемого воздуха выполнялись установкой логгера в устье шахты на глубину не менее 0,5 м.

Согласно проведенным измерениям, средняя температура удаляемого воздуха из сборных вытяжных шахт составляет 23,2 °C, что значительно выше проектной – 18 °C; из общих вытяжных шахт тёплого чердака – 22,6 °C. Разница данных температур образована преимущественно тепловыми потерями через чердачное покрытие и стены, а также наличием вывода на тёплый чердак индивидуальных вентиляционных каналов верхних этажей, средняя температура вытяжного воздуха которых составляет 24,5 °C. Следует учесть, что по данным, приведенным в [9], температура воздуха внутри здания меньше температуры воздуха на выходах вентиляционных шахт на 1–2 °C. С учетом указанной особенности были рассчитаны значения средней температуры воздуха в зданиях, равной 22,2 °C.

На рисунке 1 приведен график изменения температуры уходящего воздуха из сборных вентиляционных шахт, выходящих на тёплый чердак (ВШ1-ВШ11), а также изменения температуры удаляемого воздуха из двух общих вытяжных шахт тёплого чердака (Ш1-Ш2).

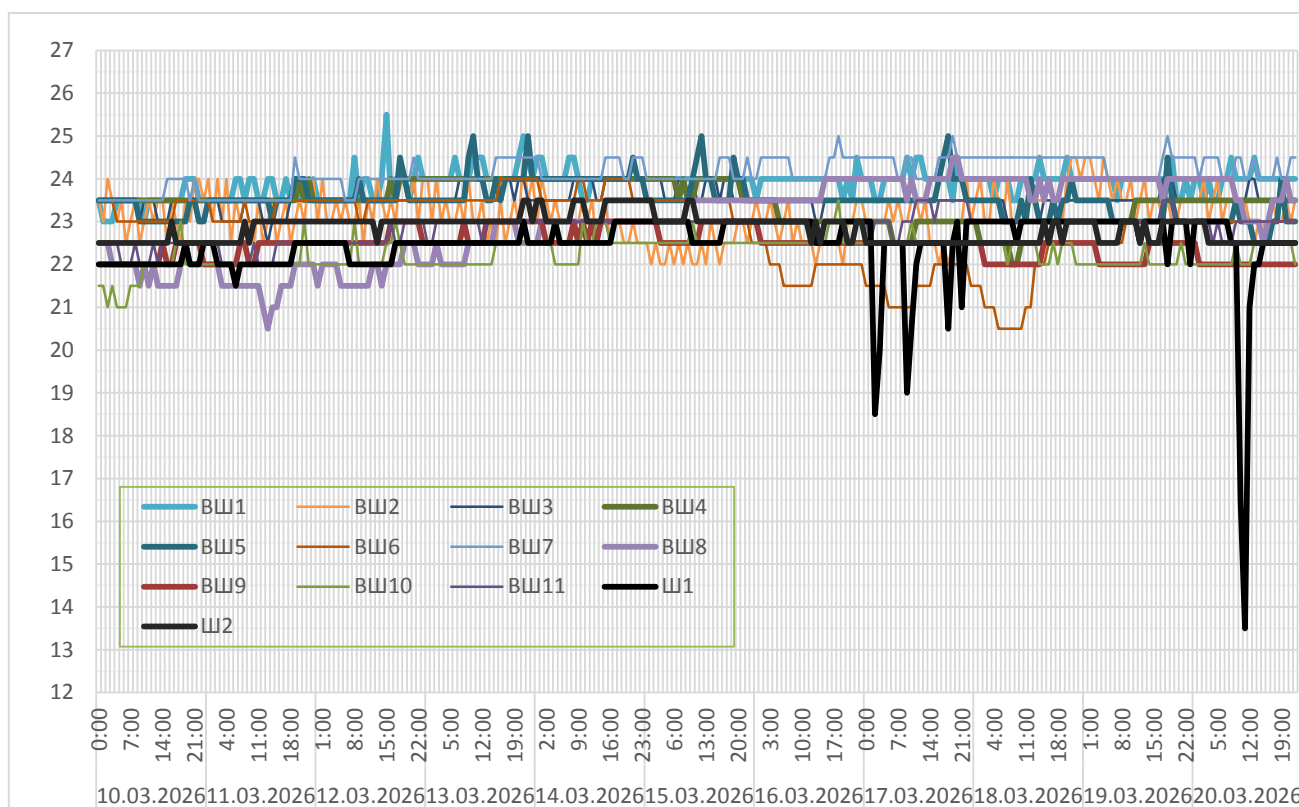


Рисунок 1 – График изменения температуры уходящего воздуха из сборных вентиляционных шахт, выходящих на тёплый чердак (ВШ1-ВШ11), а также изменения температуры удаляемого воздуха из двух общих вытяжных шахт тёплого чердака (Ш1-Ш2)

На графике отчетливо виден момент резкого понижения температуры удаляемого воздуха из двух общих вытяжных шахт теплого чердака, что, вероятно, является «опрокидыванием тяги», характерным явлением для зданий с теплым чердаком. Однако, поскольку данное явление обнаружилось единожды на протяжении довольно продолжительного периода, это не является значительным недостатком системы естественной вентиляции.

Согласно нормативной документации [2] минимальный воздухообмен, необходимый для обеспечения допустимых санитарно-

технических условий в помещениях жилых зданий с газовой 4-х конфорочной плитой, должен быть не менее большей из соответствующих цифр:

- суммарному удалению воздуха из кухни (90 м³/ч) и санузлов (50 м³/ч);
- или 3 м³/ч/м² жилой площади квартиры.

Поскольку на каждом этаже жилого здания расположены одна трехкомнатная, две двухкомнатные квартиры и две однокомнатные, то расчет воздухообмена для них определен согласно таблице 1.

Таблица 1 – Расчет воздухообмена квартир жилого здания

Номер квартиры	Площадь жилых комнат, м²	Нормативный воздухообмен по площади жилых комнат, м³/ч	Нормативный воздухообмен по кухням и с/у, м³/ч
1	12,1+47,5+11,7= 71,3	213,9	140
2	11,9+40,3= 52,2	156,6	140
3	19,8+15,4= 35,2	105,6	140
4	30	90	140
5	28,5	85,5	140

Следовательно, нормативный уровень воздухообмена в трехкомнатной квартире должен быть не менее 213,9 м³/ч, в двухкомнатной – не менее 156,6 м³/ч, в двухкомнатной – не менее 140 м³/ч, в однокомнатной – не менее 140 м³/ч. Суммарно по этажу – 790,5 м³/ч.

Таким образом, можем вычислить усредненный показатель тепловых потерь на вентиляцию [3, п. 1.3.2]. Средние температуры наружного и внутреннего воздуха принимаются согласно результатам измерений. Проведя расчеты, согласно формуле 1.6 [3, п. 1.3.2], суммарный расход теплоты на нагрев инфильтрующегося воздуха для всего здания $Q_{инф}$ составляет 8612 кВтч, или **7,406 Гкал** за 11 дней срока проведения исследования.

Согласно данным по потреблению тепловой энергии, на нагрев горячей воды для ГВС в период с 10 по 20 марта 2026 года фактически было затрачено $Q_{ГВС}^0 = 0,405$ Гкал. Всего потребленная тепловая энергия за данный период составила $Q^0 = 10,625$ Гкал. Следовательно, на отопление жилого здания было затрачено $Q_{от}^0 = 10,22$ Гкал за 11 дней срока проведения исследования.

Поскольку в тепловом балансе здания учитываются не только тепловые потери, но и теплопритоки, для определения общих теплотерь здания необходимо вычислить бытовые теплопритоки.

Возможность определения значений бытовых теплопритоков следует из результатов исследований, приведенных в [1, 5, 6]. Исследования показали, что бытовые тепловыделения в жилых зданиях связаны, прежде всего, с деятельностью человека и их мощность можно рассчитать исходя из значения: $q_{быт}^{чел} = 0,147$ кВт/чел.

Тогда энергию бытовых тепловыделений в конкретном периоде можно рассчитать по формуле

$$Q_{быт}^{чел} = q_{быт}^{чел} \cdot n \cdot N \cdot 24, \quad (1.1)$$

где $q_{быт}^{чел}$ – мощность бытовых тепловыделений, приходящаяся на одного человека, кВт/чел;

N – количество дней конкретного периода;

n – количество людей в здании.

Количество людей, проживающих в здании, можно определить по потреблению горячей воды по формуле

$$n = \frac{V_{ГВС}}{0,07}, \quad (1.2)$$

где $V_{ГВС}$, [1] – средний объем горячей воды, потребляемой в здании за сутки, м³/сут, из расчета 70 л/(чел·сут).

Согласно измерениям водомерного узла, объем горячей воды за период составил 13,117 т, или 1,21 м³/сут. Таким образом, количество жителей в жилом здании составляет 17 человек, что ориентировочно соответствует фактической заселенности здания.

Из вышеперечисленного следует, что энергия бытовых тепловыделений $Q_{быт}^{чел}$ составила 679 кВт или **0,584 Гкал** за период измерений.

Суммарное количество энергии, затраченное на отопление и вентиляцию, составляет: $10,22+0,584 = 10,804$ Гкал.

Удельное потребление тепловой энергии на отопление и вентиляцию определяют по формуле [1, 5, 6]

$$q_{уд} = \frac{Q}{A}, \quad (1.3)$$

где A – отапливаемая площадь здания,

Удельное потребление тепловой энергии на отопление и вентиляцию составляет

$$10,804/2762,1 = 0,003912 \text{ Гкал/м}^2 \text{ или } 4,55 \text{ кВт}^{\circ}\text{ч/м}^2$$

Согласно проектным значениям, в отопительный период многоквартирный жилой дом потребляет 312,33 Гкал, из которых на отопление приходится 113,58 Гкал, а на ГВС 198,75 Гкал при температуре наружного воздуха –21 (что соответствует расчетной температуре г. Бреста).

По всем полученным в измеряемый период данным можно определить удельное потребление тепловой энергии для расчетных условий по формуле [1, 5, 6]

$$q_0 = \frac{Q_{проект} \cdot D_d}{A \cdot D_e} \quad (1.4)$$

где $D_d = (t_{int} - t_{ht}) \cdot Z_{ht}$, – градусосутки отопительного периода D_d для расчетных условий К-сут,

где t_{int} – расчетная температура внутреннего воздуха, °C;

t_{ht} , Z_{ht} – средняя температура наружного воздуха за период, °C, и продолжительность периода, сут;

D_e – градусосутки периода для конкретного отопительного сезона К-сут (принимаем для г. Бреста).

Используя коэффициенты для пересчета на среднюю температуру наружного воздуха периода проведения исследования, которая составила 8,7 °C, было получено значение удельного проектного теплопотребления многоквартирного жилого здания для текущих условий эксплуатации – **0,000837 Гкал/м²** или 0,973 кВтч/м².

$$q_0 = \frac{113,58 \cdot (22,2 - 8,7) \cdot 11}{2762,1 \cdot (18 + 21) \cdot 187} = 0,000837 \text{ Гкал/м}^2$$

Результаты

Удельное потребление тепловой энергии на отопление и вентиляцию за период измерений составило 0,003912 Гкал/м², при этом значение удельного проектного теплопотребления здания составило 0,000837 Гкал/м². В здании наблюдается значительное превышение проектных характеристик по потреблению тепловой энергии практически в четыре раза.

Доля вентиляционных тепловых потерь в многоэтажном жилом здании при обеспечении нормативного воздухообмена составляет **7,406 Гкал** из **10,22 Гкал**, затрачиваемых на отопление и вентиляцию здания. Это более 70 % тепловой энергии в общем энергобалансе многоэтажного жилого дома.

Таким образом, экспериментально подтверждена значительная доля вентиляционных теплопотерь в общем энергобалансе здания с тёплым чердаком, что подтверждает актуальность дальнейшего совершенствования систем вентиляции многоэтажных жилых зданий, а также использования тепловой энергии уходящего воздуха для обеспечения нужд здания.

В современных энергоэффективных домах используются различные способы экономии тепловой энергии. К ним относятся: солнечные коллекторы, тепловые насосы, системы возврата тепловой энергии сточных вод, системы вентиляции с рекуперацией тепловой энергии уходящего воздуха.

В зданиях РБ наиболее удобным для создания комфортного микроклимата в помещениях жилых зданий является использование поквартирных систем приточно-вытяжной вентиляции с использованием рекуператоров тепловой энергии [10–12]. Это является стандартным решением для энергоэффективных зданий.

Системы приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией позволяют возвращать 70–85 % тепловой энергии вытяжного воздуха. Солнечная энергетика так же является высокопотенциальным источником энергии, несмотря на невысокое количество солнечных дней в РБ [13–16]. Наша страна обладает достаточным теоретическим потенциалом солнечной энергии, в 741 раз превышающим текущее энергопотребление. Было рассчитано, что в белорусских населенных пунктах доступно примерно 260 млн м² кровли, на которых можно разместить от 13 до 18 ГВт мощностей. Средний коэффициент использования установленной мощности таких электростанций не превысит 11 %.

Наиболее значимыми для Республики Беларусь объектами жилищного строительства с применением в системах обеспечения солнечной энергии являются экспериментальные многоквартирные здания в г. Могилеве и Гродно [17–20].

Так же перспективным направлением развития в области энергосбережения является использование теплоты сточных вод. Потенциал энергосбережения сточных вод в Республике Беларусь составляет 6,2 млрд кВтч в год [21–22]. Это сопоставимо с годовым потреблением тепловой энергии значительной части жилищного фонда страны и показывает существенный потенциал энергосбережения за счёт рекуперации низкопотенциального тепла сточных вод.

Заключение

В ходе экспериментального исследования многоквартирного жилого дома с тёплым чердаком экспериментально подтверждена значительная доля вентиляционных теплопотерь в общем энергобалансе здания. Удельное потребление тепловой энергии на отопление и вентиляцию за период измерений (11 суток) составило 0,003912 Гкал/м² (4,55 кВт·ч/м²), что практически в четыре раза превышает значение удельного проектного теплопотребления для текущих условий эксплуатации (0,000837 Гкал/м² или 0,973 кВт·ч/м²). Суммарный расход теплоты на нагрев инфильтрующегося воздуха достиг 7,406 Гкал, что составляет более 70 % от тепловой энергии, затраченной на отопление и вентиляцию (10,22 Гкал).

Определено, что средняя температура удаляемого воздуха из сборных вентиляционных шахт равна 23,2 °С, что значительно выше проектной – 18 °С; из общих вытяжных шахт тёплого чердака – 22,6 °С. Расчёт нормативного воздухообмена по квартирам и учёт бытовых тепловыделений (0,584 Гкал за период) позволили сформировать полный тепловой баланс. Выявлено эпизодическое опрокидывание тяги в системе, однако оно не является систематическим недостатком.

Таким образом, результаты подтверждают высокую актуальность дальнейшего совершенствования систем естественной вентиляции в многоэтажных жилых зданиях и внедрения энергоэффективных решений, таких как поквартирные приточно-вытяжные системы с рекуператорами (возврат 70–85 % теплоты), солнечные коллекторы, тепловые насосы и рекуперация тепла сточных вод. Полученные данные могут служить основой для оптимизации проектных решений и повышения энергоэффективности жилищного фонда Республики Беларусь в рамках государственной программы.

Список цитированных источников

1. Данилевский, Л. Н. Принципы проектирования и инженерное оборудование энергоэффективных жилых зданий / Л. Н. Данилевский // Бизнесосфсет. – Минск, 2011. – 375 с.
2. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : строительные нормы Республики Беларусь : СН 4.02.03-2019. – Введ. 16.12.2019. – Минск, 2025. – 52 с.
3. Хрусталёв, Б. М. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование : учеб. пособие / Б. М. Хрусталёв, Ю. Я. Кувшинов, В. М. Копко ; под общ. ред. Б. М. Хрусталёва. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : АСВ, 2008. – 784 с.
4. Тепловая защита жилых и общественных зданий. Энергетические показатели : СП 2.04.02-2020. – Введ. 01.02.2021. – Минск, 2020. – 33 с.
5. Данилевский, Л. Н. Фактические энергетические характеристики жилых зданий / Л. Н. Данилевский, А. Н. Жило, Б. Ф. Москалик // Строительная наука и техника. – 2008. – № 5. – С. 22–29.
6. Данилевский, Л. Н. Экспериментальное определение составляющих теплового баланса жилых зданий / Л. Н. Данилевский // Архитектура и строительство. – 2008. – № 8. – С. 90–95.
7. Метод определения удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию эксплуатируемых жилых зданий : СТБ 2409-2015. – Введ. 01.01.2016. – Минск : Госстандарт, 2015. – 28 с.
8. Строительная климатология : Изменение № 1 СНБ 2.04.02-2000. – Введ. 01.07.2007. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2007. – 35 с.
9. Ливчак, В. И. Фактическое теплопотребление зданий как показатель качества и надежности проектирования / В. И. Ливчак // АВОК. – 2009. – № 2. – С. 4–10.
10. Energy efficient residential buildings in Belarus : analysis and recommendation / M. Grätz, H. Fammler, M. Krekeler [et al.]. – Hamburg : Baltic Environmental Forum, 2016. – 140 p. – URL: https://www.bef-de.org/wp-content/uploads/2019/06/2016-02_ENERGY_EnergyEfficientResidentialBuildings.pdf (date of access: 15.07.2026).
11. Наумовец, А. Повышение энергоэффективности жилых зданий. Применение солнечных батарей в системах энергоснабжения жилых зданий в Республике Беларусь и за рубежом : отчет / А. Наумовец. – URL: <https://energoeffekt.gov.by/effbuild/download/237.pdf> (дата обращения: 15.07.2026).
12. О возобновляемых источниках энергии : Закон Респ. Беларусь от 27 дек. 2010 г. № 204-3 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2011. – № 5. – 2/1756. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=H11000204> (дата обращения: 15.07.2026).
13. Climate resource potential to develop solar power in Belarus / A. Meshyk, M. Barushka, V. Marozava [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 212. – Art. 01012. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021201012.
14. Global Solar Atlas. Solar resource and PV power potential maps and GIS data : Belarus. – Solargis for The World Bank, 2023. – URL: <https://globalsolaratlas.info/download/belarus> (date of access: 15.07.2026).
15. Энергия будущего. Крупнейшая солнечная электростанция Беларуси построена в Чериковском районе // Чериковские новости. – 2022. – URL: <https://www.cherikovnews.by/jenergija-budushhego-krupnejshaja-solnechnaja-jelektrostantsija-belarusi-postroena-v-cherikovskom-rajone.html> (дата обращения: 15.07.2026).
16. В Мядельском районе запустили солнечную электростанцию мощностью 5,7 МВт // ЭнергоБеларусь. – 2016. – URL: https://energobelarus.by/news/Tema_dnya/solnechnaya_elektrostant_siya (дата обращения: 15.07.2026).
17. Мировой рекорд в солнечной энергетике: что известно о новой панели // TCH. – 2025. – URL: https://tsn.ua/ru/nauka_it/novyy-mirovoy-rekord-v-solnechnoy-energetike-cto-izvestno-o-novoy-paneli-2923583.html (дата обращения: 04.06.2026).
18. Bemann, U. Kann die Sonne den Weltenergiebedarf decken? / U. Bemann. – 2021. – URL: <https://www.solarenergie.de/hintergrundwissen/solarenergie-nutzen/weltenergiebedarf> (date of access: 04.06.2026).

19. New report: EU hits 2025 solar target but market contraction puts 2030 goal at risk : Press release / SolarPower Europe. – 2025. – URL: <https://www.solarpowereurope.org/press-releases/new-report-eu-hits-2025-solar-target-but-market-contraction-puts-2030-goal-at-risk> (date of access: 30.06.2026).
20. Выработка электроэнергии в странах ЕС фотоэлектрическими станциями: обзор. – URL: <https://www.google.com/search?q=выработка+электроэнергии+в+странах+ЕС+фотоэлектрическими+станциями> (дата обращения: 15.07.2026).
21. Охрана и использование водных ресурсов // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – URL: <https://www.minpriroda.gov.by/ru/vodnres-ru/> (дата обращения: 15.07.2026).
22. Интерактивная информационно-аналитическая система распространения официальной статистической информации // Белстат. – URL: <https://dataportal.belstat.gov.by/osids/indicator-info/10301000009> (дата обращения: 15.07.2026).
11. Naumovec, A. Povyshenie energoeffektivnosti zhilyh zdaniy. Primenenie solnechnykh baterij v sistemah energosnabzheniya zhilyh zdaniy v Respublike Belarus' i za rubezhom : otchet / A. Naumovec. – URL: <https://energoeffect.gov.by/effbuild/download/237.pdf> (data obrashcheniya: 15.07.2026).
12. O vozobnovlyаемых istochnikah energii : Zakon Resp. Belarus' ot 27 dek. 2010 g. № 204-Z // Nac. reestr pravovyh aktov Resp. Belarus'. – 2011. – № 5. – 2/1756. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=H11000204> (data obrashcheniya: 15.07.2026).
13. Climate resource potential to develop solar power in Belarus / A. Meshyk, M. Barushka, V. Marozava [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 212. – Art. 01012. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021201012.
14. Global Solar Atlas. Solar resource and PV power potential maps and GIS data : Belarus. – Solargis for The World Bank, 2023. – URL: <https://globalsolaratlas.info/download/belarus> (date of access: 15.07.2026).
15. Energiya budushchego. Krupnejshaya solnechnaya elektrostanciya Belarusi postroena v Cherkovskom rajone // Cherkovskie novosti. – 2022. – URL: <https://www.cherkovnews.by/jenergiya-budushhego-krupnejshaya-solnechnaya-jelektrostanciya-belarusi-postroena-v-cherkovskom-rajone.html> (data obrashcheniya: 15.07.2026).
16. V Myadel'skom rajone zapustili solnechnuyu elektrostanciyu moshchnost'yu 5,7 MVt // EnergoBelarus'. – 2016. – URL: https://energobelarus.by/news/Tema_dnya/solnechnaya_elektrostant_siya (data obrashcheniya: 15.07.2026).
17. Mirovoj rekord v solnechnoj energetike: chto izvestno o novoy paneli // TSN. – 2025. – URL: https://tsn.ua/ru/nauka_it/novyy-mirovoy-rekord-v-solnechnoj-energetike-chto-izvestno-o-novoy-paneli-2923583.html (data obrashcheniya: 04.06.2026).
18. Bemann, U. Kann die Sonne den Weltenergiebedarf decken? / U. Bemann. – 2021. – URL: <https://www.solarenergie.de/hintergrundwissen/solarenergie-nutzen/weltenergiebedarf> (date of access: 04.06.2026).
19. New report: EU hits 2025 solar target but market contraction puts 2030 goal at risk : Press release / SolarPower Europe. – 2025. – URL: <https://www.solarpowereurope.org/press-releases/new-report-eu-hits-2025-solar-target-but-market-contraction-puts-2030-goal-at-risk> (date of access: 30.06.2026).
20. Vyrabotka elektroenergii v stranah ES fotoelektricheskimi stanciyami: obzor. – URL: <https://www.google.com/search?q=vyrabotka+elektroenergii+v+stranah+ES+fotoelektricheskimi+stanciyami> (data obrashcheniya: 15.07.2026).
21. Ohrana i ispol'zovanie vodnyh resursov // Ministerstvo prirodnih resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus'. – URL: <https://www.minpriroda.gov.by/ru/vodnres-ru/> (data obrashcheniya: 15.07.2026).
22. Interaktivnaya informacionno-analiticheskaya sistema rasprostraneniya oficial'noj statisticheskoy informacii // Belstat. – URL: <https://dataportal.belstat.gov.by/osids/indicator-info/10301000009> (data obrashcheniya: 15.07.2026).

References

1. Danilevskij, L. N. Principy proektirovaniya i inzhenernoe oborudovanie energoeffektivnyh zhilyh zdaniy / L. N. Danilevskij // Biznesofset. – Minsk, 2011. – 375 s.
2. Otoplenie, ventilyaciya i kondicionirovanie vozduha : stroitel'nye normy Respubliki Belarus' : SN 4.02.03-2019. – Vved. 16.12.2019. – Minsk, 2025. – 52 s.
3. Hrustal'ov, B. M. Teplosnabzhenie i ventilyaciya. Kursovoe i diplomnoe proektirovanie : ucheb. posobie / B. M. Hrustal'ov, YU. YA. Kuvshinov, V. M. Kopko ; pod obshch. red. B. M. Hrustal'ova. – 3-e izd., ispr. i dop. – M. : ASV, 2008. – 784 s.
4. Teplovaya zashchita zhilyh i obshchestvennyh zdaniy. Energeticheskie pokazateli : SP 2.04.02-2020. – Vved. 01.02.2021. – Minsk, 2020. – 33 s.
5. Danilevskij, L. N. Fakticheskie energeticheskie harakteristiki zhilyh zdaniy / L. N. Danilevskij, A. N. Zhilo, B. F. Moskalik // Stroitel'naya nauka i tekhnika. – 2008. – № 5. – S. 22–29.
6. Danilevskij, L. N. Eksperimental'noe opredelenie sostavlyayushchih teplovogo balansa zhilyh zdaniy / L. N. Danilevskij // Arhitektura i stroitel'stvo. – 2008. – № 8. – S. 90–95.
7. Metod opredeleniya udel'nogo raskhoda teplovoj energii na otoplenie i ventilyaciyu ekspluatiruemyh zhilyh zdaniy : STB 2409-2015. – Vved. 01.01.2016. – Minsk : Gosstandart, 2015. – 28 s.
8. Stroitel'naya klimatologiya : Izmenenie № 1 SNB 2.04.02-2000. – Vved. 01.07.2007. – Minsk : M-vo arhitektury i stroitel'stva Resp. Belarus', 2007. – 35 s.
9. Livchak, V. I. Fakticheskoe teplopotreblenie zdaniy kak pokazatel' kachestva i nadezhnosti proektirovaniya / V. I. Livchak // AVOK. – 2009. – № 2. – S. 4–10.
10. Energy efficient residential buildings in Belarus : analysis and recommendation / M. Grätz, H. Fammler, M. Krekeler [et al.]. – Hamburg : Baltic Environmental Forum, 2016. – 140 p. – URL: https://www.bef.de.org/wp-content/uploads/2019/06/2016-02_ENERGY_EnergyEfficientResidentialBuildings.pdf (date of access: 15.07.2026).

Материал поступил 15.07.2026, одобрен 16.07.2026, принят к публикации 16.07.2026

УДК 624.07:624.046

ДОПУЩЕНИЯ МЕТОДА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ОШИБКИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ

А. В. Тур

К. т. н., доцент, заведующий кафедрой архитектуры, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: aturphd@gmail.com

Реферат

Моделирование поведения конструктивной системы после внезапного удаления колонны рекомендуют выполнять, опираясь, как правило, на подходы нелинейной динамики для конкретной истории нагружения. Альтернативно, при данном сценарии угрозы (удалении колонны) доступен упрощенный метод анализа поврежденной конструктивной системы, определяемый как метод энергетического баланса. В общем случае метод энергетического баланса (ЕВМ-метод) включает нелинейный статический анализ с пошаговым приложением контролируемого перемещения в узле с удаленным элементом и упрощенную процедуру определения динамической реакции системы на основе её энергетического баланса, что принято рассматривать как компромисс между точностью и сложностью. Метод энергетического баланса позволяет получить значение максимального динамического перемещения контрольной точки рассматриваемой конструктивной системы при установленном уровне нагрузки. Этот параметр является достаточным для оценивания живучести конструктивной системы, т. к. основная идея состоит в том, чтобы избежать разрушения и, следовательно, получить максимальное значение допустимого отклика. Для реальной конструкции с бесконечным числом степеней свободы упрощенный метод даёт приблизительный результат, который, однако адекватно отражает результаты, полученные «строгими» методами динамического нелинейного анализа с учётом истории нагружения. Неявная ошибка, содержащаяся в результатах при применении метода энергетического баланса, возникает главным образом из-за ряда упрощений и допущений, которые подробно рассмотрены в настоящей статье.

Ключевые слова: метод энергетического баланса, живучесть, ошибка моделирования.

ASSUMPTIONS OF THE ENERGY BALANCE METHOD AND RELATED ERRORS IN DETERMINING THE DYNAMIC RESPONSES OF STRUCTURAL SYSTEMS

A. V. Tur

Abstract

Modeling the behavior of a structural system following the sudden removal of a column is typically recommended based on non-linear dynamics (NLD) approaches for a specific loading history. Alternatively, under this specific hazard scenario (column removal), a simplified method for analyzing the damaged structural system is available, defined as the energy balance method. In the general case, the energy balance method (EBM) involves a non-linear static analysis (NLS) with incremental step-by-step application of controlled displacement at the node of the removed element, along with a simplified procedure for determining the dynamic response of the system based on its energy balance; this is widely considered a compromise between accuracy and complexity. The energy balance method allows for obtaining the maximum dynamic displacement value of the control point within the structural system under consideration at a specified load level. This parameter is sufficient for assessing the robustness of the structural system, since the core concept is to prevent collapse and, consequently, to determine the maximum value of the allowable response. For a real structure with an infinite number of degrees of freedom, the simplified method yields an approximate result, which, however, adequately reflects the outcomes obtained via 'rigorous' methods of dynamic non-linear analysis considering the loading history. The implicit error contained in the results when applying the energy balance method arises primarily due to a number of simplifications and assumptions, which are examined in detail in this paper.

Keywords: energy balance method, reliability, modelling error.

Введение

Численный анализ отклика конструктивной системы здания, основанный на имитационном моделировании его цифрового двойника, подвергнутого вынужденному внезапному удалению вертикального несущего элемента, является довольно сложной задачей с точки зрения совместного описания динамических эффектов, физической и геометрической нелинейности, вызванных ожидаемыми большими деформациями и перемещениями, когда перестаёт выполняться гипотеза плоских сечений, и в работу включаются мембранные эффекты.

Моделирование поведения конструктивной системы после внезапного удаления колонны рекомендуют выполнять, опираясь, как правило, на подходы нелинейной динамики для конкретной истории нагружения. Это требует привлечения высококвалифицированных специалистов с опытом выполнения расчётов в области нелинейной динамики строительных сооружений. Поэтому не удивительно, что конструкторы предпочитают выполнять нелинейные квазидинамические расчёты, пользуясь упрощенным подходом к учёту динамических эффектов для традиционного проектирования и оценивания эксплуатируемых строительных сооружений. Однако подходы, основанные на статических расчётах с применением повышающих

динамических коэффициентов, не вполне адекватно воспроизводят фактическое поведение конструкции, особенно в неупругой области её работы, как было показано в работах [1–3]. Альтернативно, при данном сценарии угрозы (удалении колонны) применяют упрощенный метод анализа поврежденной конструктивной системы, определяемый как метод энергетического баланса (англ. *EBM – Energy Balance Method*). В общем случае метод энергетического баланса (*EBM-метод*) включает нелинейный статический анализ с пошаговым приложением контролируемого перемещения в узле с удалённым элементом и упрощенную процедуру определения динамической реакции системы на основе её энергетического баланса, что принято рассматривать как *компромисс между точностью и сложностью*.

Подход, основанный на методе энергетического баланса, обеспечивает в общем случае более точное оценивание живучести конструктивной системы по сравнению с подходом, опирающимся на линейно-упругом анализе с повышающими динамическими коэффициентами, так как он учитывает при выполнении анализа способность конструктивной системы к поглощению (диссипации) энергии, пластическую деформативность и избыточность [4].

Метод энергетического баланса позволяет получить значение максимального динамического перемещения контрольной точки рассматриваемой конструктивной системы при установленном уровне нагрузки. Этот параметр является достаточным для оценивания живучести конструктивной системы, т. к. основная идея состоит в том, чтобы избежать разрушения и, следовательно, получить максимальное значение допустимого отклика. Основы метода энергетического баланса подробно рассмотрены в работах [1–2].

В рамках метода энергетического баланса считается, что после внезапного удаления колонны общая энергия остаётся постоянной на протяжении всего динамического деформирования конструкции (рисунок 1а), при условии, что энергия, рассеиваемая другими источниками, например, тепловая энергия, не учитывается [2, 3, 5]. При балансировке энергии учитывают три составляющих: кинетическую энергию (KE), возникающую при движении поврежденной части системы (подсистемы) после удаления опоры, энергию деформации (SE), возникающую при деформировании конструкции и высвобожденную потенциальную энергию (PE) при движении конструкции вниз. Высвободившаяся потенциальная энергия, возникающая в результате дей-

ствия несбалансированных гравитационных нагрузок на оставшуюся часть конструкции, приводит к динамическому движению и увеличению кинетической энергии. Напротив, упругая и неупругая энергия деформации, накопленная деформированной конструкцией, рассеивает кинетическую энергию, противодействуя и сопротивляясь движению.

Метод энергетического баланса опирается на допущение о том, что до внезапного удаления колонны, как потенциальная, так и кинетическая энергии равняются нулю. Непосредственно после мгновенного удаления колонны потенциальная энергия гравитационной нагрузки внезапно высвобождается и условия равновесия нарушаются. Если конструкция способна перераспределять несбалансированные/неуравновешенные нагрузки, потенциальная энергия может поглощаться энергией деформации. Следовательно, кинетическая энергия может достигать нулевого значения (т. е. $KE = PE - SE = 0$).

В момент, когда кинетическая энергия становится равной нулю, работа гравитационной нагрузки равняется поглощенной энергии деформации и нет более источника энергии, способной продолжить процесс деформирования. При этом достигается максимальная динамическая реакция.

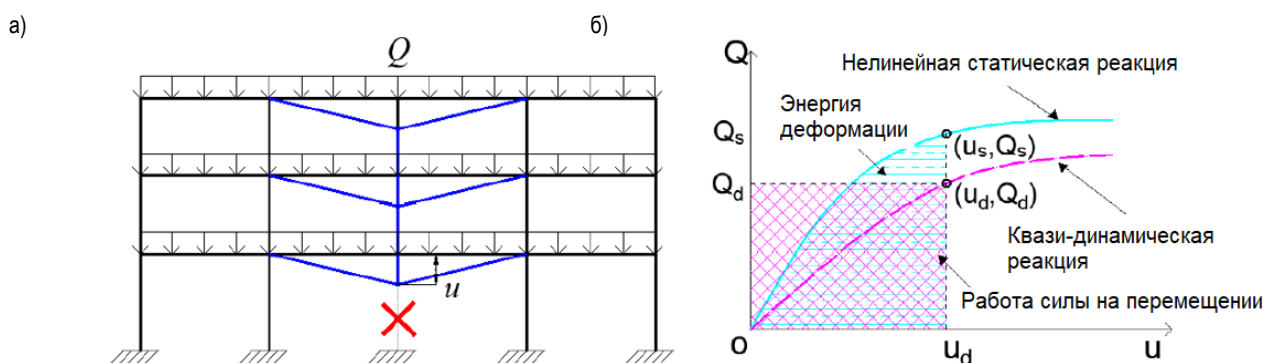


Рисунок 1 – Схема здания с удалённой колонной (а) и зависимость «нагрузка-перемещение» (б), описывающая нелинейную статическую и динамическую реакцию в методе энергетического баланса

Энергию, накопленную в деформированной системе, можно рассчитать с помощью нелинейного статического анализа (NLS). В этом случае энергия деформации представляет собой заштрихованную область под кривой статического сопротивления вплоть до перемещения u_c (рисунок 1б). С другой стороны, высвободившаяся потенциальная энергия, образованная несбалансированными нагрузками после внезапного удаления колонны, равна заштрихованной прямоугольной области для постоянного уровня нагрузки Q_d . Если предположить, что кинетическая энергия равна нулю (на уровне перемещения, $u_c = u_d$), то потенциальная энергия равна энергии деформации ($PE = SE$). Следует отметить, что рассматривается состояние, при котором обрушения не происходит, а конструкция занимает новое положение равновесия.

Графически, работа внешней гравитационной нагрузки представляет собой площадь прямоугольника под горизонтальной линией, соответствующей уровню нагружения, тогда как накопленная энергия деформации представляет собой площадь фигуры, заключенной под кривой, описывающей нелинейную статическую реакцию конструктивной системы. Максимальная реакция для уровня нагрузки Q_d , следовательно, соответствует перемещению u_d , при котором эти площади равны, как показано на рисунке 1б. Переходя последовательно к монотонно возрастающим уровням нагружения, может быть получена кривая динамической несущей способности (квазидинамического сопротивления) Q_d , основываясь только на кривой статического отклика $Q_{NL,d}$.

Математически точки кривой динамического отклика могут быть рассчитаны путём деления накопленной энергии деформации на соответствующее перемещение: $Q_d(u_d) = \frac{1}{u_d} \int_0^{u_d} Q_{NL,d} du$, где Q_d , $Q_{NL,d}$, u , u_d – соответствуют кривой динамической несущей способности, статической несущей способности, абсолютному динамическому перемещению и максимальной динамической реакции

системы, подвергнутой внезапному удалению колонны при различных уровнях нагружения.

Таким образом максимальная обобщенная динамическая реакция конструктивной системы, подвергнутой внезапному удалению колонны при различных уровнях нагружения, может быть получена из кривой нелинейного статического отклика, без выполнения нелинейного динамического анализа.

При этом следует иметь в виду, что метод энергетического баланса даёт довольно точный результат только для моделей конструктивных систем, которые имеют одну степень динамической свободы (англ. SDOF – *Single Degree of Freedom*) для полной динамической реакции. Для реальной конструкции с бесконечным числом степеней свободы, упрощенный метод даёт приближительный результат, который, однако, адекватно отражает результаты, полученные «строгими» методами нелинейного динамического анализа с учётом истории нагружения. Небольшая ошибка, содержащаяся в результатах при применении метода энергетического баланса, возникает, главным образом, из-за ряда упрощений и допущений, которые будут подробно рассмотрены ниже.

Чтобы оценить погрешности и неопределённости метода энергетического баланса (ЕВМ), было выполнено комплексное исследование основных параметров, оказывающих влияние на результат вычисления квазидинамического отклика.

В настоящей статье для каждого отдельного допущения о поведении различных простейших конструктивных систем были исследованы ошибки в оценке абсолютных значений максимальных динамических перемещений $w_{d,EBM}$, полученные с помощью рассматриваемого метода энергетического баланса (ЕВМ) и прямого нелинейного пошагового динамического анализа (IDA). Эти ошибки выражены в относительных величинах разницы между результатами, полученными с помощью метода энергетического баланса (ЕВМ) $w_{d,EBM}$, и условно «точными» результатами $w_{d,e,IDA}$, которые были получены

наиболее строгим методом анализа, рассмотренным для каждого отдельного предположения/допущения:

$$err = 100 \left(\frac{W_{d,EBM} - W_{d,IDA}}{W_{IDA}} \right), [\%].$$

1 Основные допущения метода энергетического баланса (EBM)

Метод энергетического баланса (EBM), применяемый для учёта динамических эффектов при оценке живучести поврежденной конструктивной системы методом альтернативных путей передачи нагрузки, основан на допущениях и упрощениях, которые приводят к приближенным решениям и сказываются на точности получаемых результатов (как было отмечено ранее «компромисс между точностью и сложностью»).

При выполнении параметрического анализа рассматривали ошибки, связанные со следующими основными **допущениями** метода энергетического баланса (EBM):

- для получения квазидинамической реакции/отклика допускается ступенчатое/пошаговое приложение гравитационной нагрузки, моделирующее внезапное удаление колонны (ранее было показано, что квазидинамическая реакция рассматривается здесь как последовательность статических состояний); при этом не рассматривается исходное деформированное состояние конструкции до удаления опоры;

- поврежденная подсистема (ячейка) после удаления колонны ведёт себя как система с одной степенью динамической свободы (SDOF) [1–3], т. е. реакция контролируется одним режимом деформации (формой колебаний), который остаётся постоянным во время динамической реакции. Таким образом, предполагают, что каждая точка в системе достигает своего максимального перемещения в одно и то же время. Однако в реальной конструкции этого никогда не происходит, поскольку существующее бесконечное количество режимов деформации (форм колебаний) достигает максимального перемещения в разные моменты времени. Следовательно, накопленная энергия деформации, подсчитываемая методом энергетического баланса (EBM), фактически является завышенной *a-priori*, как и расчётные значения максимальных квазидинамических прогибов, тогда как динамическая несущая способность, соответственно, занижена [3];

- в методе энергетического баланса (EBM) эффект демпфирования не рассматривают в явном виде. Вся энергия, поступающая в систему от нагрузок, преобразуется в чистую энергию деформации. При расчете методом энергетического баланса (EBM) не учитывают энергию, рассеиваемую демпфированием или другими механизмами. Следовательно, можно ожидать, что значение максимального динамического отклика будет завышено. Более того, все еще остается не только актуальным, но и спорным вопрос о том, как моделировать механизм демпфирования для сценария внезапного удаления колонны [5–7], например, рассматривая вязкое демпфирование или кулоновское демпфирование [3]. Например, исследования [8, 9] выявили недостатки, связанные с использованием демпфирования по закону Рэлея (на основе начальной жёсткости), при кото-

ром начальная жёсткость может создавать нежелательные искусственные вязкостные силы. Это связано с тем, что коэффициент жёсткости, используемый при демпфировании по закону Рэлея, также должен соответствующим образом обновляться, когда система реагирует на неупругую стадию деформирования [7];

- не учитывается влияние скорости деформации на свойства материалов, т. е., неявно считается, что способность конструктивной системы накапливать энергию деформации на заданном перемещении одинакова при статическом и динамическом нагружении.

Однако способность системы накапливать энергию деформации при заданном перемещении различается в условиях статического и динамического нагружения [10]. Метод энергетического баланса (EBM) не может учесть эти различия. Однако, как показали результаты экспериментальных исследований [11] и результаты, полученные на имитационных моделях [3, 5], влияние скорости деформирования невелико, поскольку максимальные скорости деформирования при внезапном удалении колонны возникают только на небольшом локальном участке и действуют в течение довольно короткого промежутка времени.

2 Параметрические исследования

2.1 Испытания двухпролётного фрагмента рамы, использованного в качестве аналога / прототипа при параметрических исследованиях

Для проведения параметрического исследования, направленного на выявление качественного влияния принятых допущений и упрощений на точность оценивания параметров живучести при совместном применении метода альтернативных путей передачи нагрузки и метода энергетического баланса (для учёта динамических эффектов) использовали результаты испытания двухпролётного балочного фрагмента монолитной рамы, детально описанные в [12]. Данные испытания были выбраны в связи с тем, что нагружение фрагмента выполняли при внезапном удалении средней опоры (время приложения нагрузки составляло 0,008 с) и различных уровнях нагружения. При этом, до удаления центральной опоры, в центре пролётов и на опоре были приложены сосредоточенные силы, создаваемые тарированными грузами. В процессе испытания фиксировали колебания (вертикальные динамические перемещения) и усилия в балках при различных уровнях нагружения. Следует отметить, что это практически единичное исследование, в рамках которого испытания выполняли при разных уровнях нагружения, что дало возможность с допустимой точностью восстановить точки кривой динамической несущей способности для данного фрагмента и сравнить их как с результатами прямого нелинейного динамического анализа, так и квазидинамической реакцией фрагмента, полученной с помощью метода энергетического баланса.

Конструктивное решение опытного фрагмента с геометрическими размерами основных элементов показано на рисунке 2. Схемы армирования опорных и пролётных сечений, прочностные характеристики арматурной стали и бетона, которые были применены для изготовления опытных образцов приведены в работе [12, с. 22].

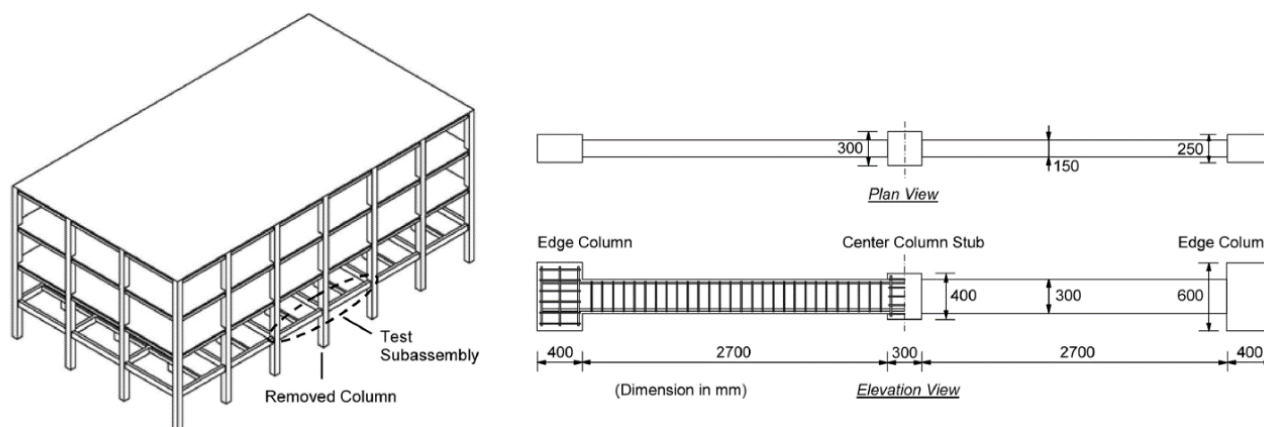


Рисунок 2 – Конструктивная система-прототип и опытный фрагмент [12, с. 21]

Схема нагружения опытного образца и соответствующая схема испытаний показаны на рисунке 3.

Параметрическое исследование включало следующие этапы:

- выполняли прямой нелинейный динамический анализ используя комплекс SAP2000 для различных уровней нагружения, принятых при испытаниях опытных образцов. Для увеличения количества точек, необходимых при построении кривой динамического отклика, использовали дополнительно промежуточные уровни нагружения. Для разных этапов нагружения использовали разные значения коэффициентов демпфирования, полученные из опыта (от 0 % до 5 % для стадии упругой работы и не менее 10 % – для нагружений близких к предельным) [12];
- по полученным значениям максимальных динамических перемещений для заданного уровня нагрузки выполняли построение кривой динамического отклика, на которую затем наносили точки,

полученные при проведении опытного нагружения. Анализировали отклонения результатов, полученных прямым динамическим анализом от результатов, полученных в динамических испытаниях при различных уровнях нагружения;

- выполняли прямой нелинейный статический пошаговый (ступенчатый) анализ повреждённой конструктивной системы с контролем вертикального перемещения в центральном узле (месте удаления вертикальной опоры). Полученную кривую статического отклика перестраивали в квазидинамическую кривую по правилам метода энергетического баланса [2, 3, 5]. Вычисляли погрешности метода энергетического баланса по сравнению с прямым нелинейным динамическим расчётом.

Расчётная схема (цифровой двойник) двухпролётного фрагмента с местами врезки изгибных и осевых пластических шарниров показана на рисунке 4.

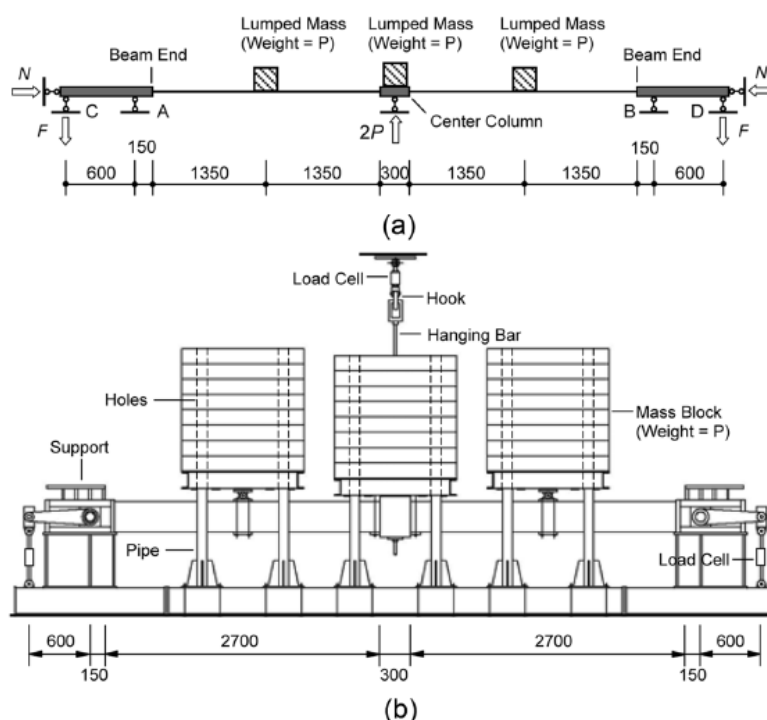


Рисунок 3 – Схема испытаний, схема нагружения и общий вид испытательной установки в опытах [60, с. 22]

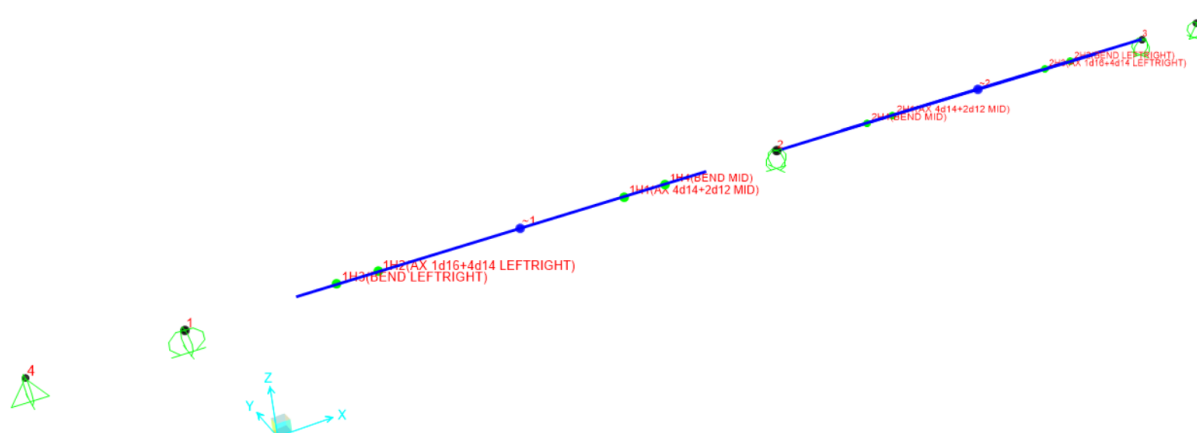


Рисунок 4 – Расчётная схема (цифровой двойник) фрагмента с местами врезки пластических шарниров

На рисунке 5 показаны примеры диаграмм, описывающих осевые «N-w» и изгибные «M-θ» пластические шарниры для различных конфигураций расположения арматурных стержней в пролётных и опорных сечениях, как это было принято в опытах [12]. При опре-

делении параметрических точек диаграммы, описывающей осевой пластический шарнир, использовали правила, разработанные для случая, когда в одном сечении использованы стержни разных диаметров.

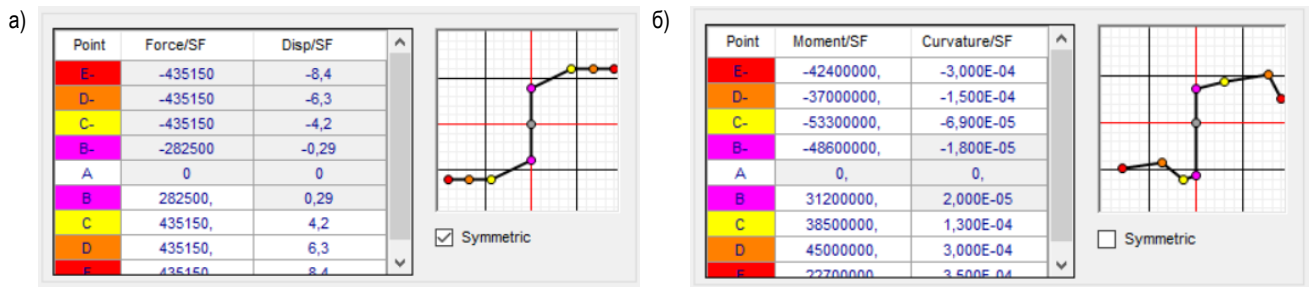


Рисунок 5 – Диаграммы для описания осевых (а) и изгибных пластических шарниров (б)

2.2 Ступенчатое приложение гравитационной нагрузки, моделирующее внезапное удаление колонны

Метод энергетического баланса (ЕВМ) предполагает, что внезапное разрушение / удаление колонны, по своей сути, аналогично мгновенному приложению действующих гравитационных нагрузок (см. рисунок 6).

Неявная ошибка этой гипотезы возникает из-за принятого допущения о том, что вся работа, совершаемая гравитационными нагрузками, считается динамической, в то время как на самом деле часть

этой внешней работы является статической, сгенерированной предварительными деформациями элементов конструктивной системы, действующих до удаления колонны (в ряде работ российских исследователей [14, 17, 18], относящихся к школе академика В. И. Колчунова использован термин «статико-динамическое деформирование»). При использовании метода энергетического баланса (ЕВМ) это допущение приводит, как правило, к завышению / переоценке максимальных динамических прогибов / перемещений.

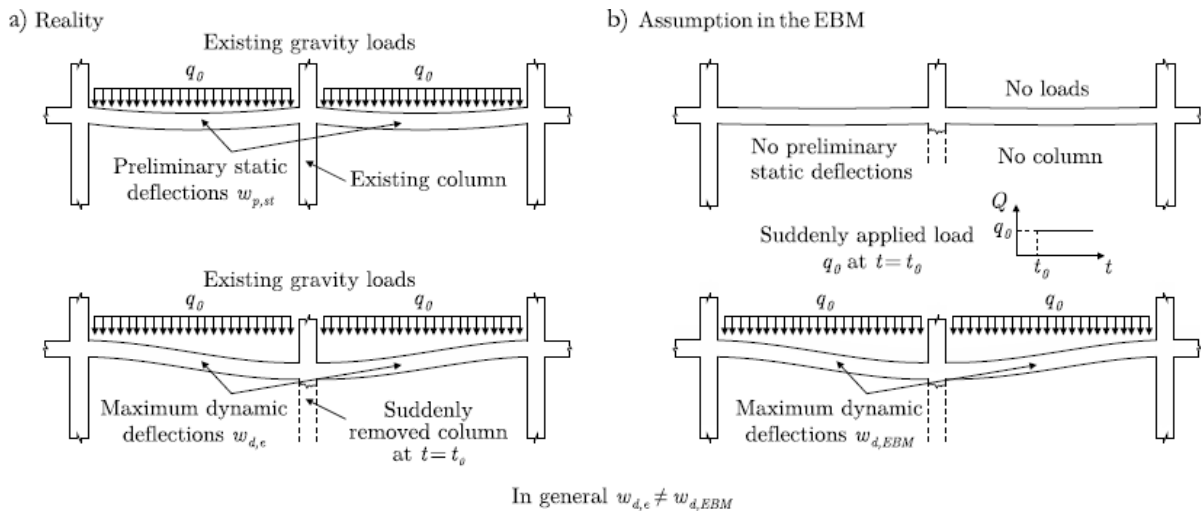


Рисунок 6 – Различие между фактическим поведением нагруженной конструктивной системы при удалении центральной колонны (а) и поведением при эквивалентном ступенчатом нагружении по методу энергетического баланса (б) [16, с. 39]

Кроме того, повреждённый фрагмент конструкции, подвергающийся равномерной ступенчатой нагрузке, получает максимальные динамические прогибы в средней контрольной точке, в которой было произведено удаление колонны. Однако аналогичные фрагменты, подвергающиеся реальным сценариям разрушения колонн, не всегда демонстрируют максимальные динамические прогибы в середине пролёта. Это зависит от расположения удалённой колонны в пределах повреждённой ячейки.

В общем случае можно предположить, что ступенчатая или пошаговая гравитационная нагрузка аналогична внезапному удалению колонны, если динамические прогибы, вызванные ступенчатой нагрузкой, намного больше предварительных статических прогибов $w_{p,st}$, вызванных гравитационными нагрузками в неповреждённой конструктивной системе, приложенными до удаления колонны. В этом случае общая внешняя работа, совершаемая гравитационными нагрузками, практически не отличается для ступенчатого приложения гравитационной нагрузки и её однократного динамического приложения после внезапного удаления колонны. В работах [3, 16] было показано, что разница в максимальном динамическом прогибе между точным аналитическим решением для динамического прогиба $w_{d,e}$ и решениями, полученными по методу энергетического баланса (ЕВМ) $w_{d,EBM}$, незначительна.

В нашей работе [13] было показано, что это допущение приводит к большим ошибкам, когда конструкция остаётся в упругой области

при ступенчатой нагрузке, поскольку разница между предварительными статическими и динамическими прогибами становится значительно меньше. Неупругое/нелинейное поведение элементов конструкции приводит к большим динамическим прогибам и, следовательно, к меньшим относительным ошибкам.

Чтобы проанализировать влияние этого допущения на точность результатов, в работе [15] было проведено исследование параметров, упрощённых линейных упругих систем, для которых можно получить точное аналитическое решение для максимального динамического перемещения.

Сначала была проанализирована линейно-упругая реакция двухпролётной балки с шарнирным опиранием при переменном положении (описываемом параметром Δ) удаляемой колонны, смещаемой вдоль пролёта, как показано на рисунке 7а). Балка была нагружена равномерно распределённой гравитационной нагрузкой. Исходные статические прогибы $w_{p,st}$, а также максимальные динамические прогибы для точного аналитического решения $w_{d,e}$ и для метода энергетического баланса (ЕВМ) $w_{d,EBM}$ были рассчитаны для различных положений внезапно удаляемой колонны, их отношения показаны на рисунке 7б).

Когда удаляемая колонна / опора находится в центре балки, предварительные статические прогибы достаточно малы, и разница между аналитическим решением и решением методом конечных элементов незначительна. Если опора расположена эксцентрично

со смещением от центра балки (например, на расстоянии $L_b/6$ от опоры балки), предварительные статические прогибы более значительны, и разница между результатами решений гораздо больше. Более того, можно отчётливо видеть, что максимальный динамический прогиб для решения методом конечных элементов имеет место в центре балки, в то время как для точного аналитического решения он немного смещён в сторону удалённой колонны. В работе [15] показано, что метод энергетического баланса (ЕВМ) всегда даёт более высокие максимальные динамические прогибы, чем точное аналитическое решение. Этот вывод был подтверждён собственными исследованиями [13].

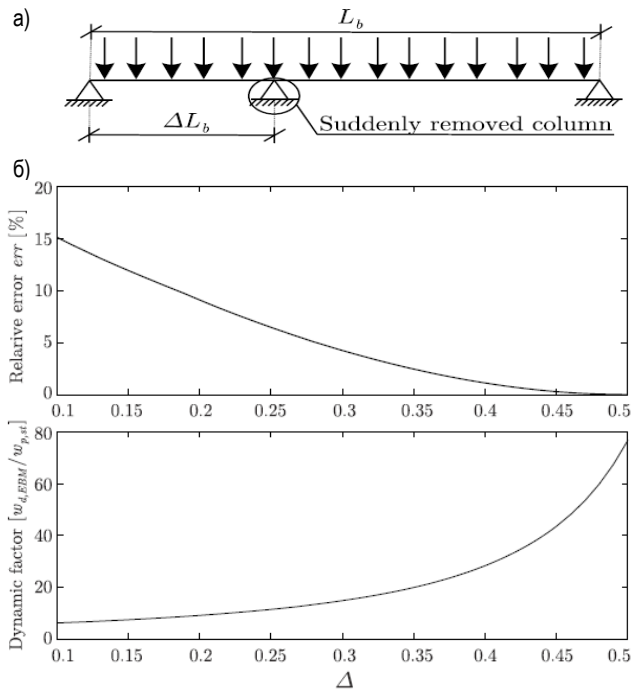


Рисунок 7 – Относительная ошибка определения максимальных динамических перемещений методом энергетического баланса и отношения динамических ($w_{d,EBM}$) и статических (w_{st}) линейно-упругих прогибов при изменении положения опоры в пролёте Δ для балки нагруженной равномерно распределенной нагрузкой согласно [15, с. 3469]

На рисунке 7б показан график относительной ошибки (err) между максимальным динамическим прогибом балки для точного аналитического решения и решения, полученного методом энергетического баланса (ЕВМ) для различных значений параметра Δ (параметр, показывающий положение удаляемой опоры в долях пролёта неразрезной балки ΔL_b , см. рисунок 7а). Кроме того, показан график, связывающий отношение максимального динамического прогиба $w_{d,EBM}$, вызванного ступенчатой нагрузкой, к максимальному

начальному статическому прогибу $w_{p,st}$, вызванному той же нагрузкой. Когда удаляемая опора находится в центре балки относительная погрешность практически равна нулю и увеличивается при уменьшении Δ , то есть при приближении колонны к крайним опорам и формировании асимметрии конструкции.

Для рассмотренного случая при значении $\Delta = 0,3$ ошибка составляет около 5 %, что является типичной погрешностью, которую возможно допустить в инженерных расчётах при проектировании конструкций. Эти результаты показывают, что для распространённых конфигураций каркасных конструктивных систем допущение о ступенчатом приложении нагрузки, моделирующем внезапное удаление внутренней колонны / опоры не приводит к большим относительным ошибкам. Это означает, что конфигурации конструктивных систем со значениями коэффициента Δ , которое приближается к 0,5 (как на рисунке 7б), показывают небольшие относительные погрешности, обеспечивая точность метода.

Нагружение выполняли тремя сосредоточенными силами (приложенными в середине пролёта и на опоре). Принимали переменное положение опоры (в центре пролёта и 1/3 пролёта) как показано на рисунке 8. Принятое положение опоры принято рассматривать как граничное при реальном проектировании. При прямом динамическом анализе принимали время приложения нагрузки 0,008 с и переменные значения коэффициента демпфирования $\xi = 0 \%$; 1 %; 5 %. Результаты расчётов статических и динамических перемещений при различных уровнях нагружения (в долях от предельной нагрузки), различных коэффициентах демпфирования для случая симметричного и эксцентричного размещения опоры в пролёте приведены в таблицах 1 и 2. Как видно, в таблицы 1 и 2 не включены результаты вычисления ошибки для случаев, когда коэффициент демпфирования был принят равным $\xi = 0$ (как уже отмечалось ранее метод энергетического баланса не учитывает в явном виде коэффициента демпфирования). Для случая $\xi = 0$ практически не наблюдается отличий в кривых динамической несущей способности, рассчитанной пошаговым прямым нелинейным динамическим анализом (IDA) и квазидинамической несущей способности, определенной методом энергетического баланса (ЕВМ), как это показано на рисунке 10. Следует отметить, что такое совпадение возможно только в том случае, когда адекватно определена нелинейная статическая реакция из которой перестраивают квазидинамическую кривую.

При анализе прогибов и соответствующих ошибок моделирования, приведенных в таблицах 1 и 2, в первую очередь обращает на себя внимание следующее обстоятельство. В стадии упругой работы, когда уровень нагружения не превышает примерно 30 % от предельной нагрузки относительная ошибка при коэффициенте демпфирования $\xi = 1 \%$ составляет от 4 % до 6 %, что соответствует результатам, полученным в работах [3, 15] при смещении опоры в линейно-упругих системах. Таким образом смещение опоры в 1/3 пролёта практически не повлияло на относительную ошибку моделирования, при том, что отношение максимального динамического прогиба к начальному статическому прогибу до удаления колонны (w_{IDA} / w_{st}) уменьшилось с 285 до 59,3.

Таблица 1 – Значения статических и динамических прогибов, определенных прямым динамическим анализом (IDA) и по методу энергетического баланса (ЕВМ) при различных коэффициентах демпфирования

Уровень нагружения P/P_u	w_{st} [мм]	$\xi = 1 \%$				$\xi = 5 \%$			
		w_{EBM} [мм]	w_{IDA} [мм]	IDA/ST	err , %	w_{EBM} [мм]	w_{IDA} [мм]	IDA/ST	err , %
0,1	0,08	2,22	2,10	26,25	5,04	2,22	1,82	22,75	18
0,2	0,15	4,43	4,13	27,53	6,8	4,43	3,64	24,27	18
0,3	0,22	6,65	6,20	28,18	6,8	6,65	5,50	30	18
0,6	0,37	17,00	13,40	45,9	21,9	17,00	10,2	45,9	40
0,7	0,45	40,00	27,00	59,70	32,5	40,00	16,40	88,9	59
0,8	0,52	90,00	61,30	78,46	31,9	90,00	36,00	173,7	60
0,9	0,60	139,00	105,00	117,98	24,5	139,00	65,5	231,7	52,9
1,0	0,70	200,00	160,00	285,00	20	200,00	91,00	285,7	52,00

Таблица 2 – Значения статических и динамических прогибов, определенных прямым динамическим анализом (IDA) и по методу энергетического баланса (EBM) при различных коэффициентах демпфирования (асимметричный фрагмент)

Уровень нагружения	w_{st} , мм	$\xi = 1\%$			
		WEBM	WIDA	IDA/ST	err, %
0,1	0,20	1,61	1,55	8,05	4
0,25	0,40	3,22	3,10	8,05	4
0,38	0,58	4,82	4,63	8,31	4
0,63	1,00	10,20	9,32	10,20	9
0,75	1,16	17,6	15,10	15,17	14
0,88	1,35	43,7	31,70	32,37	27
1,00	1,55	91,90	71,00	59,3	23

При переходе к уровню нагружения, при котором образуются пластические шарниры, происходит резкое увеличение относительной ошибки

при значениях коэффициентов демпфирования отличных от нуля, тогда как кривые динамической и квазидинамической реакций по-прежнему совпадают, и относительная ошибка стремится к нулю (см. рисунок 8).

Результаты, полученные при коэффициенте демпфирования $\xi = 1\%$ для симметричного и несимметричного фрагментов приведены в таблицах 1 и 2. Из сравнения параметров, приведенных в таблицах 1 и 2 видно, начальные максимальные статические прогибы w_{st} элементов двухпролётного фрагмента с несимметричным расположением пролётов примерно в два раза превышали начальные прогибы элементов с симметричным расположением пролётов. Однако даже при коэффициенте демпфирования $\xi = 1\%$ это мало повлияло на относительную ошибку моделирования. При этом в упругой стадии полученные значения относительной ошибки как для симметричных, так и несимметричных систем находились в пределах от 4 % до 6 %.

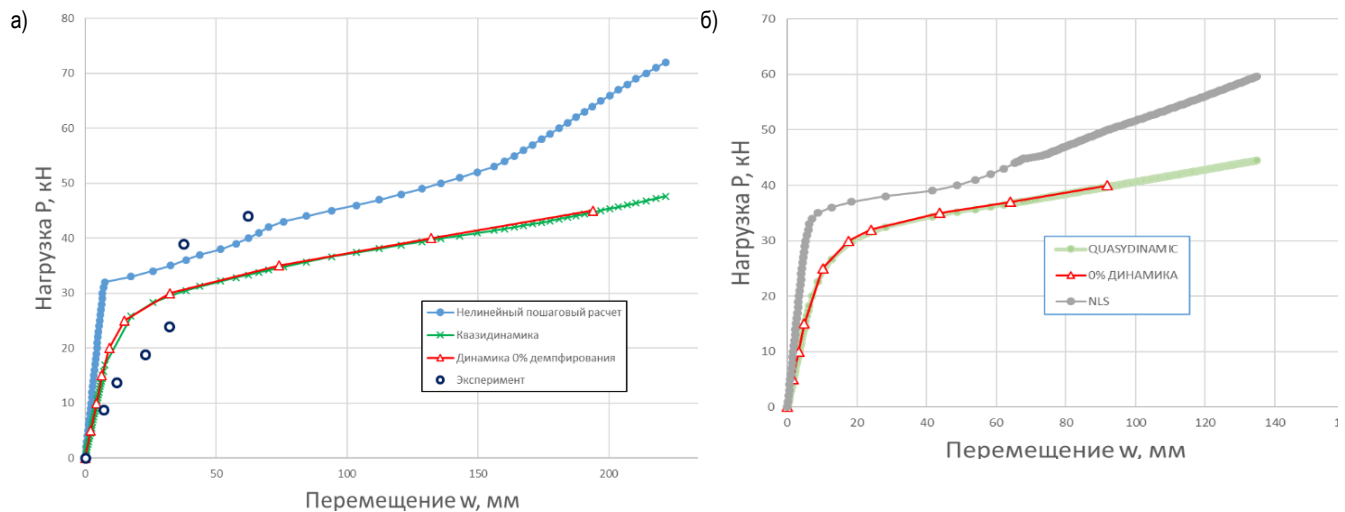


Рисунок 8 – Зависимости «P-w» для опытного фрагмента двухпролётной балки с симметричным (а) и несимметричным (1/3 пролёта) (б) расположением опоры при коэффициенте демпфирования $\xi = 0$

По результатам выполненного анализа может быть сформулировано общее правило, которое следует применять при проектировании конструктивных систем в особой расчётной ситуации: чем более симметрична исходная конфигурация конструктивной системы, тем меньше будут предварительные/начальные статические прогибы её элементов (до удаления колонны) и, следовательно, меньше будет погрешность максимального динамического прогиба, определяемого пошагово методом энергетического баланса (EBM), когда очередные ступени нагрузки прикладывают к недеформированной системе.

2.3 Поврежденная подсистема (ячейка) ведёт себя как система с одной степенью свободы

Следующее, и возможно основное допущение метода энергетического баланса (EBM) заключается в предположении о том, что реакция части конструктивной системы (как правило отдельной ячейки), подвергшейся разрушению/удалению колонны, контролируется одним режимом деформации (формой колебаний) и что эта форма колебаний остаётся неизменной на протяжении всего динамического отклика. Другими словами, в методе энергетического баланса сделано допущение о том, что поврежденная ячейка/подсистема ведёт себя как система с одной степенью динамической свободы.

Неявная ошибка при использовании метода энергетического баланса (EBM) возникает из-за предположения, что максимальная динамическая реакция реализуется тогда, когда кинетическая энергия всей подсистемы в какой-то конкретный момент времени становится равной нулю.

Следует отметить, что реальные конструкции представляют собой совокупность распределённых масс с бесконечным числом степеней свободы. Таким образом, они обладают бесконечным числом собственных периодов и форм колебаний. Каждая из этих форм колебаний по-разному возбуждается динамическими нагрузками, достигая своего максимального отклика, как правило, в разные моменты времени. Поэтому требование о том, чтобы скорость перемещения всех масс и кинетическая энергия всей системы элементов конструкции были равны нулю одновременно в некоторый конкретный момент времени, для реальных систем с несколькими (или множественными) степенями свободы (MDOF), как правило, не выполняется. Следовательно, при использовании метода энергетического баланса (EBM) в реальных конструкциях запасённая энергия деформации подсистемы всегда завышается, как и максимальные динамические прогибы. С другой стороны, при использовании метода энергетического баланса (EBM) несущая способность рассматриваемой системы практически всегда занижается [3, 15].

Метод энергетического баланса (EBM) применительно к реальным конструктивным системам не имеет строгого теоретического обоснования. Кроме того, горизонтальные колебания, связанные, например, с сейсмическим воздействием, которые приводят к горизонтальным перемещениям перекрытий, не учитываются, поскольку метод в традиционном представлении предполагает учёт вертикальных прогибов при действии гравитационных нагрузок. Следовательно, при расчёте реакции конструктивной системы рассматривают только вертикальные колебания несущей конструкции после удаления колонны, поскольку они являются преобладающими.

Чтобы повысить точность метода энергетического баланса (ЕВМ), предполагая, что подсистема нагружена равномерно распределенной или симметричной нагрузкой, всегда целесообразно выбрать в качестве точки отсчёта для эквивалентной системы с одной степенью свободы точку, лежащую на линиях геометрической симметрии подсистемы. Например, для сценариев удаления внутренних колонн в качестве точки отсчёта удобно выбрать середину балки или плиты. Таким образом, влияние всех асимметричных форм деформаций не учитывается, и в реакции, скорее всего, будет преобладать одна форма деформации/колебаний. Следует также отметить, что метод энергетического баланса (ЕВМ), как уже отмечалось ранее, основан на рассмотрении только вертикальных перемещений, которые очень чувствительны к первым нижшим формам/модам колебаний. Чем выше моды колебаний, тем меньше они влияют на прогибы и в целом на реакцию несущей конструкции.

В работах [3, 15] было показано, что пренебрегая демпфированием и используя свойство ортогональности бесконечного числа форм колебаний ϕ_n системы MDOF с многими степенями свободы, в *линейных упругих* системах можно получить полную реакцию конструкции путём применения принципа суперпозиции реакций для каждой отдельной формы колебаний как для системы с одной степенью свободы. Следовательно, типичное решение для определения вектора относительных перемещений $w(t)$ для задачи о свободных колебаниях системы MDOF с несколькими/многими степенями свободы, согласно [15] определяется следующим выражением:

$$w(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \cos(\omega_n \cdot t) + B_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t)) \phi_n \quad (1)$$

где ϕ_n , ω_n , A_n , B_n – n -ая форма колебаний, частота собственных колебаний, связанная с n -ой формой колебаний, и A_n и B_n – константы интегрирования. Подставив начальные перемещения и скорости ($w(0) = -w_{st}$ и $\dot{w}(0) = 0$), в уравнение (1), получим:

$$w(0) = -w_{st} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \phi_n; \quad (2)$$

$$w'(0) = 0 = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \phi_n. \quad (3)$$

Как упоминалось ранее, вклад одних режимов (форм колебаний) в другие, в линейно-упругих системах равен нулю из-за ортогональности между режимами (формами) колебаний. Учитывая это свойство и предполагая, что первая основная форма колебаний ϕ_1 системы имеет форму статической деформации (кривой статических прогибов) под действием равномерно распределенной гравитационной нагрузки, в работах [3, 15] были получены следующие значения неизвестных констант интегрирования A_n и B_n :

$$A_1 = -1; A_{2...n} = 0; \quad (4)$$

$$B_{1...n} = 0 \quad (5)$$

Подставляя эти значения в уравнение (1), получаем:

$$w(t) = -\cos(\omega_1 \cdot t) w_{st}. \quad (6)$$

Подставляя уравнение (6) в уравнение ($w(t)_{abs} = w_{st} + w(t)$), получаем

$$w(t)_{abs} = w_{st} \cdot (1 - \cos(\omega_1 \cdot t)), \quad (7)$$

где $w(t)$ – динамическое перемещение, измеренное от положения статического равновесия w_{st} под действием гравитационной нагрузки;

$w(t)_{abs}$ – абсолютное перемещение.

Таким образом, *линейно-упругие конструкции* с несколькими степенями свободы, подверженные внезапному приложению равномерно распределенной нагрузки, на протяжении всего динамического отклика имеют одну форму колебаний, соответствующую ста-

тической форме деформации (деформированной схемы) повреждённой системы при равномерно распределенной нагрузке.

Тот же результат получается при использовании зависящих от силы векторов Ритца в качестве форм колебаний [14]. Первый вектор Ритца – это функция распределения статического прогиба, соответствующая ступенчатому приложению гравитационной нагрузки. Дальнейшие векторы Ритца не возбуждают ни одну массовую степень свободы и не учитываются. Таким образом, конструкция имеет только одну основную форму колебаний. Это означает, что для линейно-упругих систем метод энергетического баланса (ЕВМ) является достаточно точным в этом аспекте. Однако для *нелинейных динамических реакций эти предположения не выполняются*, и метод даёт приближенные результаты, содержащие погрешности.

С другой стороны, поведение неупругих систем не сильно отличается от поведения упругих систем. Следовательно, разумно ожидать, что неупругие реакции слабо связаны [9] и что первый вектор Ритца, зависящий от нагрузки, для каждой независимой нелинейной деформации доминирует над реакцией.

Оценка невязной погрешности при использовании метода энергетического баланса (ЕВМ) для анализа нелинейных динамических реакций конструкции является непростой задачей. Эта погрешность зависит от большого количества переменных, таких как конфигурация конструктивной системы, геометрия, расположение и размеры пластических шарниров или линий текучести (линейных пластических шарниров), нелинейное поведение материала, предполагаемый уровень нагрузки и т. д. Таким образом, не существует универсальной процедуры, которая позволила бы однозначно определить погрешность, возникающую при расчётах динамических перемещений с использованием метода энергетического баланса (ЕВМ) для неупругих систем.

Чтобы проиллюстрировать названные проблемы, рассмотрим простой пример. В работе [15] был выполнен динамический анализ балки, защемленной по концам и подверженной действию равномерно распределенной ступенчатой нагрузки на разных уровнях. Балка считалась невесомой (динамическая масса была связана с приложенными нагрузками), имела постоянное поперечное сечение из изотропного материала. При нелинейном динамическом анализе с учётом истории нагружения не учитывали эффекты демпфирования и влияние скорости деформации/нагружения на свойства материалов. Предполагалось, что материал обладает идеальным упругопластическим поведением с образованием пластических шарниров, в которых сосредоточена вся пластическая деформация.

Как статический, так и динамический анализ с учётом истории нагружения был выполнен с помощью программного обеспечения SAP2000.

Результаты анализа показаны на рисунке 9. На верхнем графике представлена зависимость нелинейных статических и динамических характеристик от нагрузки и коэффициента пластичности, а также кривая динамической несущей способности. Различные фазы работы неупругой конструктивной системы (а), (б) и (в) также показаны на графике нелинейного статического отклика на рисунке 9. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что нелинейная статическая реакция представлена здесь упрощенной трёхлинейной диаграммой.

Аналогичным образом был выполнен нелинейный статический анализ при пошаговом нагружении двухпролётного фрагмента, описанного в разделе 2.2. Далее, с использованием положений метода энергетического баланса (ЕВМ), была перестроена квазидинамическая кривая несущей способности (см. рисунок 10). С использованием прямого пошагового нелинейного динамического анализа, была получена кривая динамической несущей способности. На рисунке 10 показаны последовательные этапы установления квазидинамической реакции и её сравнение с кривой динамической несущей способности, полученной прямым динамическим нелинейным анализом. Как видно из графиков, показанных на рисунке 15, при коэффициенте демпфирования $\xi = 0$ результаты расчётов квазидинамической кривой и динамической кривой совпадают практически полностью на всём диапазоне нагружений, и вычислительная ошибка стремится к нулю.

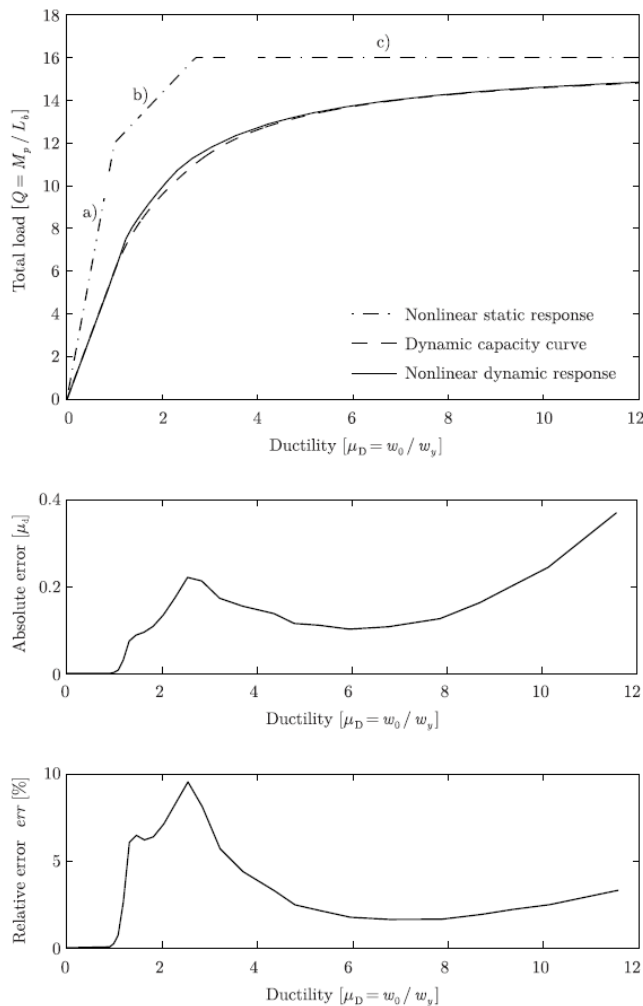


Рисунок 9 – К оценке относительной ошибки моделирования при анализе защемлённой балки при разных уровнях нагружения согласно [15, с. 3472]

На нижних графиках, показанных на рисунке 9, представлены абсолютные и относительные ошибки максимальных динамических прогибов, установленных прямым нелинейным динамическим анализом с историей нагружения $w_{d,e}$, рассчитанных с помощью комплекса SAP2000 и кривой динамической (квазидинамической) реакции (несущей способности) $w_{d,EBM}$, рассчитанной с помощью метода энергетического баланса (EBM) для нескольких уровней нагружения. Эти погрешности представлены в зависимости от возрастающего коэффициента пластичности и уровня нагружения, чтобы упростить сравнение с результатами различных подходов к анализу.

Из рисунка 9 видно, что на этапе линейно-упругой деформации погрешность метода энергетического баланса EBM при оценке максимального динамического прогиба равна нулю. На этом этапе на протяжении всего динамического отклика конструкции форма деформации остаётся такой же, как описано выше, и система представляет собой конфигурацию, в которой энергия является только потенциальной.

Таким образом, этот пример подтверждает, что метод энергетического баланса (EBM) даёт такое же решение для линейных упругих систем, как и строгий нелинейный динамический анализ с историей нагружения, рассчитанный с помощью конечно-элементной модели (FEM). Другими словами, на упругом этапе нагружения кривая динамической несущей способности практически полностью соответствует кривой нелинейной динамической реакции.

Как только в опорных узлах балки достигается пластический момент M_p , сразу возникает относительно большая погрешность из-

за образования пластических шарниров, которые мгновенно изменяют конфигурацию конструктивной системы и увеличивают её эффективную жёсткость. Это увеличение вызвано переходом к конструкции, показывающей упругопластическое поведение, поскольку перераспределение эффектов воздействий локализуется в областях шарниров, а прогиб в центре практически не увеличивается. В реальных конструкциях шарниры постепенно перераспределяют усилия, и эта погрешность будет меньше. Дополнительным источником ошибок на этом этапе является тот факт, что динамическая реакция больше не может быть представлена в виде уникальной/единственной формы колебаний (смотри [15]), но для нагрузок, близких к предельным, эта ошибка не имеет значения, поскольку реакция балки по-прежнему, в основном упругая. Дискретно-континуальная система, в которую превращается балка после образования пластических шарниров, фактически является нерегулярной, и форма колебания в общем случае не соответствует колебаниям континуальной системы.

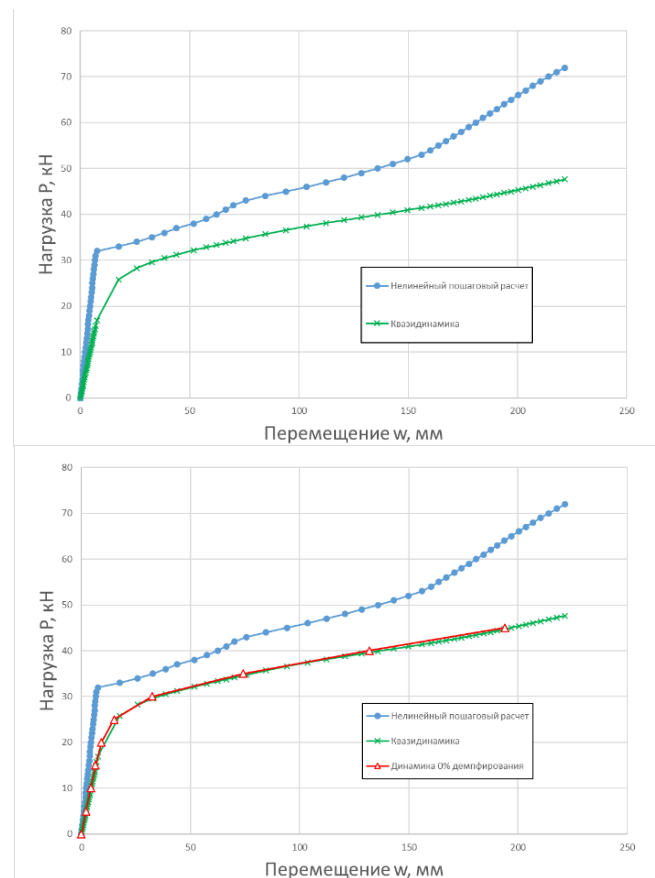


Рисунок 10 – Этапы построения квазидинамической кривой (а) и сравнение с динамической кривой, полученной прямым нелинейным пошаговым динамическим анализом при коэффициенте демпфирования $\xi = 0$

При дальнейшем увеличении нагрузки ошибка стабилизируется по мере перераспределения локальной нагрузки между шарнирами. Однако ошибка, связанная с учётом только одной формы колебаний, начинает увеличиваться, как только конструкция показывает значительную неупругую реакцию. Этот момент можно наглядно увидеть на примере рисунка 9, когда достигается значение коэффициента пластичности, равное двум и в таблицах 1 и 2 при уровне нагружения более 0,5.

С этого момента ошибка быстро возрастает, пока не достигнет максимума при значении коэффициента пластичности около 2,5, или уровне нагружения ($\lambda \approx 0,9$) непосредственно перед формированием

механизма разрушения. В этот момент реакция примерно наполовину упругая, как у защемлённой балки, и наполовину упругопластическая, поэтому нет явного доминирующей формы колебания, который точно отражал бы всю динамическую реакцию.

По мере достижения пластического момента (образования пластического шарнира) в центре балки, конфигурация конструкции меняется на механизм разрушения, снижая кажущуюся жёсткость системы. Здесь перераспределение усилий из-за разгрузки шарниров локализуется в средней точке балки, и поэтому прогиб в центре значительно увеличивается. Этот эффект вызывает монотонное уменьшение погрешности, достигающей минимума при значениях коэффициента пластичности ($\mu = \Delta_u / \Delta_y$) около 6 (рисунок 9), когда локальное перераспределение завершается и погрешность стабилизируется.

Если рассматривать полный динамический отклик при больших уровнях нагрузки, то можно выделить упругую, упругопластическую фазы и фазу разрушения (фазы (а), (б), (в) на рисунке 9). Однако при относительно больших значениях коэффициента пластичности ($\mu = \Delta_u / \Delta_y$), фаза разрушения имеет большее значение для динамического поведения системы и способна точно воспроизводить большую часть динамического отклика, что приводит к приемлемым ошибкам.

Наконец, кривая динамической несущей способности и нелинейная динамическая реакция становятся почти горизонтальными, и небольшое увеличение общей нагрузки приводит к значительному увеличению перемещения, что делает метод энергетического баланса (EBM) более чувствительным к ошибкам перемещения, используя в качестве эталона для сравнения конкретный уровень нагрузки. Как абсолютная, так и относительная ошибка будут бесконечно расти, но это не имеет значения, поскольку коэффициент пластичности более 12 не характерен для реальных конструкций из классических строительных материалов, и поэтому ошибка должна оставаться в допустимом диапазоне ниже 5 %.

Несмотря на то, что при проведении анализа были приняты некоторые упрощения, при использовании метода энергетического баланса не ожидается значительных отклонений в результатах для реальных конструкций, подвергающихся ступенчатой гравитационной нагрузке, без учёта влияния демпфирования и скорости деформации. Практически полное сходство между кривой динамической (квазидинамической) несущей способности, полученной методом энергетического баланса и нелинейной динамической реакцией с учётом истории нагружения показывает, что неупругие системы с несколькими степенями свободы, подверженные внезапному удалению колонны, для оценки максимальной динамической реакции могут быть смоделированы как эквивалентные неупругие системы с одной степенью свободы.

Из сравнения кривых, описывающих нелинейную динамическую реакцию, и кривых динамической несущей способности балки, полученных методом EBM, можно легко убедиться в том, насколько точные результаты даёт метод энергетического баланса. Несмотря на то, что при этом анализе было сделано несколько упрощений, для реальных конструкций, подвергающихся ступенчатой гравитационной нагрузке без учёта демпфирования и скорости деформации, отклонения в точности этого подхода будут не столь значительными. Таким образом, в данном случае большинство конструкций допустимо моделировать как систему с одной степенью динамической свободы.

2.4 Демпфирование и рассеивание энергии

Следующее упрощение метода энергетического баланса (EBM) заключается в том, что вся потенциальная энергия, вносимая в систему нагрузками, преобразуется в исключительно чистую энергию деформации. Другими словами, метод энергетического баланса EBM неявно игнорирует/не учитывает энергию, рассеиваемую за счёт демпфирования, трения или других механизмов, и поэтому переоценивает максимальную динамическую реакцию рассматриваемой системы. Этот подход также не учитывает энергию, рассеиваемую при трещинообразовании бетона. Следовательно, принимается допущение о том, что возможные различия между энергиями разрушения при статических и динамических воздействиях не имеют суще-

ственного значения и не учитываются в данном методе. Часто вся эта энергия разрушения просто учитывается в анализе как часть энергии, рассеиваемой при демпфировании.

Примечание – Термины «демпфирование» и «рассеивание (диссипация)» энергии плотно связаны, но не являются полными синонимами. Рассеивание – это физический процесс потери энергии, а демпфирование – это совокупный результат этого процесса, выраженный в снижении амплитуды колебаний.

Поскольку максимальная динамическая реакция при внезапном удалении колонны обычно достигается примерно в середине первого полупериода колебания, на первом этапе разумно предположить, что энергия, рассеиваемая за счёт демпфирования и трещинообразования в течение этого короткого периода, невелика по сравнению с общей поглощённой энергией деформации конструктивной системы. Однако следует также отметить, что после того, как конструкция деформируется, частоты колебаний уменьшаются, и первое колебание становится наиболее продолжительным. Следовательно, энергия, рассеиваемая за счёт демпфирования и трещинообразования до достижения максимальной реакции, больше при неупругих деформациях. Поэтому важно оценить влияние этого явления на максимальные динамические перемещения. В этой области было проведено довольно обширное исследование параметров повреждённых конструктивных систем для оценки влияния демпфирования на величину динамического перемещения [3, 15, 16].

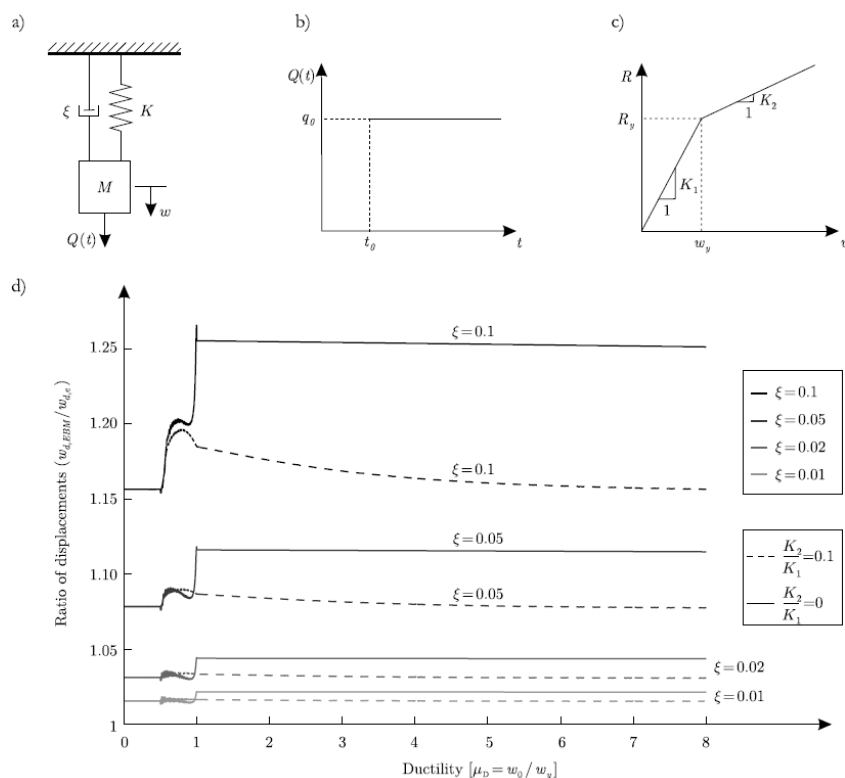
Важным недостатком, имеющим место при изучении влияния демпфирования при сценарии внезапного удаления колонны, является необходимость определения того, какой тип демпфирования лучше имитирует механизм рассеивания энергии для данной конструктивной системы в зависимости от конструктивного решения каркаса и его узлов. Специалисты обычно моделируют рассеиваемую энергию с помощью вязкостного демпфирования, которое связано со скоростью движения системы [5–7]. Однако существуют и другие подходы [7], такие как демпфирование по Кулону, которое связано с трением, а также такие, которые учитывают жёсткий контакт между элементами конструкции, например, соударение. Надо сказать, что разные модели следует выбирать для различных расчётных сценариев и конструкции каркасов.

В настоящем исследовании параметров использовали вязкостное демпфирование, применяемое в программном комплексе SAP 2000. Чтобы получить адекватную модель и более точно оценить влияние рассеиваемой энергии на максимальную динамическую реакцию системы, были проведены дополнительные исследования механизмов рассеивания при сценариях внезапного удаления колонны.

В предыдущем разделе было описано, что конструктивные системы с многими степенями свободы (MDOF), подверженные равномерно распределённой ступенчатой нагрузке, могут быть эффективно смоделированы как эквивалентные системы с одной степенью свободы. Для предварительного исследования параметров в работе [15] использовали простую эквивалентную модель, состоящую из билинейной системы с одной степенью свободы, подверженной ступенчатой нагрузке, с различными постоянными коэффициентами демпфирования ξ , как показано на рисунке 11. Основным преимуществом этой простой модели является возможность получения аналитических решений задачи и, следовательно, более точная оценка результатов, полученных методом энергетического баланса (EBM) с учётом этого допущения.

Рассматриваемыми переменными для этого простого параметрического исследования являются коэффициенты демпфирования ξ и отношение упругопластической жёсткости K_2 к упругой жёсткости K_1 (см. рисунок 11). Для коэффициентов жёсткости использовали верхнюю и нижнюю границы 10 % (для типичных конструктивных систем) и 0 % (чистое упругопластическое поведение) соответственно. Рассматривали различные коэффициенты вязкого демпфирования от 1 % до 10 %, как показано на рисунке 11d.

На рисунке 11d максимальные динамические перемещения при использовании метода энергетического баланса (EBM) $w_{d,EBM}$ (без учёта демпфирования) сравнивали с перемещениями, полученными с помощью аналитического решения с учётом демпфирования $w_{d,e,EBM}$ для более высоких значений коэффициента пластичности.



а) эквивалентная система с одной степенью свободы (SDOF); б) история пошагового нагружения; в) билинейная функция сопротивления; д) результаты, полученные при различных соотношениях жесткостей и коэффициентов демпфирования
Рисунок 11 – Параметрическое исследование влияния вязкого демпфирования на результаты вычисления динамического перемещения при использовании метода энергетического баланса [15, с. 3472]

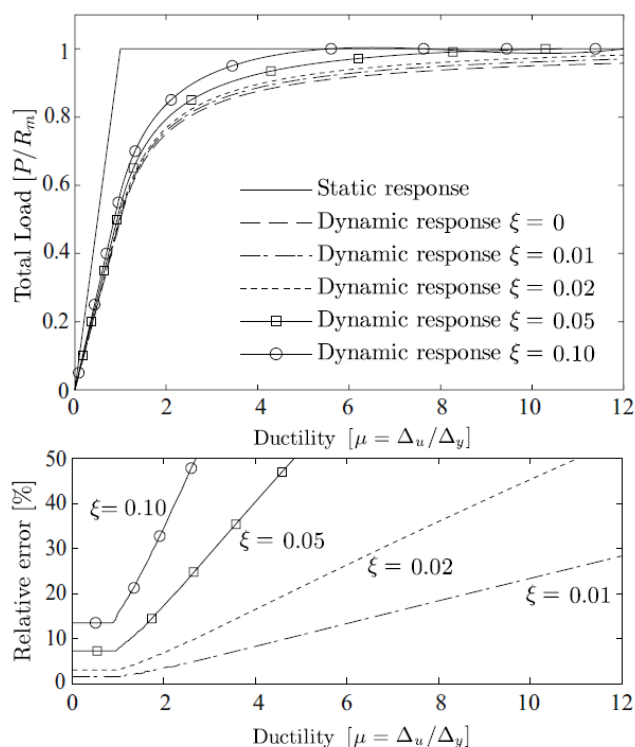


Рисунок 12 – К оценке влияния различных значений коэффициента демпфирования ξ на величину максимального динамического перемещения для системы с одной степенью динамической свободы согласно [15, с. 3472]

Из полученного отношения перемещений можно сделать дополнительные выводы. По сути, как и ожидалось, при увеличении коэффициента демпфирования результаты, полученные методом энергетического баланса (ЕВМ), *переоцениваются по экспоненциальной зависимости* и снижаются для больших значений коэффициента пластичности.

Чтобы получить верхнюю границу возможной относительной ошибки при использовании метода энергетического баланса (ЕВМ), в работе [15] была дополнительно исследована идеальная упруго-пластическая система с одной степенью свободы ($K_2/K_1=0$), аналогичная описанной на рисунке 11. Результаты этого анализа представлены на рисунке 12. На этом рисунке показана зависимость нелинейной статической и динамической реакции описанной системы от нагрузки и пластичности при различных коэффициентах вязкого демпфирования ξ , как и на рисунке 11.

Дополнительно было выполнено сравнение и установлены относительные ошибки моделирования квазидинамической реакции при различных значениях коэффициента демпфирования ($\xi = 0, 1, 5, 10\%$), применяемого при прямом нелинейном динамическом анализе железобетонной двухпролётного балочного фрагмента, описанного в разделе 2.2. Результаты расчётов при разных значениях коэффициентов демпфирования показаны на рисунке 13, а изменение относительной ошибки в зависимости от уровня нагрузки – на рисунке 14.

Как видно из графиков, показанных на рисунке 13, при коэффициенте демпфирования равного 1 % кривая динамической реакции тяготеет к кривой квазидинамической реакции и динамической реакции при коэффициенте демпфирования 0 %. Вместе с тем, при коэффициенте демпфирования равном 10 % динамическая кривая стремится к нелинейной статической реакции, что практически полностью исключает колебательный процесс. Близкий результат имеет место и при общепринятом для железобетона коэффициенте демпфирования 5 %.

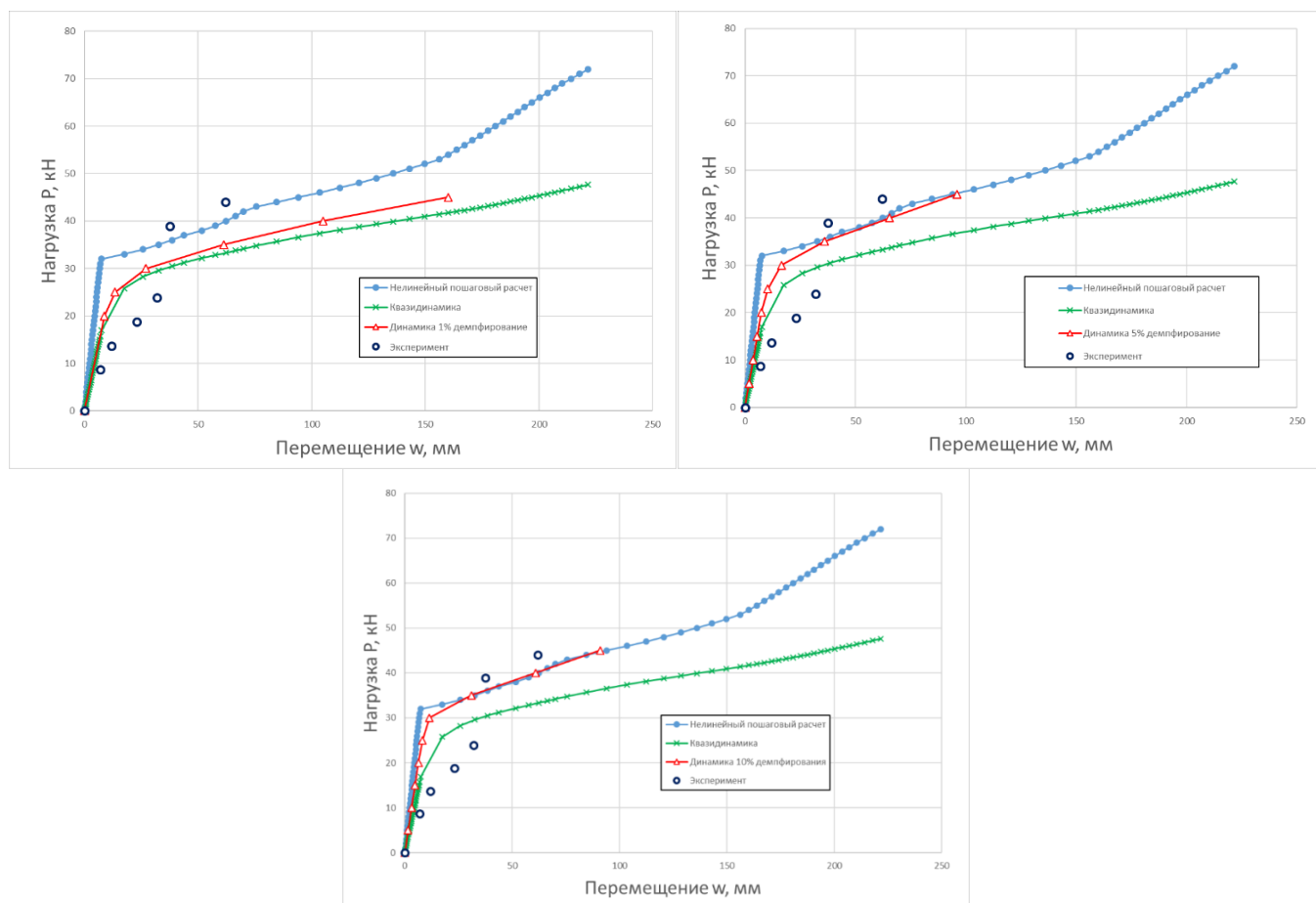


Рисунок 13 – Сравнение динамического расчета при различных коэффициентах демпфирования ($\xi = 1\%$, 5% , 10%) с нелинейным пошаговым и квазидинамическим расчетом согласно ЕВМ

Коэффициент демпфирования до 5% приводит к умеренной переоценке перемещений, при этом отклонение в оценке максимального динамического перемещения составляет около 10% . Более низкие значения коэффициентов демпфирования также приводят к меньшим различиям между результатами линейного упругого и пластического деформирования (значения коэффициента пластичности больше 1) в отношении перемещений. Кроме того, коэффициенты жёсткости не оказывают существенного влияния на результаты при умеренных ($1\text{--}5\%$) коэффициентах демпфирования.

С другой стороны, коэффициенты демпфирования выше 5% приводят к значительным переоценкам, из-за чего метод энергетического баланса (ЕВМ) в этой области даёт значительные отклонения от динамической реакции, которая даёт ненадёжный результат.

Из рисунков 12а и 13 видно, что динамические зависимости нагрузки от коэффициента пластичности для коэффициентов демпфирования до 5% очень похожи на те, что получаются при применении метода энергетического баланса ЕВМ (при $\xi = 0$). При увеличении коэффициентов демпфирования динамическая кривая отклика больше похожа на статическую кривую, особенно после образования пластических шарниров и достижения текучести в арматуре, и полностью соответствует статической кривой отклика при больших значениях коэффициента пластичности (от $\mu_0 = 6$ или $P/P_u = 0,9$ для $\xi = 10\%$).

На рисунке 12б показано, что во время упругой деформации влияние вязкого демпфирования довольно незначительно для большинства распространённых коэффициентов демпфирования в соответствии с результатами, представленными на рисунках 11, 14. Однако, как только конструкция переходит в неупругий режим, относительная погрешность увеличивается примерно линейно пропорционально коэффициенту пластичности системы или уровню действующей нагрузки.

Кроме того, относительные погрешности очень чувствительны к изменению коэффициента демпфирования ξ для нелинейных реакций. В то время как при коэффициенте демпфирования $\xi = 1\%$ относительные погрешности для значений коэффициентов пластичности от двух до четырех составляют менее 10% , то при коэффициенте демпфирования 5% погрешности превышают 20% . Эта тенденция сохраняется при увеличении коэффициента пластичности, уровня нагружения и коэффициента демпфирования. Следует подчеркнуть, что полученный результат показывает скорее *качественный характер* и требует дальнейшей проверки при выполнении сравнительного оценивания при имитационном моделировании реальных конструктивных систем. Необходимо отметить, что эти относительные погрешности, полученные в работе [3, 15] явно завышены, поскольку рассматриваемая нереалистичная идеальная упругопластическая система после достижения текучести и образования пластических шарниров даёт практически горизонтальные участки кривых динамического сопротивления (см. рисунок 12). Следовательно, для конкретного уровня нагрузки, превышающего нагрузку, соответствующую текучести арматуры (образования пластических шарниров), разница между прогибами при разных коэффициентах демпфирования может быть довольно большой, даже если кривые динамического отклика очень похожи, и стремится к бесконечности, когда участки кривых становятся полностью горизонтальными. Реальные конструктивные системы обладают некоторым запасом несущей способности после образования пластических шарниров, и поэтому сопротивление системы не падает резко после достижения текучести арматуры, в частности, когда реализуются мембранные/цепные эффекты, что не учитывается в идеализированной системе и хорошо видно для реального балочного фрагмента (см. рисунок 13). Таким образом, относительные погрешности максимальных перемещений, рассчитанных с помощью метода энергетического баланса (ЕВМ), из-за вязкостного демпфирования всегда меньше, чем те, что показаны на рисунке 12.

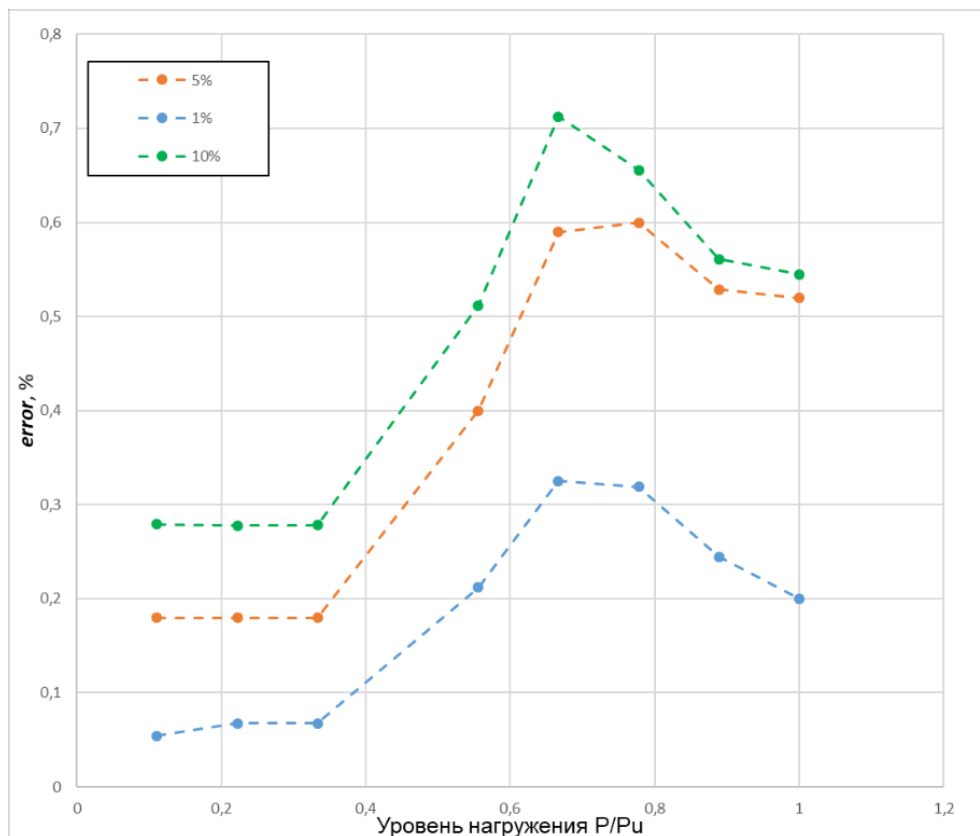


Рисунок 14 – Оценка ошибки моделирования для коэффициентов демпфирования 1 %, 5 %, 10 %

На рисунке 13 нанесены точки динамической несущей способности, полученные при испытании двухпролётного балочного фрагмента каркаса при внезапном приложении гравитационной нагрузки [12], описанного в разделе 2.2. По результатам выполненных испытаний были определены коэффициенты вязкого демпфирования (пользуясь формулой $\ln \frac{\delta_1}{\delta_4} = \frac{6\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$) для различных уровней нагружения.

Установлено, что при низких уровнях нагружения (до $0,5 P_u$) получены оценочные значения коэффициентов вязкого демпфирования от 4 % до 6 %, что даёт среднее значение $\xi = 0,5$, рекомендуемое нормами [19, 20] при проектировании железобетонных элементов, работающих с трещинами. Вместе с тем, для нагрузок, близких к предельным ($0,9 P_u$) коэффициент вязкого демпфирования составлял не менее $\xi \geq 10$ %. Полученные результаты испытаний при нагрузках, близких к предельным приближаются к кривой нелинейной статической реакции. Таким образом, кривая отклика, полученная методом энергетического баланса, практически полностью совпадающая с кривой динамического отклика при $\xi = 0$ является нижним пределом (границей) динамического сопротивления и даёт безопасный (консервативный) результат, тогда как кривая, полученная при коэффициенте демпфирования $\xi \geq 10$ % практически совпадает с кривой статического нелинейного анализа и существенно завышает несущую способность. При других значениях коэффициента вязкого демпфирования, кривые будут располагаться в интервале от $\xi = 0$ до $\xi \geq 10$ %.

В качестве промежуточного вывода, основанного на результатах представленных предварительных параметрических исследований, можно отметить, что метод энергетического баланса (EBM) должен давать приемлемые результаты с погрешностью менее 10 % при оценке максимальной динамической реакции повреждённой конструктивной системы, поскольку коэффициенты демпфирования

в строительной инженерии редко превышают 5 % (см. СН 2.01.01 [19] и СН 2.01.04 [20]), коэффициенты жёсткости составляют около 10 %, а значения коэффициентов пластичности не превышают 4. В любом случае, результаты данного параметрического исследования следует интерпретировать с осторожностью, поскольку было сделано несколько важных упрощений. Кроме того, это исследование основано на предположении о чистом вязкостном демпфировании, которое почти наверняка не соответствует этим сценариям, особенно в случае проверок живучести сборных конструкций с т. н. «сухими» стыками. Вместе с тем, при анализе была сознательно использована модель вязкого демпфирования, наиболее широко применяемая в вычислительных комплексах, в частности SAP 2000.

2.5 Влияние скорости деформации на свойства материалов

В общем случае свойства материалов, из которых выполнены элементы конструкции, зависят от скорости приложения нагрузки (деформации). Ожидается, что материалы, подвергающиеся высокой скорости деформирования, будут вести себя иначе, чем при статическом нагружении. Последнее допущение метода энергетического баланса (EBM) заключается в том, что *способность системы накапливать энергию деформации при заданном перемещении одинакова при статическом и динамическом нагружении*. Таким образом, метод энергетического баланса EBM не учитывает напрямую эффекты, связанные со скоростью деформации.

На свойства строительных материалов скорости деформирования влияют по-разному. Более того, скорости деформирования не являются постоянными ни во времени, ни в пространстве и зависят от большого количества параметров. Таким образом, для общего сценария непросто оценить, влияют ли они на общую динамическую реакцию конструктивной системы и насколько велика скрытая ошибка, связанная с игнорированием их влияния.

Общеизвестно, что более высокие скорости деформации обычно повышают прочность и жёсткость типичных строительных материалов. Метод энергетического баланса (EBM) игнорирует их влияние и обычно переоценивает максимальные динамические перемещения системы.

В последние годы были предложены различные эмпирические формулы, основанные на обширных экспериментальных исследованиях [18], связывающие скорость приложения нагрузки (деформации) со свойствами материала. Эти предложения были детально рассмотрены в нашей работе [13]. Таким образом, *их влияние можно напрямую включить в статическую реакцию системы с помощью законов, описывающих свойства материала*. Однако значения этих скоростей деформации необходимо рассчитывать для каждого конкретного случая отдельно.

Из решения, приведенного в работе [15] для конструкций, подвергающихся внезапному воздействию гравитационных нагрузок, скорость деформации обратно пропорциональна собственной частоте колебаний системы

$$\dot{\varepsilon} = -z_n \cdot \frac{Mg}{\Gamma K} \cdot \sqrt{\frac{K}{M}} \cdot \sin(\omega_1 t) = -\frac{gz_n}{\Gamma \omega_1} \cdot \sin(\omega_1 t). \quad (8)$$

Если рассматривать конкретную точку конструкции, то Γ , z_n и g являются постоянными величинами, и поэтому из этого вывода следует, что *чем больше частота собственных колебаний, тем меньше будет скорость деформации*.

Следовательно, для неупругих систем с малыми жёсткостями и собственными частотами колебаний скорости деформации выше, чем для более жёстких упругих систем, и поэтому погрешность метода энергетического баланса (ЕВМ) для первых выше. Более того, эта погрешность также выше для нелинейных реакций, поскольку накопленная энергия деформации, которая прямо пропорциональна погрешности, возрастает при увеличении значений коэффициента пластичности.

Несмотря на то, что этот вывод не вполне применим для обобщённых конструкций, на скорость деформации которых влияют ещё и другие параметры, разумно предположить, что эта зависимость справедлива для реальных конструкций и что, тем не менее, существует связь между скоростью деформации и частотой собственных колебаний для сценариев внезапного удаления колонны.

Количественная оценка влияния скорости деформации на поведение конструктивных систем, подверженных мгновенному удалению колонны, была проведена в ходе исследований для разных материалов и конструктивных решений [5]. Для железобетонных каркасных конструкций недавно было опубликовано всестороннее исследование по этой проблеме [18]. Результаты этого исследования подтверждают гипотезу о том, что скорость деформации выше при неупругом поведении, но все же ниже по сравнению с другими высоко динамичными сценариями, такими как удары и взрывы. Это исследование показывает, что влияние скорости деформации может играть важную роль в реакции конструкции, *незначительно* повышая динамическую несущую способность здания.

Заключение

Метод энергетического баланса (ЕВМ) обеспечивает получение приближенных, но всё же достаточно точных результатов для оценки динамических реакций конструкций, подверженных внезапному удалению колонн, с помощью кривой динамической (квазидинамической) несущей способности, которая не требует сложных процедур для её построения на основе нелинейной статической реакции.

Результаты параметрических исследований упрощённых систем, представленные в настоящей статье, можно использовать для оценки порядка величины ошибок при расчёте максимальных динамических реакций с помощью метода энергетического баланса (ЕВМ) и, опираясь на мнение инженера, оценить, приводит ли такой подход к приемлемым результатам для конкретной конфигурации конструкции.

Основываясь на описанных допущениях и упрощениях, метод конечных элементов, при помощи которого получают нелинейную статическую, а далее и квазидинамическую реакцию, переоценивает динамические эффекты нагрузок (ступенчатую нагрузку, степень свободы, демпфирование), поэтому всегда приводит к консервативным результатам. Эта характеристика является важным преимуществом, поскольку конструктор, использующий этот подход, знает, что полученные результаты более критичны, чем те, которые конструк-

ция продемонстрирует в реальности. Таким образом, инженер, использующий метод конечных элементов, обеспечивает конструктивной системе необходимый запас. Кроме того, этот подход содержит меньше неопределённостей при выполнении расчётов из-за меньшего количества параметров, необходимых для анализа. В этом отношении метод энергетического баланса (ЕВМ) является многообещающим простым подходом с высоким потенциалом в качестве альтернативы другим сложным методам анализа сценариев внезапного удаления колонн.

Список цитированных источников

- Xu, G. Q. An energy-based partial pushdown analysis procedure for assessment of disproportionate collapse potential / G. Q. Xu, B. R. Ellingwood // Journal of Constructional Steel Research. – 2011. – Vol. 67. – P. 547–555.
- Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part I: Simplified assessment framework / B. A. Izzuddin, A. G. Vlassis, A. Y. Elghazouli, D. A. Nethercot // Engineering Structures. – 2008. – Vol. 30. – P. 1308–1318.
- Herraiz, B. Energy-based method for sudden column failure scenarios: Theoretical, numerical and experimental analysis / B. Herraiz, T. Vogel, J. Russell // IABSE Workshop Helsinki 2015 : Safety, Robustness and Condition Assessment of Structures; International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE: Helsinki, Finland, 2015. – P. 70–77.
- Bredow, R. Computer analysis of dynamic reliability of some concrete beam structure exhibiting random damping / R. Bredow, M. Kaminski // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. – 2021. – Vol. 26, № 1. – P. 45–64.
- Quantification of model uncertainties of the energy-based method for dynamic column removal scenarios / L. Ding, Van R. Coile, W. Botte, R. Caspeele // Engineering Structures. – 2021. – Vol. 237. – P. 112057.
- Wang, C. H. Study on nonlinear damping behavior of damaged recycled aggregate concrete beams / C. H. Wang, J. Z. Xiao, C. F. Liang // Structural Concrete. – 2021. – Vol. 22. – P. 1429–1444. – DOI: 10.1002/suco.202000707.
- Charney, F. A. Unintended consequences of modeling damping in structures / F. A. Charney // Journal of Structural Engineering. – 2008. – Vol. 134. – P. 581–592.
- Hall, J. F. Problems encountered from the use (or misuse) of Rayleigh damping / J. F. Hall // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. – 2006. – Vol. 35. – P. 525–545.
- Hybrid Framework for Simulating Building Collapse and Ruin Scenarios Using Finite Element Method and Physics Engine / Z. Zheng, Y. Tian, Z. B. Yang, X. Z. Lu // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. – P. 4408.
- Russell, J. M. Experimental investigation on the dynamic response of RC flat slabs after a sudden column loss / J. M. Russell, J. S. Owen, I. Hajirasouliha // Engineering Structures. – 2015. – Vol. 99. – P. 28–41.
- Rate effect on the stress–strain behavior of concrete under uniaxial tensile stress / X. Gao, L. Zhou, X. Ren, J. Li // Structural Concrete. – 2020. – Vol. 22. – E815–E830. – DOI: 10.1002/suco.201900567.
- Yung Tian. Dynamic Response of Reinforced Concrete Beams Following Instantaneous Removal of Bearing Column / Tian Yung, Su Youpo // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2011. – Vol 5, No. 1. – P. 19–28.
- Тур, А. В. Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов при внезапном приложении нагрузки : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Андрей Викторович Тур ; Брест. гос. техн. ун-т. – Брест, 2012. – 225 с.
- Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях / В. И. Колчунов, Н. В. Ключева, Н. В. Андросова, А. С. Бухтиярова. – М. : ACB, 2014. – 208 с.
- Herraiz, B. Simplified approach for analysing building structures subjected to sudden column removal scenarios / B. Herraiz, T. Vogel // In Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EUROSDYN 2014 Porto, Portugal, 30 June – 2 July 2014 / A. Cunha, E. Caetano, P. Ribeiro, G. Müller. – Porto, 2014. – P. 3467–3474. – DOI: 10.3929/ethz-a-010261494.

16. Gomez, Borja H. Robustness of Flat Slabs Structures Subjected To a sudden Column Failure Scenario : dissertation : 23524 / Borja H. Gomez ; ETH Zurich, 2016.
17. Тамразян, А. Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений / А. Г. Тамразян // Железобетонные конструкции. – 2023. – Т. 3, № 3. – С. 62–74.
18. Живучесть зданий при особых воздействиях / В. И. Колчунов, В. В. Тур, Н. В. Федорова [и др.]. – М. : НИУ МГСУ, 2025. – 240 с.
19. Основы проектирования строительных конструкций : СН 2.01.01-2022. – Минск, 2022. – 65 с.
20. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 123 с.
9. Hybrid Framework for Simulating Building Collapse and Ruin Scenarios Using Finite Element Method and Physics Engine / Z. Zheng, Y. Tian, Z. B. Yang, X. Z. Lu // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. – P. 4408.
10. Russell, J. M. Experimental investigation on the dynamic response of RC flat slabs after a sudden column loss / J. M. Russell, J. S. Owen, I. Hajirasouliha // Engineering Structures. – 2015. – Vol. 99. – P. 28–41.
11. Rate effect on the stress–strain behavior of concrete under uniaxial tensile stress / X. Gao, L. Zhou, X. Ren, J. Li // Structural Concrete. – 2020. – Vol. 22. – E815–E830. – DOI: 10.1002/suco.201900567.
12. Yung Tian. Dynamic Response of Reinforced Concrete Beams Following Instantaneous Removal of Bearing Column / Tian Yung, Su Youpo // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2011. – Vol 5, No. 1. – P.19–28.
13. Tur, A. V. Soprotivlenie izгибаемых железобетонных элементов при внезапном приложении нагрузки : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Андрей Викторович Тур ; Брест. гос. техн. ун-т. – Брест, 2012. – 225 с.
14. Zhivuchest' zdaniy i sooruzheniy pri zaproektnykh vozdeystviyakh / V. I. Kolchunov, N. V. Klyueva, N. V. Androsova, A. S. Buhtiyarova. – M. : ASV, 2014. – 208 s.
15. Herraiz, B. Simplified approach for analysing building structures subjected to sudden column removal scenarios / B. Herraiz, T. Vogel // In Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2014 Porto, Portugal, 30 June – 2 July 2014 / A. Cunha, E. Caetano, P. Ribeiro, G. Müller. – Porto, 2014. – P. 3467–3474. – DOI: 10.3929/ethz-a-010261494.
16. Gomez, Borja H. Robustness of Flat Slabs Structures Subjected To a sudden Column Failure Scenario : dissertation : 23524 / Borja H. Gomez ; ETH Zurich, 2016.
17. Tamrazyan, A. G. Konceptual'nye podhody k ocenke zhivuchesti stroitel'nykh konstrukcij, zdaniy i sooruzhenij / A. G. Tamrazyan // Zhelozobetonnye konstrukcii. – 2023. – Т. 3, № 3. – С. 62–74.
18. Zhivuchest' zdaniy pri osobym vozdeystviyakh / V. I. Kolchunov, V. V. Tur, N. V. Fedorova [i dr.]. – M. : NIU MGSU, 2025. – 240 s.
19. Osnovy proektirovaniya stroitel'nykh konstrukcij : SN 2.01.01-2022. – Minsk, 2022. – 65 s.
20. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SP 5.03.01-2020. – Minsk : Minstrojarkhitektury, 2020. – 123 s.

References

1. Xu, G. Q. An energy-based partial pushdown analysis procedure for assessment of disproportionate collapse potential / G. Q. Xu, B. R. Ellingwood // Journal of Constructional Steel Research. – 2011. – Vol. 67. – P. 547–555.
2. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part I: Simplified assessment framework / B. A. Izzuddin, A. G. Vlassis, A. Y. Elghazouli, D. A. Nethercot // Engineering Structures. – 2008. – Vol. 30. – P. 1308–1318.
3. Herraiz, B. Energy-based method for sudden column failure scenarios: Theoretical, numerical and experimental analysis / B. Herraiz, T. Vogel, J. Russell // IABSE Workshop Helsinki 2015 : Safety, Robustness and Condition Assessment of Structures; International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE: Helsinki, Finland, 2015. – P. 70–77.
4. Bredow, R. Computer analysis of dynamic reliability of some concrete beam structure exhibiting random damping / R. Bredow, M. Kaminski // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. – 2021. – Vol. 26, № 1. – P. 45–64.
5. Quantification of model uncertainties of the energy-based method for dynamic column removal scenarios / L. Ding, Van R. Coile, W. Botte, R. Caspeele // Engineering Structures. – 2021. – Vol. 237. – P. 112057.
6. Wang, C. H. Study on nonlinear damping behavior of damaged recycled aggregate concrete beams / C. H. Wang, J. Z. Xiao, C. F. Liang // Structural Concrete. – 2021. – Vol. 22. – P. 1429–1444. – DOI: 10.1002/suco.202000707.
7. Charney, F. A. Unintended consequences of modeling damping in structures / F. A. Charney // Journal of Structural Engineering. – 2008. – Vol. 134. – P. 581–592.
8. Hall, J. F. Problems encountered from the use (or misuse) of Rayleigh damping / J. F. Hall // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. – 2006. – Vol. 35. – P. 525–545.

Материал поступил 25.08.2026, одобрен 25.08.2026, принят к публикации 25.08.2026

УДК 624.15:692.115

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВАНИЙ ФУНДАМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Н. Н. Шалобыта¹, П. С. Пойта², В. В. Тур³, Т. П. Шалобыта⁴

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 Д. т. н., профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: tur.s320@mail.ru

⁴ 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

Вопросы обеспечения надежности и долговечности зданий и сооружений традиционно занимают центральное место в геотехнической практике, поскольку любые деформации оснований фундаментов способны привести к серьезным эксплуатационным проблемам и значительным материальным потерям. В соответствии с действующим ГОСТ 27751-2014 [1] оценку надежности грунтового основания предписывается выполнять с использованием вероятностно-статистических методов, предполагающих наличие полной информации о распределениях случайных величин, характеризующих физико-механические свойства грунтов и внешние нагрузки. Однако реальная ситуация в области инженерно-геологических изысканий часто сопряжена с дефицитом исходных данных, ограниченным объемом испытаний и существенной пространственной изменчивостью параметров массива грунта, что делает прямое применение классических статистических подходов затруднительным или некорректным [4, 6].

Особую сложность представляет оценка надежности по критерию осадки, поскольку основание фундамента функционирует не изолированно, а как неотъемлемое звено единой механической системы «основание – фундамент – надземная конструкция», где взаимодействие элементов носит сложный нелинейный характер [4]. При этом в нормативной и методической литературе отсутствуют четкие практические рекомендации по выполнению вероятностных расчетов надежности для грунтовых оснований в условиях ограниченной статистической информации о свойствах грунтов и параметрах нагрузок [4]. Это обстоятельство существенно сдерживает внедрение риск-ориентированного подхода при проектировании и эксплуатации объектов капитального строительства. Грунты относятся к наиболее изменчивым из всех инженерных материалов, что делает их весьма восприимчивыми к вероятностной обработке, однако при ограниченных данных классические вероятностные методы уступают место альтернативным подходам, основанным на теории нечетких множеств и теории возможностей [6, 10, 11].

В связи с изложенным, целью настоящей работы является аналитический обзор существующих методов оценки надежности основания и фундаментов, применимых на стадии эксплуатации при неполных исходных данных [6, 13, 15]. Особое внимание уделяется сравнительной характеристике подходов, их преимуществам и недостаткам, а также возможностям адаптации для решения практических задач геотехнического мониторинга. Результаты обзора призваны обосновать выбор наиболее рациональных расчетных схем и способов учета неопределенности, что позволит повысить достоверность прогноза осадок и безопасность принимаемых инженерных решений.

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

ENSURING THE RELIABILITY REQUIREMENTS OF THE FOUNDATION BASE UNDER THE CONDITIONS OF THE UNCERTAINTY OF GEOTECHNICAL PARAMETERS

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

Abstract

Issues of ensuring the reliability and durability of buildings and structures traditionally occupy a central place in geotechnical practice, since any deformations of the foundation soil can lead to serious operational problems and significant material losses. In accordance with the current GOST 27751-2014 [1], the reliability assessment of the soil foundation is prescribed to be performed using probabilistic and statistical methods that assume the availability of complete information on the distributions of random variables characterizing the physical and mechanical properties of soils and external loads. However, the actual situation in the field of engineering geological surveys is often associated with a deficit of baseline data, a limited volume of testing, and significant spatial variability of the soil mass parameters, which makes the direct application of classical statistical approaches difficult or incorrect [4, 6].

Assessing reliability by the settlement criterion poses a particular challenge, since the foundation soil does not function in isolation, but as an integral link in a single mechanical system of "soil–foundation–superstructure", where the interaction of elements is of a complex, non-linear nature [4]. At the same time, the regulatory and methodological literature lacks clear practical recommendations for performing probabilistic reliability calculations for soil foundations under conditions of limited statistical information on soil properties and load parameters [4]. This circumstance significantly restrains the implementation of a risk-oriented approach in the design and operation of capital construction facilities. Soils are among the most variable of all engineering materials, making them highly susceptible to probabilistic processing; however, with limited data, classical probabilistic methods give way to alternative approaches based on fuzzy set theory and possibility theory [6, 10, 11].

In view of the above, the purpose of this work is to provide an analytical review of existing methods for assessing the reliability of foundations and footings, applicable at the operational stage with incomplete baseline data [6, 13, 15]. Special attention is paid to the comparative characteristics of the approaches, their advantages and disadvantages, as well as the possibilities of adaptation for solving practical problems of geotechnical monitoring. The results of the review are intended to justify the choice of the most rational design schemes and methods for accounting for uncertainty, which will increase the reliability of settlement forecasting and the safety of engineering decisions made.

Keywords: operational control, wastewater disposal systems, waste water, reinforced concrete structures, regulatory documents, technical condition assessment, forecasting, probabilistic methods, building reliability.

Введение

В рамках стратегии устойчивого развития оценке безопасности строительных сооружений на протяжении всего их жизненного цикла уделяется особое внимание. Основными причинами роста ответственности за безопасность зданий и сооружений являются:

- урбанизация и плотность застройки;
- сложность архитектурных форм и новые технологии возведения;
- изменение климата;
- антропогенные риски (наводнения, землетрясения, взрывы и т. д.);
- развитие и ужесточение требований нормативно-правовой базы;
- ужесточение уголовной и административной ответственности и др.

Все эти факторы оказывают влияние на несущие конструкции и фундаменты строительных сооружений, их оснований и требуют оценки их безопасности, выраженной в терминах конструкционной надежности.

В современных математических моделях, применяемых для проверок предельных состояний строительных конструкций получили развитие вероятностно-статистические методы расчетов надежности несущих конструкций для условий неполной информации о изменчивости контролируемых параметров. Применительно к основаниям фундаментов зданий и сооружений эти методы получили развитие и внедрение в практику в работах ряда исследований [1–8, 10, 12–17, 25, 34–36]. При этом практические методы проектирования оснований зданий и сооружений, изложенные, например, в СП 5.01.01-2023 [26], базируются на полувероятностном методе проверок предельных состояний, в котором используют частные коэффициенты безопасности, удобные для практических расчетов и имеющие вполне определенный смысл. В то же время раздельное определение и применение частных коэффициентов безопасности не позволяет учесть влияние всех факторов для оснований, а учитывает влияние только одного или нескольких, рассматривая их как стохастические, а другие – как детерминированные. При этом следует отметить, что для грунтовых оснований оценка частных коэффициентов безопасности чаще всего производится с применением традиционных подходов без учета особенностей применяемых методов экспериментальных исследований, действительной работы грунтов в основании и изменения их свойств во времени под действием внешних воздействий. При таком подходе важным является вопрос о количественной оценке вероятности безопасной работы основания с учетом реологических свойств грунтов.

Теория надежности оснований, основанная на вероятностных расчетах несущей способности и осадки основания под фундаментом строительного сооружения, охватывает проблемы, связанные как с учетом статистической изменчивости нагрузки, так и характеристик грунтов (т. е. изменчивостью их механических свойств в зависимости от влажности, плотности, температуры и т. д.) от которых в большой степени зависит несущая способность оснований фундаментов.

С точки зрения теории надежности, строительное сооружение – это механическая система, состоящая из трех элементов: основания, фундамента и надземной конструкции. Вероятность безотказной работы здания сооружения (P_c), как последовательной системы, определяется произведением вероятностей безотказной работы каждого элемента (P_i) [1]. В данном случае отказ одного из элементов может привести к отказу всей системы [5]. В многообразии работы элементов данной системы основание фундамента отличается тем, что его разрушение (постепенное или внезапное) часто приводит к непоправимому ущербу для всей системы.

1. Основная часть

1.1 Общие положения

Рассматривая расчётные методы оценки надежности элементов конструктивных систем зданий, следует отметить, что они в основном зависят от объема и точности статистической информации о контролируемых базисных переменных, входящих в математические модели, применяемые для проверки предельных состояний. Так, например, согласно стандарту ГОСТ 27751-2014 [1], расчет надежности фундаментов вероятностно-статистическим методом рекомендуется выполнять, если исходная статистическая информация о случайных величинах (параметрах/базисных переменных ма-

тематической модели предельного состояния) достаточна для их статистического анализа [12]. Однако, несмотря на наличие теории в целом, многие параметры случайных величин, рассчитанные различными способами, часто существенно отличаются друг от друга. Это связано, с одной стороны, как с экстраполяцией результатов, полученных в экспериментальных условиях, и их непосредственным использованием в условиях, отличающихся от опытных (без учета изменения напряженно-деформируемого состояния грунтов), так и с применением различных методов оценки влияния изменчивости свойств грунтов на несущую способность и деформативность основания.

Многие неопределенности прочностных и деформационных характеристик грунта и его моделей сопротивления с учетом действительных нагрузок, часто затрудняют оценку эффективности геотехнического проекта. В традиционных детерминистских подходах данные неопределенности не представлены явно и не включаются в расчётный анализ. В первую очередь при расчетах принимается модель, при которой назначается некоторый консервативный коэффициент безопасности (γ_F) на основе концепции «расчетного риска» [22, 23]. Данный подход к проектированию на основе применения частного коэффициента (γ_F) часто приводит к неэффективному проектированию с неизвестным и/или непостоянным уровнем безопасности.

Традиционный метод допускаемых напряжений (Allowable Stress Design (ASD)) долгое время доминировал при проектировании геотехнических сооружений. В общем случае применительно к грунтовым основаниям уравнение данного метода можно представить в следующем виде:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{j=1}^m Q_j} \geq FS_{req}, \quad (1)$$

где R_i – составляющие сопротивления (несущая способность, угол внутреннего трения и т. д.);

Q_j – составляющие нагрузки;

FS_{req} – нормативный (допускаемый) коэффициент запаса.

Анализ использования данного метода на протяжении многих десятилетий показал, что, по сути, все неопределенности в нагрузках, свойствах материалов, расчетных моделях «схлопываются» в единый коэффициент запаса, при этом расчет выполняется с использованием их характеристических (нормативных) значений без учета их статистической изменчивости. Имея значительные преимущества, такие как простота использования метода с единым коэффициентом запаса, который в подавляющем большинстве случаев назначается на основании многолетней практики проектирования, понятность / ясность, основанная на классических подходах при определении нагрузок и сопротивлений конструкции, апробированной на многолетнем опыте, имеет значительные недостатки. Главный из них – один и тот же коэффициент запаса, вне зависимости от вида воздействия и схемы работы, может соответствовать различным уровням надежности. Это приводит к ситуации, когда для разных расчетных ситуаций (например, различное соотношение постоянных и переменных нагрузок) реальная вероятность отказа резко возрастает. При этом так же необходимо отметить невозможность учета корреляции между нагрузкой и сопротивлением основания, что в геотехнике особенно актуально, ибо в конечном итоге в одних случаях приводит к излишнему запасу несущей способности, а в других, наоборот – к недостаточному.

Данный подход долгое время доминировал в проектировании геотехнических сооружений, однако периодически подчёркивалась важность метода частных коэффициентов. Так использование частных коэффициентов, как для нагрузок, так и для параметров прочности грунта было инициировано еще Хансеном [26] из Датского геотехнического института (DGI). Позднее формат частных коэффициентов безопасности был признан и официально внесён в нормы специалистами DGI [27], а позже и в нормы других Европейских стран. Однако необходимо отметить, что данный процесс был последовательным и для достижения более рациональной и последовательной оценки безопасности в ряде источников предлагалось использовать общий подход к проектированию, основанный на теории надежности (Reliability-Based Design (RBD)) [1–3, 5, 7, 28].

1.2 Проектирование с использованием подхода, основанного на теории надёжности (полностью вероятностный метод)

Подход к проектированию на основе положений теории надёжности (RBD), применительно к проектированию геотехнических конструкций часто реализуется с целевым индексом надёжности или вероятностью отказа, который определяется на основе анализа затрат и выгод, уравнивающих инвестиции и риск, с учетом вероятности и последствий отказа [28]. В концепции полностью вероятностного метода проектирования несущая способность конструкции (R) и воздействия (ΣQ_i) признаются случайными величинами, имеющими свои законы распределения вероятностей (чаще всего рассматривают нормальный закон распределения Гаусса или распределения экстремальных значений Гумбеля/Вейбулла). Функцию предельного состояния Z в этом случае можно записать следующим образом:

$$Z = R - \sum_{i=1}^m Q_i. \quad (2)$$

Если $Z > 0$ – конструкция безопасна, если $Z \leq 0$ – происходит отказ (разрушение или недопустимый прогиб). Поскольку R и S случайные величины, то и функция Z имеет свое распределение со средним значением μ_Z и среднеквадратическим отклонением σ_Z . Поэтому индекс надёжности β имеет следующую запись:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}. \quad (3)$$

Тогда вероятность того, что здание не разрушится $P_f = P(Z > 0)$, математически равна площади красной зоны на графике рисунка 1. Площадь неокрашенной части представляет вероятность отказа и напрямую связана с индексом β через функцию стандартного нормального распределения Лапласа (Φ):

$$P_f = \Phi(-\beta). \quad (4)$$

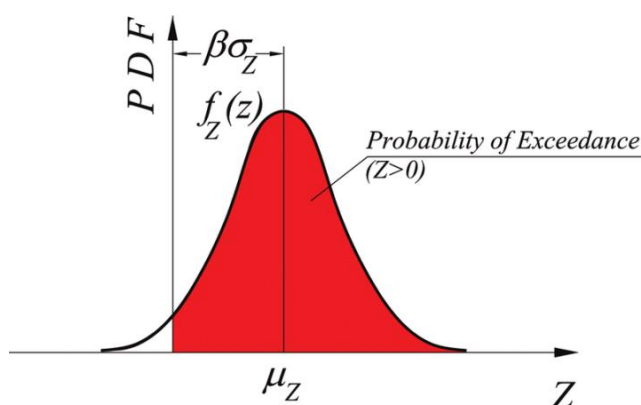


Рисунок 1 – Плотность распределения вероятности для функции состояния

В инженерной практике концепция проектирования, основанного на положениях теории надёжности (RBD) разделена на три уровня сложности [28, 32, 34]:

уровень III (полностью вероятностный). Нагрузки и сопротивления интегрируются как многомерные случайные процессы. Расчет выполняется численными методами (например, методом Монте-Карло);

уровень II (приближенный вероятностный). Сложные распределения заменяют эквивалентными нормальными распределениями. Для поиска индекса надёжности β используются упрощенные алгоритмы, такие как FORM (First-Order Reliability Method) или SORM (Second-Order Reliability Method);

уровень I (полувероятностный). Основанный на назначенных нормах фиксированными коэффициентами безопасности по нагрузкам и сопротивлению материалов при обеспечении установленного индекса надёжности $\beta = 3,8$ с вероятностью отказа $P_f \approx 7 \cdot 10^{-5}$. В рамках полувероятностного метода базисные пере-

менные определены с учётом их статистической изменчивости, а проверка предельных состояний сведена до проверки детерминистических неравенств вида $E_d \leq R_d$.

В контексте вероятностного подхода (RBD) характеристики геотехнической конструкции должны анализироваться с использованием вероятностных методов, которые явно учитывают неопределенности во входных параметрах и/или применяемых расчетных моделях. Несмотря на определенную исследованность вопросов по статистическим методам оценки физико-механических характеристик грунтов [5, 7, 22, 23, 24, 33, 34], до настоящего времени не удалось получить достоверные расчетные модели оснований зданий и сооружений и критерии их ошибок ввиду ограниченности данных. В связи со сложностью определения точной статистической характеристики параметров грунтов и ошибок моделирования на практике вероятностный подход (RBD) не нашел широкого применения в геотехнической практике.

1.3 Применение полувероятностного метода частных коэффициентов к проблемам геотехнического проектирования. Подходы к калибровке частных коэффициентов

1.3.1 Требования EN 1990 к проверкам предельных состояний

Учитывая проблемы, связанные с применением полностью вероятностного подхода, в современной практике проектирования, повсеместно используется подход, при котором для расчета назначаются фиксированные значения частных коэффициентов безопасности по нагрузкам и частных коэффициентов для сопротивления грунтового основания. Данный подход по своему построению и реализации является более простым вариантом вероятностного подхода (RBD).

Стандарт EN 1990 (CEN, 2002)[40] предлагает использовать формат частного коэффициента безопасности для расчета конструкций на основе концепции проектирования по предельным состояниям (Lime State Design – LSD), что по сути является практической реализацией уровня I (полувероятностного) метода. При этом условие метода LSD, в контексте частных коэффициентов, рассматривается следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{F,i} \cdot \psi \cdot Q_{k,i} \leq \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R \left\{ \eta_i \cdot \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}}; a_d \right\}, \quad (5)$$

где $\gamma_{F,i}$ – частный коэффициент эффекта отдельного воздействия;

ψ – коэффициент сочетаний для воздействия;

$Q_{k,i}$ – характеристическое значение воздействия;

γ_{Rd} – частный коэффициент, учитывающий неопределенность расчетной модели сопротивления, включая отклонения геометрических параметров (при необходимости);

$R \left\{ \eta_i \cdot \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}}; a_d \right\}$ – значение функции сопротивления, в котором:

$X_{k,i}$ – значение i -ой характеристики свойств материала и изделия;

$\gamma_{m,i}$ – частный коэффициент для характеристики свойства материала и изделия, учитывающий возможные неблагоприятные отклонения характеристики свойства материала или изделия от характеристического значения, а также случайную часть коэффициента преобразования η_i ;

a_d – значение геометрического параметра изделия.

1.3.2 Метод частных коэффициентов согласно EN 1997-1:2004 [41]

В рамках метода предельных состояний в стандарте EN 1997-1 (CEN, 2004) [41] предложены три подхода к проектированию геотехнических сооружений, в которых коэффициент сопротивления определяется либо свойствами материала, либо общим сопротивлением. Их предназначение – гарантировать, что расчетное значение воздействия (нагрузки) будет «опаснее» (обычно больше), а расчетное сопротивление – «безопаснее» (обычно меньше), чем их номинальные значения [40, 41].

Частные коэффициенты представлены следующими основными группами:

- коэффициенты для воздействий – $\gamma_{F,i}$;
- коэффициенты свойств грунтов – $\gamma_{m,i}$;
- коэффициенты для сопротивления – $\gamma_{R,i}$.

Используются в расчетах характеристики грунта имеют их расчетные значения.

При геотехническом проектировании предложены следующие подходы [40]:

- DA–1. Производится проверка по двум комбинациям частных коэффициентов:
 - коэффициентом к нагрузкам;
 - коэффициентам к свойствам грунта.
- DA –2. Производится проверка по коэффициентам к нагрузкам и итоговому сопротивлению грунта.
- DA–3. Производится проверка по коэффициентам к нагрузкам и к свойствам грунта.

Выбор конкретного подхода и значения коэффициентов определяется Национальным положением (National Annex) каждой страны.

Основные факторы изменчивости и неопределенности базисных переменных, влияющие на геотехническое проектирование, представлены на рисунке 2. Цель геотехнического проектирования –

управление рисками и неопределенностями при сохранении приемлемого уровня надёжности для типовых конструкций. Это также является целью применения метода частных коэффициентов в стандарте EN 1997-1:2004 [41], как и любой другой методологии проектирования, основанной на оценке рисков. Таким образом, требования стандарта EN 1997-1:2004 направлены на достижение целевого уровня надёжности с использованием расчётных значений, полученных путём применения системы частных коэффициентов к характеристическим значениям сопротивлений (R) и нагрузок (E). Расчетные значения сопротивления (R_d) получают путем деления их характеристических значений (R_k) на частный коэффициент (γ_R). Частный коэффициент γ_R калибруют для обеспечения заранее заданного целевого уровня надёжности (β_T). Для сопротивления $R(X_1, X_2, \dots, X_n)$ расчётные значения геотехнических параметров, входящих в расчётную модель сопротивления, определены в стандарте EN 1997-1:2004 традиционным способом:

$$X_d = X_k / \gamma_M, \quad (6)$$

где X_k — характеристическое значение геотехнического параметра;

γ_M — частный коэффициент для конкретного геотехнического параметра, учитывающий также неопределённости и отклонения от заданных параметров модели [51].

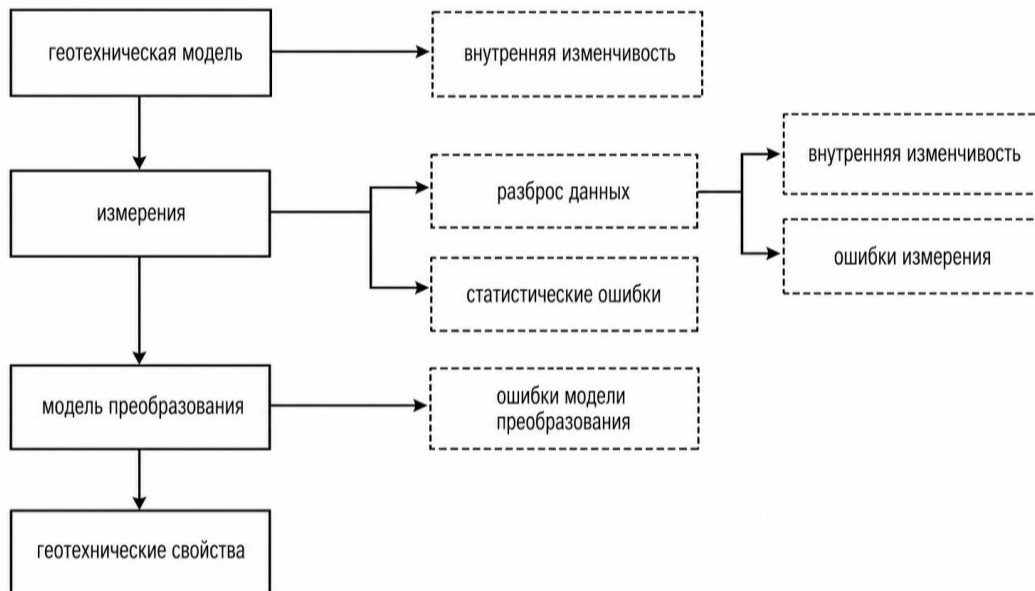


Рисунок 2 – Классификация изменчивости и ошибок оценивания геотехнических параметров [51]

Следует отметить, что здесь основное внимание уделяется неопределённости, связанной с геотехническими параметрами, хотя отклонения от заданных размеров модели грунта могут иметь большее значение, чем любые отклонения от геотехнических параметров.

Согласно [41], частные коэффициенты и связанные с ними неопределённости дополнительно описаны в стандарте EN 1990 [40] и СН 2.01.01 [49]. Взаимосвязь между отдельными частными коэффициентами представлена формулой $\gamma_M = \gamma_{Rd} \times \gamma_m$, где γ_{Rd} и γ_m — частные коэффициенты, учитывающие неопределённости в модели сопротивления и свойства материала или изделия соответственно. Согласно нормам EN 1990 и СН 2.01.01, последний коэффициент должен учитывать «возможность неблагоприятного отклонения свойств материала или изделия от его характеристического значения», т. е. при калибровке частного коэффициента γ_m следует учитывать неопределённость свойств материала. На основе преобразования в стандартное нормальное пространство (рисунок 3) можно выразить в общих терминах частный коэффициент

γ_m для любого геотехнического параметра, например, угла внутреннего трения или сопротивления сдвигу, предполагая нормальное и/или логнормальное распределение, соответственно:

$$\gamma_M = \frac{X_k}{X_d} = \frac{X_k}{X_m \times (1 - \alpha \cdot \beta_T \cdot COV)} \rightarrow N; \quad (7)$$

$$\gamma_M = \frac{X_k}{X_d} = \frac{X_k}{X_m \times \exp(-\alpha \cdot \beta_T \cdot COV)} \rightarrow LN, \quad (8)$$

где X_m — среднее значение;

X_k — характеристическое значение геотехнического параметра, определяемое в соответствии с нормативным документом;

α — коэффициент чувствительности метода надёжности первого порядка (FORM);

COV — коэффициент вариации свойств материала или изделия, который, по мнению разработчика нормативного документа, обеспечивает необходимый уровень безопасности в типичной расчётной ситуации.



Рисунок 3 – Взаимосвязь между средними характеристическими и расчетными значениями

В стандарте EN 1997-1 [41] неопределённость, учитываемая в γ_M (через γ_M), не является вопросом, который должен решать практикующий инженер-геотехник. Этим вопросом занимается разработчик норм и правил в каждом национальном органе по стандартизации. Примечательно, что в стандарте EN 1997-1 предусмотрено фиксированное значение γ_M , при этом калибровку γ_M выполняют при составлении национального приложения. Тем не менее, при выборе γ_M для конкретного геотехнического параметра следует учитывать типичную изменчивость этого параметра в пределах каждой страны, входящей в систему Еврокодов, из-за разнообразия геологических условий, проектных ситуаций и местных особенностей. Однако тот факт, что γ_M фиксировано, по мнению авторов, вызывает беспокойство, поскольку один частный коэффициент вряд ли обеспечит одинаковый уровень надежности, если диапазон вариативности/изменчивости конкретного геотехнического параметра слишком широк.

1.3.3 Характеристические значения геотехнических параметров в соответствии с Еврокодом 7

1.3.3.1 Неопределённости, учитываемые с помощью 5-процентного квантиля

Любой квантиль может учитывать неопределённости при оценке геотехнических свойств. Однако важно отметить, что именно базовая функция плотности вероятности (PDF), на основе которой рассчитывается квантиль, содержит информацию о вариативности/изменчивости базисной переменной X . Однако в геотехнической литературе статистические данные о неопределённостях, которые влияют на функцию плотности вероятности (PDF), приводятся крайне редко. Вместо этого в стандарте EN 1997-1 [41] и сопутствующих руководствах к Еврокодам приводится список неопределённостей и других факторов (пункт 2.4.5.2(4) Р), которые должны учитываться в характеристическом значении X_k . На практике инженерам необходимо понимать концепцию выбора значения геотехнического параметра, определяющего предельное состояние, которое может быть превышено лишь в 5 % случаев. При таком подходе неопределённости и другие факторы, перечисленные в пункте 2.4.5.2 (4) Р [41], в значительной степени рекомендовано учитывать на основе предыдущего опыта. Следовательно, можно задаться вопросом: «Понимают ли инженеры, какие неопределённости учитываются при расчёте 5-процентного квантиля прочности?»

Несмотря на то, что консервативность, обеспечиваемая 5-процентным квантилем, может способствовать повышению безопасности конструкции, этот конкретный предел выбран по традиции (по соглашению специалистов) и для того, чтобы соответствовать другим инженерным дисциплинам.

Со статистической точки зрения в определении X_k (пункт 2.4.5.2(2)Р [41]) фраза «значение, определяющее появление предельного состояния» по сути означает, что при выборе X_k необходимо учитывать как минимум две проектные ситуации. Следовательно, согласно пункту 2.4.5.2 (2) Р [41]:

«(7) Зона грунта, определяющая поведение геотехнической конструкции в предельном состоянии, обычно намного больше, чем опытный образец или зона грунта, на которую воздействуют при испытаниях *in situ*. Следовательно, значение определяющего параметра часто является средним арифметическим диапазоном значений, охватывающего большую площадь или объем грунта. Характеристическое значение должно быть осторожной оценкой этого среднего арифметического»;

«(8) Если поведение геотехнической конструкции в предельном состоянии определяется наименьшим или наибольшим значением свойства грунта, характеристическое значение должно быть осторожной оценкой наименьшего или наибольшего значения, характерного для зоны, определяющей поведение конструкции».

В последнем случае (который соответствует локальному разрушению, при котором появление предельного состояния зависит от небольшого объема грунта) значение X_k следует выбирать как 5-процентный квантиль функции плотности вероятности, отражающей вариативность/изменчивость переменной X . В первом случае (который соответствует глобальному разрушению, при котором предельное состояние определяется большим объемом грунта) значение X_k выбирают с доверительной вероятностью 95 % на основе

среднего значения X_m , рассчитанного на основе выборочных значений X (обратите внимание, что это определение также соответствует 5 %-ному квантилю функции плотности распределения вероятности среднего X_m). В отличие от расчетной ситуации, описанной в (8), ситуация, описанная в (7), предполагает, что среднее значение может быть рассчитано на основе данных исследований, проведенных в пределах соответствующего объема грунта [50]. Графическое изображение X_k представлено на рисунке 4.

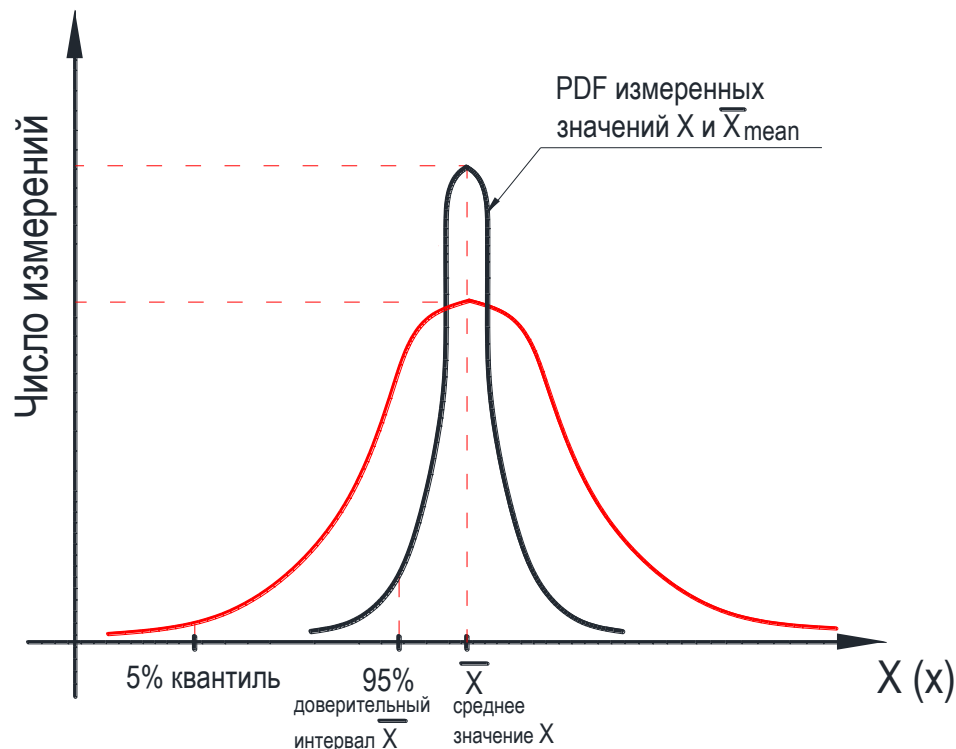


Рисунок 4 – Неопределенности оценивания геотехнических параметров [51]

Следует отметить, что геотехнический параметр – это, по сути, упрощенное представление сложной нелинейной зависимости напряжений и деформаций. Таким образом, помимо рекомендаций, приведенных в (7) и (8), фраза «значение, определяющее появление предельного состояния» предполагает, что инженер-практик понимает роль геотехнического параметра в конкретном предельном состоянии. Примечательно, что требуемый уровень знаний инженера-геотехника определяется в стандарте EN 1997-1 [41] предположениями, изложенными в пункте 1.3 (2), согласно которым «данные, необходимые для проектирования, собирает, фиксирует и интерпретирует соответствующим образом квалифицированный персонал».

1.3.3.2 Неопределенности, возникающие в процессе вычисления 5-процентного квантиля

Если разрушение происходит в небольшом объеме грунта, оно с большей вероятностью произойдет в основном в локально слабых грунтах. В то же время, если разрушение происходит в большом объеме грунта, оно может произойти как в локально слабых, так и в прочных грунтах. Таким образом, решение о том, можно ли считать тот или иной отказ незначительным или серьезным, во многом зависит от структуры автокорреляции грунтов, то есть от масштаба флуктуаций. Различие между незначительными (локальными) и серьезными (нелокальными) отказами, по сути означает, что вклад внутренней изменчивости уменьшается за счет пространственного усреднения [51]. Таким образом, эти проектные ситуации могут представлять собой крайние случаи с точки зрения влияния внутренней изменчивости на расчет: в одном случае неопределенность, связанная с внутренней изменчивостью, не снижается из-за малого пространственного охвата основного отказа, влияющего на зону, по сравнению с масштабом изменений, а в другом – неопределенность, связанная с внутренней изменчивостью, снижается полностью.

1.3.4 Требования к обеспечению надежности при геотехническом проектировании согласно Северо-американским нормам (Канада и США)

В Канаде Национальный строительный кодекс (NBC) (NRCC и NRCC, 1977 г.) [37] принял формат расчета, аналогичный европей-

скому формату в отношении сочетаний нагрузок, но отличающийся в отношении сопротивлений. Позже в Канадском руководстве по инженерному проектированию (CFEM) (CGS, 1992) [37, 38] сначала предложили использовать частные коэффициенты к сопротивлению, но затем перешли к общему коэффициенту сопротивления CFEM (CGS, 2006), чтобы соответствовать Канадскому кодексу проектирования автомобильных мостов (CHBDC) (CSA, 2006, 2019) [40]. В то время как европейский формат применяет частные коэффициенты к прочности материалов, формат канадских норм применяет глобальный коэффициент к уровню общего сопротивления. При этом следует отметить, что во всех перечисленных нормах в геотехническом проектировании вопросу формата проектирования практически не уделялось никакого внимания.

При всех положительных качествах метода предельных состояний, обеспечивающего необходимую безопасность в целом, он не дает прямого ответа на вопрос о количественном значении вероятности отказа конструкции.

В отличие от многих европейских стран и стран постсоветского пространства в США Равиндра и Галамбос [43] предложили собственный более простой инженерный формат проектирования для реализации метода проектирования, основанного на теории надежности (RBD) в контексте метода предельных состояний, а именно, предложили метод Load and Resistance Factor Design (LRFD), в котором частный коэффициент применяется к уровню полного сопротивления. В общем случае уравнение метода имеет следующий формат:

$$\phi \cdot \sum_{i=1}^n R_i \geq \sum_{j=1}^m \gamma_j \cdot Q_j, \quad (6)$$

где ϕ – общий/глобальный коэффициент сопротивления ($0 < \phi < 1$);

γ_j – частный коэффициент для нагрузки.

Одной из концепций, при применении метода LRFD для проектирования фундаментов и оснований, является уточнение номинальных значений неопределенных входных параметров (сопротивление материала и действующих нагрузок) на основе калибровки частных коэффициентов безопасности. Используемые в методе частные коэффициенты безопасности по нагрузкам и по материалу, откалиброваны для достижения целевого показателя надежности примерно в диапазоне сценариев проектирования, охватываемых нормами.

В случае отсутствия данных о частных коэффициентах на практике может использоваться консервативная оценка, основанная на оценке среднего значения, с учетом коэффициента вариации [16, 41] или на основе опыта проектировщика. При этом на практике проектировщики для решения задачи геотехнического проектирования используют частные коэффициенты, указанные в нормах [37, 38, 39, 41, 42, 49] считая, что основная проблема проектирования заключается в правильном выборе характеристических значений неопределенных параметров (сопротивлений и нагрузок). Однако уровень изменчивости параметров грунтов часто не может быть определен количественно из-за пространственной изменчивости и/или ограниченной доступности данных [43, 44]. Таким образом, выбор номинальных значений параметров грунта, необходимых в существующем подходе метода LRFD, является весьма неопределенным или субъективным. Учитывая неопределенный характер выбора номинальных значений используемых параметров, прогнозируемые характеристики конструкции, основанные на анализе LRFD, будут тоже неопределенными. Поэтому в большинстве случаев, учитывая неопределенности прогнозируемых характеристик, проектировщики отдают предпочтение консервативным методам расчета, даже зная что они будут являться экономически неэффективными, но, по крайней мере, безопасными.

Применение модели LRFD идентично подходу к проектированию на основе общего/глобального коэффициента безопасности, включающего интерактивную корректировку геометрии и других параметров проектирования до тех пор, пока не будет достигнут экономичный эффект, удовлетворяющий требованиям безопасности. Однако стандартный подход метода по LRFD, включающий фиксированные частные коэффициенты, не может охватить все сценарии проектирования, включающие различные уровни изменения параметров грунта и ошибок моделирования, что в конечном итоге может привести к отклонению конструкции от целевого показателя надежности на неизвестную величину, скорее всего, в консервативную сторону [19, 25, 43, 44]. Данный недостаток хорошо известен (например, [23, 25, 33, 43, 45]), в связи с чем, рядом исследователей были сделаны предложения по усовершенствованию подходов, основанных на методе LRFD, с уточненными частными коэффициентами [18–21, 43, 44, 45, 46].

В развитии метода LRFD Phoon [19, 44] для геотехнических сооружений предложил новый формат проектирования – расчет с несколькими коэффициентами сопротивления Multiple Resistance Factor Design (MRFD) – с различными частными коэффициентами для материалов, что особенно важно, когда их статистические характеристики сильно различаются (например, угол внутреннего трения и удельное сцепление):

$$\sum_{i=1}^n \phi_i \cdot R_i \geq \sum_{j=1}^m \gamma_j \cdot Q_j, \quad (7)$$

где ϕ_i – частные коэффициенты для каждой базисной переменной, входящих в модель сопротивления (например, отдельно для несущей способности по грунту и по материалу конструкции фундаментов).

Данный подход может обеспечить большую согласованность в результатах, просто потому, что в нем используется более одного частного коэффициента безопасности. Однако ввиду сложности калибровки нескольких коэффициентов одновременно, данный метод в настоящее время используется только в исследовательских работах.

В современной геотехнической практике выделяется несколько реализаций метода LRFD, которые отражают разные подходы в его применении:

- стандартный (нормированный) метод LRFD. Главным отличительным признаком этого метода является использование фиксированных (табличных) значений частных коэффициентов сопротивления, зависящих от вида грунта, метода расчета несущей способности и результатов полевых испытаний.

Это наиболее распространенная форма метода, закрепленная в строительных нормах, таких как американский стандарт AASHTO LRFD [39] или канадский CHBDC [37, 38].

- Метод LRFD с адаптивными частными коэффициентами. В данном подходе реализуется идея привязки значений частных коэффициентов сопротивления к объему и качеству проверенных испытаний.

- Вероятностная калибровка частных коэффициентов метода LRFD. Это научно-обоснованный подход определения коэффициен-

тов (ϕ_i и γ_j), основанный на их калибровке с использованием методов теории надежности первого порядка FORM (First-Order Reliability Method), или симуляций метода Монте-Карло (MCS) с целью подбора таких значений коэффициентов, которые при различных расчетных ситуациях обеспечивают заданный уровень безопасности. Калибровку частных коэффициентов выполняют, как правило, методом наименьшего спуска.

Учитывая вышеизложенное, следует отметить, что во всех перечисленных нормах применительно к геотехническому проектированию вопросу формата безопасности при проектировании практически не уделяется никакого внимания.

Для калибровки частных коэффициентов используется несколько методов, в той или иной степени основанных на назначаемых (целевых) значениях индексов надёжности. В зависимости от того, в какой степени учитываются те или иные параметры, методы калибровки на основе надёжности также можно разделить на разные уровни сложности.

Одним из первых методов калибровки частных коэффициентов для геотехнических проблем выступает чисто инженерный (интуитивный) или метод экспертных оценок. На геотехнической площадке группа экспертов, обладающих большим опытом проектирования, может непосредственно определить коэффициенты, применяемые к нагрузкам и сопротивлениям. В этом случае проект может соответствовать требованиям безопасности и при этом быть экономически эффективным. Однако частные коэффициенты, откалиброванные таким образом, ограничены локальными условиями и, как правило, соответствуют условиям расчета метода допускаемых напряжений и метода предельных состояний в его упрощенном формате – LRFD. На основе уравнений (1) и (6) частный коэффициент сопротивления можно вычислить как

$$\phi = \frac{\sum_{j=1}^m \gamma_j \cdot Q_j}{FS_{req} \cdot \sum_{i=1}^n R_i}. \quad (8)$$

В данном случае частные коэффициенты для нагрузок принимаются сначала непосредственно по действующим нормам, а затем вычисляется общий коэффициент сопротивления материала. Очевидно, что результаты проектирования с использованием коэффициентов, откалиброванных этим методом, незначительно будут отличаться от результатов, полученных прямым использованием метода допускаемых напряжений.

Однако данный метод не в полной мере можно отнести к вероятностно-статистическим методам в чистом виде, поэтому далее рассмотрим наиболее часто используемые.

К первому уровню сложности можно отнести – метод первого порядка второго момента (First-Order Second-Moment). Он предполагает, что нагрузки и сопротивление являются статистически независимыми случайными величинами с известными средними значениями и дисперсиями, подчиняющиеся нормальному закону распределения, а сама функция состояния системы (Z) нелинейна. Данный метод является аналитическим вероятностным методом, используемым для оценки надежности систем с учётом неопределенностей. В его основе лежит разложение в ряд Тейлора первого порядка и использование только первых двух статистических моментов (математического ожидания и дисперсии) входных случайных величин. Метод FOSM позволяет найти среднее значение и дисперсию выходного параметра без проведения имитационных испытаний (например, метод Монте-Карло). Поэтому исходя из общих уравнений метода, частный коэффициент к сопротивлению для нормального распределения можно вычислить по формуле

$$\phi = \frac{\lambda_R \cdot \sum_{j=1}^m \gamma_j \cdot Q_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_Q \cdot Q_j + \beta_T \cdot \sqrt{\sigma_R^2 + \sum_{j=1}^m \sigma_{Q_j}^2}}, \quad (9)$$

где λ_R и σ_R , а так же λ_Q и σ_Q – соответственно, коэффициенты смещения (определяемые как отношение номинального значения к среднему) и стандартное среднеквадратичное для R_i и Q_i ; β_T – целевой индекс надёжности, вычисляемый как

$$\beta_T = \Phi^{-1}(1 - P_f); \quad (10)$$

Φ – функция распределения стандартного нормального распределения;

P_f – целевая вероятность отказа.

Однако, несмотря на простоту метода (инженерам можно выполнить калибровку без глубоких знаний статистики и теории вероятностей) недостатком является то, что вычисленный коэффициент ϕ – является лишь приближением, поскольку он пренебрегает статистическими характеристиками более высоких порядков [29, 30, 31]. Кроме того, метод FOSM имеет недостаток, связанный с инвариантностью индекса надёжности. Например, рассматривая функцию предельного состояния Z с учетом выражения (2) и рассматривая выражение той же функции состояния в записи $Z = \frac{R}{\sum \sigma_i}$ имеем различные значения индекса надёжности β и, следовательно, разные результаты проектирования.

С целью решения проблемы инвариантности в инженерном анализе широко используют вероятностный метод оценки надёжности конструкций – FORM (First-Order Reliability Method), или метод надёжности первого порядка. В соответствии с [47, 48] коэффициенты нагрузок и сопротивлений для закона нормального распределения можно определить следующим образом:

$$\phi_j \text{ (или } \gamma_j) = \frac{x_j^*}{\mu_{x_j}} = 1 + \alpha_j \cdot \beta_T \cdot COV_{x_j}, \quad (11)$$

где ϕ_j и γ_j , соответственно частные коэффициенты к сопротивлению и нагрузкам;

x_j^* – значение определяемой случайной величины;

μ_{x_j} – среднее значение;

COV_{x_j} – коэффициент вариации.

Данный метод может обеспечить точный индекс надёжности только при соблюдении определенных правил и допущений. Однако в сложных ситуациях, где преобладают законы распределения случайной величины, отличные от нормального распределения согласованная вероятность отказа не гарантируется. Поэтому чаще всего используется моделирование методом Монте-Карло, со следующим алгоритмом: сначала проводится полное моделирование на основе теории надёжности для достижения желаемого целевого индекса надёжности β_T , а затем при заданных частных коэффициентах безопасности нагрузкам и β_T определяются коэффициенты сопротивления материалов и корректируются до тех пор, пока результаты проектирования не совпадут с полученными на первом этапе. Хотя этот метод даёт более точные результаты, у него есть два недостатка: во-первых, целевой индекс надёжности β_T напрямую влияет на откалиброванные коэффициенты сопротивления, а во-вторых, калибровка занимает значительно большее время.

1.4 Проблемы, связанные с малым размером выборки

В настоящее время для формулирования статистических выводов на основе ограниченных выборок результатов применяют Байесовский подход, рекомендованный, в том числе, и СН 2.01.01. Байесовское определение вероятности обычно называют подходом, основанным на степени уверенности, то есть вероятности отражающей степень уверенности в исходе. В то же время частотное определение вероятности исхода – это его относительная частота появления. Таким образом, это определение касается характеристики изменчивости измеренных данных или наблюдаемых явлений. Кроме того, байесовский подход позволяет обновлять априорную информацию в виде экспертных знаний (то есть субъективных суждений) по мере поступления дополнительной информации. С байесовской точки зрения имеет смысл проводить проектирование на основе надёжности (как на уровне II, так и на уровне III), даже если доступны лишь небольшие выборки данных. Как будет показано в этом разделе, существование «проклятия малой выборки» не очевидно, особенно в байесовском выводе.

В инженерно-геологических изысканиях малый размер выборки создает проблемы при частотном подходе к статистическим выводам. При частотном подходе можно с уверенностью делать статистические выводы на основе повторяющихся событий, когда неопределенность обусловлена случайностью [40]. Однако при отсутствии значительного количества измерений и когда неопределенность также обусловлена недостатком знаний (как в инженерно-геологических изысканиях), частотный подход может оказаться неприменимым. В данном случае, для статистического анализа на основе небольших выборок геотехнических данных применяют байесовский метод [40]. Однако, судя по всему, существуют трудности с внедрением байесовских методологий в действующие нормативные документы. Эти трудности могут быть связаны с отсутствием согласованности между детерминированными методологиями проектирования и проектированием и в том числе на основе надёжности. Таким образом, может ли отсутствие согласованности между методом частных коэффициентов в стандарте EN 1997-1 [41] и проектированием на основе надёжности быть следствием спора между специалистами, применяющими частотный и байесовский подходы к статистике?

Вопрос в том, какой из этих подходов следует применять в инженерно-геологических изысканиях и геотехническом проектировании, до сих пор недостаточно обсуждался в инженерно-геологическом сообществе. Это приводит к общей путанице в понимании разницы между этими подходами. Ниже мы рассмотрим плюсы и минусы байесовского и частотного подходов в инженерно-геологических изысканиях и геотехническом проектировании, учитывая общую нехватку знаний из-за малого количества измерений.

Поскольку геотехническое проектирование обычно начинается с общего недостатка знаний или фактических данных о геотехнических условиях, требуются определенные меры для достижения неопределенности приемлемого уровня. Другими словами, для получения надежного характеристического значения X_k действительно требуется достаточное количество образцов (т.е. геотехнических измерений на площадке и лабораторных испытаний). Таким образом, вопрос о том, как провести достаточное количество геотехнических изысканий на строительной площадке, остаётся открытым на протяжении ряда лет. Авторы [51] используют классический частотный подход для определения необходимого размера выборки с помощью доверительных интервалов. Частотный подход также используется в Еврокоде 7, в котором характеристическое значение свойства X_k рассчитывается на основе интервала, который с 95-процентной вероятностью содержит фактическое значение (т.е. доверительный интервал) или 5-процентный квартиль. С точки зрения частотного подхода, X_k считается стохастической величиной во времени. То есть, когда на более позднем этапе проектирования добавляются новые измерения, X_k может быть пересмотрено, хотя в любой момент времени существует только одно истинное значение X_k и нет никакой неопределённости. Примечательно, что частотная интерпретация может позволить определить, является ли значение X статистически значимым, на основе анализа проведенных измерений. Однако для этого потребуется достаточное количество выборок, чтобы проанализировать изменчивость X и определить X_k , а затем x_d по уравнению (12).

$$x_d = \frac{x_k}{\gamma_M}, \quad (12)$$

В отличие от этого, байесовский подход позволяет использовать недостаток знаний при анализе X (априорную неопределенность) для прогнозирования апостериорной неопределенности на любом этапе процесса проектирования. Таким образом, при небольшом размере выборки апостериорная оценка статистической неопределенности будет высокой, как и общая неопределенность. В результате итоговый план будет, скорее всего, консервативным (чрезмерно дорогостоящим) по сравнению с ситуацией, когда размер выборки больше.

Если знаний о параметре X недостаточно, например, в случае небольшого размера выборки, инженер-геотехник может столкнуться с одним из следующих сценариев в зависимости от своего подхода к статистике:

а) инженеры, практикующие частотный подход, считают, что X_k не может быть проанализировано статистически с получением приемлемого результата проектирования, поэтому они предпочитают игнорировать большую статистическую неопределенность, выбирая субъективно оцененное значение X_k которое, возможно, с небольшой поправкой на неопределенность, представляет собой осторожную оценку основного параметра;

б) инженеры, применяющие байесовский подход, признают наличие неопределенности и определяют характеристическое значение X_k статистическим методом. Из-за значительной статистической неопределенности проект оказывается слишком консервативным. Видя это, инженеры решают снизить неопределенность, проведя дополнительные исследования (если это возможно), или управлять неопределенностью в процессе строительства, используя, например, метод наблюдений.

При использовании этих двух сценариев выбор характеристического значения является важной частью работы инженера по управлению рисками. Анализ существующих факторов неопределенности имеет основополагающее значение для геотехнического проектирования, поскольку он влияет на то, как будет учитываться соответствующий риск [51]. С точки зрения управления рисками, инженеры, работающие по сценарию (а), могут быть более склонны игнорировать недостаток знаний при выборе субъективной оценки, чтобы получить результат, который, по их мнению, будет приемлемым. Таким образом, при проектировании может не учитываться текущая неопределенность и связанные с ней риски. Кроме того, если оставить неопределенность без внимания (не поддающейся количественной оценке), риски, выявленные в процессе проектирования, могут не учитываться на более поздних этапах проекта. Тем не менее сценарий (а) стал стандартной практикой, поскольку последствия реализации сценария (б) считаются слишком обременительными или дорогостоящими. С точки зрения байесовского подхода, лучше иметь весьма неточные, но вероятностные оценки геотехнических свойств, чем не иметь их вовсе.

Кроме того, геотехническое сообщество должно продолжать поддерживать внедрение байесовского подхода к анализу небольших выборок геотехнических данных. Это даст инженерам больше стимулов для проведения проектирования с учетом рисков, при котором неопределенность строго контролируется на всех этапах проектирования и строительства. В заключение отметим, что небольшой размер выборки не должен препятствовать проведению исследования с учетом надежности (как на уровне II, так и на уровне III), особенно если придерживаться байесовского подхода. Но кроме применения байесовского подхода, который имеет ряд недостатков, эффективным может быть применение подходов к оцениванию малых выборок и использованием решений, полученных на основе теории порядковых статистик [52].

Рассмотрим, как метод частных коэффициентов может быть переосмыслен в рамках четкой концепции проектирования, основанной на оценке рисков, с учетом результатов, полученных в работе [51]. При проектировании на основе надежности стохастическая величина обычно характеризуется своим распределением плотности вероятности. Однако определение в стандарте EN 1997-1:2004 [41] (пункт 2.4.5.2(2)P) X_k акцентирует внимание на осторожности, которые необходимо проявлять в отношении среднего значения, а не на изменчивости среднего значения, что естественно при проектировании с учетом надежности. Эта разница во взглядах приводит к трудностям при согласовании формата обеспечения безопасности, предусмотренного стандартом EN 1997-1 [41], с проектированием на основе надежности. При проектировании на основе оценки рисков основное внимание при проектировании должно уделяться тому, как компенсировать недостаток знаний – либо за счет количества измерений, либо за счет выбора методологии проектирования. Таким образом, при приведении текущего формата обеспечения безопасности

в соответствии с проектированием на основе теории надежности целесообразно определять характеристическое значение как среднее пространственное значение X , которое можно статистически охарактеризовать с помощью параметра изменчивости S_x^2 или, точнее, общей неопределенности COV_{total} . Если для определения S_x^2 или COV_{total} используются статистические методы, то частный коэффициент можно скорректировать с учетом неопределенности X и $\bar{x}$. Если статистические методы не используются, определение расчетного значения должно соответствовать тому факту, что X и $\bar{x}$ по своей сути являются случайными величинами. В качестве решения предлагается процедура определения расчетного значения, описанная в шведском национальном приложении (SNA) к стандарту EN 1997-1, которая ранее обсуждалась в работе [51]:

$$x_d = \frac{X_k}{\gamma_M} = \frac{x_{chosen} \cdot \eta}{\gamma_M}, \quad (13)$$

где x_{chosen} – выбирается либо как субъективно оцениваемое среднее значение, либо как $\bar{x}$;

η – коэффициент преобразования, который инженер-геолог выбирает из списка значений, приведенного в национальном приложении [41].

В принципе, η указывает на влияние неопределенностей и факторов, перечисленных в стандарте EN 1997-1 на x_{chosen} и, по сути, является калибровочным коэффициентом к запасу прочности.

Малый размер выборки не является обоснованным аргументом для отказа от оценки статистики геотехнических свойств оснований фундаментов.

Заключение

Мировая практика геотехнического проектирования постепенно отходит от классических детерминистских подходов, основанных на фиксированных частных коэффициентах (до введения метода предельных состояний – коэффициенты запаса) и минимальном учёте вариабельности, к полу-вероятностным и риск-ориентированным моделям (LRFD, LSD, RBD). Фиксированные табличные значения частных коэффициентов безопасности не способны адекватно отразить высокую пространственную природную изменчивость грунтов, реологические свойства, временную нелинейность характеристик, ограниченный объём полевых и лабораторных испытаний, а также корреляцию между нагрузкой и сопротивлением. Особенно критично в данной ситуации то, что отказ оснований фундаментов влечёт отказ всей системы «основание – фундамент – надземная конструкция», тогда как существующие форматы безопасности рассматривают компоненты надёжности изолированно. Повышение эффективности и надежности геотехнического проектирования и эксплуатации зданий и сооружений потребовало комплексной оценки системы «основание – фундамент – надземная конструкция» с учетом взаимодействия элементов конструктивной системы с грунтом, а неспособность количественно оценить вероятность отказа и адекватно учесть сложные и разнородные механические свойства грунтовых массивов требует развития теоретической базы правил калибровки коэффициентов безопасности, требований к минимальному объёму данных, алгоритмов и процедур, обеспечивающих практическую применимость методик расчета. Таким образом, проблема заключается не просто в назначении/калибровке частных коэффициентов, а в принципиальной несовместимости структурной логики нормативных документов с физикой системы «основание – фундамент – надземная конструкция».

Отсутствие в действующих нормативных документах чётких практических рекомендаций по выполнению вероятностных расчётов в условиях ограниченной информации существенно сдерживает внедрение риск-ориентированного подхода и требует разработки национальных приложений, адаптированных к местным геологическим условиям и специфике методов испытаний. При этом все же ключевым барьером на пути внедрения риск-ориентированного подхода в практике геотехнического проектирования является несоответствие между требованиями классической теории надежности

(методы FORM/SORM, Монте-Карло) и реальным объемом информации, получаемой на этапе инженерно-геологических изысканий. Прямое применение вероятностных методов высоких уровней становится статистически сложным из-за малых выборок, отсутствия полной информации о законах распределения случайных величин и высокой пространственной изменчивости грунтов. Это делает калибровку частных коэффициентов безопасности субъективной, а результаты расчетов вероятности отказа – недостоверными. Поэтому переход к альтернативным математическим аппаратам, таким как теории нечетких множеств, позволяют формализовать не только статистические данные, но и экспертные оценки, инженерный опыт и качественную информацию о реологии, деградации свойств и изменчивости нагрузок во времени.

Список цитированных источников

- Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : ГОСТ 27751-2014. – Введ. 01.07.2015. – М. : Стандартинформ, 2015. – 24 с.
- Ермолаев, Н. Н. Надежность оснований сооружений / Н. Н. Ермолаев, В. В. Михеев. – Л. : Стройиздат, 1976. – 152 с.
- Шейнин, В. И. Подход к оцениванию надежности в инженерных расчетах оснований / В. И. Шейнин, Ю. В. Лесовой, В. В. Михеев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1990. – № 1. – С. 24–26.
- Уткин, В. С. Расчет надежности основания фундамента, сложенного просадочными грунтами, по критерию деформации с учетом изменчивости толщ слоев грунта / В. С. Уткин, А. А. Каберова // Справочник. Инженерный журнал. – 2015. – № 11. – С. 17–22.
- Гарагаш, Б. А. Надежность систем «Основание – сооружение» / Б. А. Гарагаш. – М. : Ассоциация строительных вузов, 2012. – Т. 1. – 413 с.
- Уткин, В. С. Расчет надежности грунтовых оснований фундаментов зданий и сооружений по критерию деформации при ограниченной информации о нагрузках и грунтах / В. С. Уткин // Инженерно-строительный журнал. – 2016. – № 1 (61). – С. 4–13.
- Гарагаш, Б. А. Надежность систем «Основание–сооружение» / Б. А. Гарагаш. – М. : Ассоциация строительных вузов, 2012. – Т. 2. – 471 с.
- Уткин, В. С. Нечеткие множества и теория возможностей в расчетах надежности строительных конструкций / В. С. Уткин, Н. Л. Галаева. – Вологда : ВоГТУ, 2008. – 160 с.
- Zadeh, L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility / L. A. Zadeh // Fuzzy Sets and Systems. – 1978. – Vol. 1. – P. 3–28.
- Уткин, В. С. Расчет надежности механических систем при ограниченной статистической информации / В. С. Уткин, Л. В. Уткин. – Вологда : ВоГТУ, 2008. – 188 с.
- Альберт, И. У. Численная оценка вероятности отказа системы «сооружение – сейсмоизолирующий фундамент – основание» при сейсмических воздействиях / И. У. Альберт // Вестник гражданских инженеров. – 2008. – № 1 (14). – С. 17–24.
- Уткин, В. С. Расчет надежности грунтового основания фундаментов по критерию несущей способности / В. С. Уткин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2014. – № 4. – С. 23–27.
- Уткин, В. С. Расчет надежности фундаментов машин по критериям прочности грунта основания и амплитудам колебаний при ограниченной статистической информации / В. С. Уткин // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2013. – Vol. 9, No. 4. – С. 226–237.
- Уткин, В. С. Расчет надежности грунтовых оснований и фундаментов машин при ограниченной информации на стадии эксплуатации / В. С. Уткин, Л. В. Уткин. – Вологда : ВоГТУ, 2013. – 124 с.
- Уткин, В. С. Расчет надежности оснований фундаментов, сложенных набухающими грунтами, по критерию деформации (общей осадки) / В. С. Уткин, А. А. Каберова // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2015. – Vol. 11, No. 3. – P. 116–125.
- Уткин, В. С. Расчет надежности оснований и фундаментов при различной информации. – Германия : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 100 с.
- Уткин, В. С. Сборник примеров расчета надежности несущих элементов зданий / В. С. Уткин, О. В. Ярыгина. – Вологда : ВоГТУ, 2015. – 83 с.
- Baecher, G. B. Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering / G. B. Baecher, J. T. Christian. – Hoboken, NJ : Wiley, 2003. – 605 p.
- Phoon, K. K. Performance of reliability-based design code for mats for foundations in layered soils / K. K. Phoon, J. Ching, J. R. Chen // Computers and Structures. – 2013. – Vol. 126. – P. 100–106.
- Phoon, K. K. Development of a reliability-based design framework for transmission line structure foundations / K. K. Phoon, F. H. Kulhawy, M. D. Grigoriu // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2003a. – Vol. 129, No. 9. – P. 798–806.
- Naghibi, M. Geotechnical resistance factors for ultimate limit state design of deep foundations in cohesive soils / M. Naghibi, G. A. Fenton // Canadian Geotechnical Journal. – 2011. – Vol. 48, No. 11. – P. 1729–1741.
- Eryilmaz, S. Stress strength reliability in the presence of fuzziness / S. Eryilmaz, G. Y. Tütüncü // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2015. – Vol. 282. – P. 262–267.
- Li, G. A fuzzy reliability approach for structures based on the probability perspective / G. Li, Z. Lu, J. Xu // Structural Safety. – 2015. – Vol. 54. – P. 10–18.
- Gao, P. Fuzzy dynamic reliability model of dependent series mechanical systems / P. Gao, S. Yan // Advances in Mechanical Engineering. – 2013. – Vol. 5. – P. 685721.
- Wang, X. Safety estimation of structural systems via interval analysis / X. Wang, L. Wang, Z. Qiu // Chinese Journal of Aeronautics. – 2013. – Vol. 26, No. 4. – P. 911–918.
- Строительные правила. Общие положения по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений : СП 5.01.01-2023. – Введ. 27.02.2023. – Минск : Минстройархитектуры Республики Беларусь : Стройтехнорм, 2023. – 150 с.
- Hansen, J. B. Code of Practice for Foundation Engineering / J. B. Hansen. – Copenhagen : Danish Geotechnical Institute, 1966. – 45 p.
- Faber, M. Reliability Based Code Calibration / M. Faber, J. Sorensen. – Aalborg : Aalborg University, 2002. – 17 p.
- Гуров, С. В. Надежность систем при неполной информации / С. В. Гуров, Л. В. Уткин. – СПб. : Любавич, 1999. – 166 с.
- Shafer, G. A Mathematical Theory of Evidence / G. Shafer. – Princeton : Princeton University Press, 1976. – 297 p.
- Smets, P. What is Dempster-Shafer's model? / P. Smets // Advances in the Dempster-Shafer Theory of Evidence. – 1994. – P. 5–34.
- Dempster, A. P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping / A. P. Dempster // Annals of Mathematical Statistics. – 1967. – Vol. 38. – P. 325–339.
- Jiang, C. An evidence-based reliability analysis method for uncertain structures / C. Jiang, Z. Zhang, X. Han // Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – 2013. – Vol. 45, No. 1. – P. 103–115.
- A response surface approach for structural reliability analysis using evidence theory / Z. Zhang, C. Jiang, X. Han [et al.] // Advances in Engineering Software. – 2014. – Vol. 69. – P. 37–45.
- Уткин, Л. В. Анализ риска и принятие решений при неполной информации / Л. В. Уткин. – СПб. : Наука, 2007. – 404 с.
- Faber, M. H. Reliability Based Code Calibration / M. H. Faber, J. D. Sørensen. – Aalborg : Aalborg University, 2002. – 17 p.
- NRCC. National Building Code of Canada. – Ottawa : National Research Council of Canada (NRCC), 2005. – 600 p.
- CGS. Canadian Foundation Engineering Manual. – Montreal, Quebec : Canadian Geotechnical Society, 2006. – 520 p.
- AASHTO. LRFD Bridge Design Specifications. – 9th ed. – Washington, D.C. : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020. – 1200 p.
- CEN. EN 1990:2002 Eurocode – Basis of structural design. – Brussels : European Committee for Standardization, 2002. – 87 p.

41. CEN. EN 1997-1:2004 Eurocode 7 – Geotechnical design – Part 1: General rules. – Brussels : European Committee for Standardization, 2004. – 166 p.
 42. CSA. Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC). – Toronto : Canadian Standards Association, 2019. – 1000 p.
 43. Allen, T. M. Development of geotechnical resistance factors and LRFD calibration / T. M. Allen // *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*. – ASCE, 2005. – P. 168–179.
 44. Phoon, K. K. Multiple resistance factor design for shallow foundations / K. K. Phoon, F. H. Kulhawy, M. D. Grigoriu // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2003. – Vol. 129, No. 9. – P. 807–818.
 45. Fenton, G. A. Load and resistance factor design of shallow foundations against bearing failure / G. A. Fenton, D. V. Griffiths, X. Zhang // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2008. – Vol. 45, No. 11. – P. 1556–1571.
 46. Bathurst, R. J. LRFD calibration of soil strength parameters for geotechnical structures / R. J. Bathurst, S. Javankhoshdel // *Georisk*. – 2017. – Vol. 11, No. 1. – P. 119–133.
 47. Foye, K. C. Assessment of resistance factors for LRFD of shallow foundations / K. C. Foye, R. Salgado, B. Scott // *Transportation Research Record*. – 2006. – No. 1975. – P. 21–30.
 48. Bathurst, R. J. Calibration concepts for load and resistance factor design (LRFD) of reinforced soil walls / R. J. Bathurst, T. M. Allen, A. S. Nowak // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2008. – Vol. 45, No. 10. – P. 1377–1392.
 49. Основы проектирования строительных конструкций: строительные нормы Республики Беларусь : СН 2.01.01-2022. – Введ. 23.11.2022. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2022. – III, 46 с.
 50. Designer's guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical design – General rules / R. Frank, C. Bauduin, R. Driscoll [et al.]. – London : Thomas Telford, 2004. – 216 с.
 51. Prästings, A. Characteristic values of geotechnical parameters in Eurocode 7 / A. Prästings, J. Spross, S. Larsson // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. – Vol. 172 (4). – 2011. – P. 301–314.
 52. Дереченник, С. С. Численное решение задачи оценивания эмпирической функции распределения для малых выборок с заданной достоверностью / С. С. Дереченник, Н. Н. Мешечек // *Вестник Брестского государственного технического университета*. – 2024. – № 1 (133). – С. 67–71. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-67-71.
- References**
1. Nadezhnost' stroitel'nykh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozheniya : GOST 27751-2014. – Vved. 01.07.2015. – М. : Standartinform, 2015. – 24 s.
 2. Ermolaev, N. N. Nadezhnost' osnovanij sooruzhenij / N. N. Ermolaev, V. V. Miheev. – L. : Strojizdat, 1976. – 152 s.
 3. SHEjnin, V. I. Podhod k ocenivaniyu nadezhnosti v inzhenernykh raschetah osnovanij / V. I. SHEjnin, YU. V. Lesovoj, V. V. Miheev // *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. – 1990. – № 1. – С. 24–26.
 4. Utkin, V. S. Raschet nadezhnosti osnovaniya fundamenta, slozhennogo prosadochnymi gruntami, po kriteriyu deformacii s uchetom izmenchivosti tolshch sloev grunta / V. S. Utkin, A. A. Kaberova // *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal*. – 2015. – № 11. – С. 17–22.
 5. Garagash, B. A. Nadezhnost' sistem «Osnovanie – sooruzhenie» / B. A. Garagash. – М. : Associaciya stroitel'nykh vuzov, 2012. – Т. 1. – 413 s.
 6. Utkin, V. S. Raschet nadezhnosti gruntovykh osnovanij fundamentov zdaniy i sooruzhenij po kriteriyu deformacii pri ogranichennoj informacii o nagruzkah i gruntah / V. S. Utkin // *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*. – 2016. – № 1 (61). – С. 4–13.
 7. Garagash, B. A. Nadezhnost' sistem «Osnovanie – sooruzhenie» / B. A. Garagash. – М. : Associaciya stroitel'nykh vuzov, 2012. – Т. 2. – 471 s.
 8. Utkin, V. S. Nechetkie mnozhestva i teoriya vozmozhnostej v raschetah nadezhnosti stroitel'nykh konstrukcij / V. S. Utkin, N. L. Galaeva. – Vologda : VoGTU, 2008. – 160 s.
 9. Zadeh, L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility / L. A. Zadeh // *Fuzzy Sets and Systems*. – 1978. – Vol. 1. – P. 3–28.
 10. Utkin, V. S. Raschet nadezhnosti mekhanicheskikh sistem pri ogranichennoj statisticheskoj informacii / V. S. Utkin, L. V. Utkin. – Vologda : VoGTU, 2008. – 188 s.
 11. Al'bert, I. U. CHislennaya ocenka veroyatnosti otказа sistemy «sooruzhenie – sejsmoizoliruyushchij fundament – osnovanie» pri sejsmicheskikh vozdeystviyah / I. U. Al'bert // *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. – 2008. – № 1 (14). – С. 17–24.
 12. Utkin, V. S. Raschet nadezhnosti gruntovogo osnovaniya fundamentov po kriteriyu nesushchej sposobnosti / V. S. Utkin // *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. – 2014. – № 4. – С. 23–27.
 13. Utkin, V. S. Raschet nadezhnosti fundamentov mashin po kriteriyam prochnosti grunta osnovaniya i amplitudam kolebanij pri ogranichennoj statisticheskoj informacii / V. S. Utkin // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2013. – Vol. 9, No. 4. – С. 226–237.
 14. Utkin, V. S. Raschet nadezhnosti gruntovykh osnovanij i fundamentov mashin pri ogranichennoj informacii na stadii ekspluatatsii / V. S. Utkin, L. V. Utkin. – Vologda : VoGTU, 2013. – 124 s.
 15. Utkin, V. S. Raschet nadezhnosti osnovanij fundamentov, slozhennykh nabuhayushchimi gruntami, po kriteriyu deformacii (obshchej osadki) / V. S. Utkin, A. A. Kaberova // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2015. – Vol. 11, No. 3. – P. 116–125.
 16. Utkin, V. S. Raschet nadezhnosti osnovanij i fundamentov pri razlichnoj informacii. – Germaniya : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 100 s.
 17. Utkin, V. S. Sbornik primerov rascheta nadezhnosti nesushchih elementov zdaniy / V. S. Utkin, O. V. YArgina. – Vologda : VoGTU, 2015. – 83 s.
 18. Baecher, G. B. Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering / G. B. Baecher, J. T. Christian. – Hoboken, NJ : Wiley, 2003. – 605 p.
 19. Phoon, K. K. Performance of reliability-based design code for mats for foundations in layered soils / K. K. Phoon, J. Ching, J. R. Chen // *Computers and Structures*. – 2013. – Vol. 126. – P. 100–106.
 20. Phoon, K. K. Development of a reliability-based design framework for transmission line structure foundations / K. K. Phoon, F. H. Kulhawy, M. D. Grigoriu // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2003a. – Vol. 129, No. 9. – P. 798–806.
 21. Naghibi, M. Geotechnical resistance factors for ultimate limit state design of deep foundations in cohesive soils / M. Naghibi, G. A. Fenton // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2011. – Vol. 48, No. 11. – P. 1729–1741.
 22. Eryilmaz, S. Stress strength reliability in the presence of fuzziness / S. Eryilmaz, G. Y. Tütüncü // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. – 2015. – Vol. 282. – P. 262–267.
 23. Li, G. A fuzzy reliability approach for structures based on the probability perspective / G. Li, Z. Lu, J. Xu // *Structural Safety*. – 2015. – Vol. 54. – P. 10–18.
 24. Gao, P. Fuzzy dynamic reliability model of dependent series mechanical systems / P. Gao, S. Yan // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2013. – Vol. 5. – P. 685721.
 25. Wang, X. Safety estimation of structural systems via interval analysis / X. Wang, L. Wang, Z. Qiu // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2013. – Vol. 26, No. 4. – P. 911–918.
 26. Stroitel'nye pravila. Obshchie polozheniya po proektirovaniyu osnovanij i fundamentov zdaniy i sooruzhenij : SP 5.01.01-2023. – Vved. 27.02.2023. – Minsk : Ministrojarhitektury Respubliki Belarus' : Strojtekhnorm, 2023. – 150 s.
 27. Hansen, J. B. Code of Practice for Foundation Engineering / J. B. Hansen. – Copenhagen : Danish Geotechnical Institute, 1966. – 45 p.
 28. Faber, M. Reliability Based Code Calibration / M. Faber, J. Sorensen. – Aalborg : Aalborg University, 2002. – 17 p.
 29. Gurov, S. V. Nadezhnost' sistem pri nepolnoj informacii / S. V. Gurov, L. V. Utkin. – SPb. : Lyubavich, 1999. – 166 s.
 30. Shafer, G. A Mathematical Theory of Evidence / G. Shafer. – Princeton : Princeton University Press, 1976. – 297 p.
 31. Smets, P. What is Dempster-Shafer's model? / P. Smets // *Advances in the Dempster-Shafer Theory of Evidence*. – 1994. – P. 5–34.

32. Dempster, A. P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping / A. P. Dempster // *Annals of Mathematical Statistics*. – 1967. – Vol. 38. – P. 325–339.
33. Jiang, C. An evidence-based reliability analysis method for uncertain structures / C. Jiang, Z. Zhang, X. Han // *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. – 2013. – Vol. 45, No. 1. – P. 103–115.
34. A response surface approach for structural reliability analysis using evidence theory / Z. Zhang, C. Jiang, X. Han [et al.] // *Advances in Engineering Software*. – 2014. – Vol. 69. – P. 37–45.
35. Utkin, L. V. Analiz riska i prinyatie reshenij pri nepolnoj informacii / L. V. Utkin. – SPb. : Nauka, 2007. – 404 s.
36. Faber, M. H. Reliability Based Code Calibration / M. H. Faber, J. D. Sørensen. – Aalborg : Aalborg University, 2002. – 17 p.
37. NRCC. National Building Code of Canada. – Ottawa : National Research Council of Canada (NRCC), 2005. – 600 p.
38. CGS. Canadian Foundation Engineering Manual. – Montreal, Quebec : Canadian Geotechnical Society, 2006. – 520 p.
39. AASHTO. LRFD Bridge Design Specifications. – 9th ed. – Washington, D.C. : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020. – 1200 p.
40. CEN. EN 1990:2002 Eurocode – Basis of structural design. – Brussels : European Committee for Standardization, 2002. – 87 p.
41. CEN. EN 1997-1:2004 Eurocode 7 – Geotechnical design – Part 1: General rules. – Brussels : European Committee for Standardization, 2004. – 166 p.
42. CSA. Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC). – Toronto : Canadian Standards Association, 2019. – 1000 p.
43. Allen, T. M. Development of geotechnical resistance factors and LRFD calibration / T. M. Allen // *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*. – ASCE, 2005. – P. 168–179.
44. Phoon, K. K. Multiple resistance factor design for shallow foundations / K. K. Phoon, F. H. Kulhawy, M. D. Grigoriu // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2003. – Vol. 129, No. 9. – P. 807–818.
45. Fenton, G. A. Load and resistance factor design of shallow foundations against bearing failure / G. A. Fenton, D. V. Griffiths, X. Zhang // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2008. – Vol. 45, No. 11. – P. 1556–1571.
46. Bathurst, R. J. LRFD calibration of soil strength parameters for geotechnical structures / R. J. Bathurst, S. Javankhoshdel // *Georisk*. – 2017. – Vol. 11, No. 1. – P. 119–133.
47. Foye, K. C. Assessment of resistance factors for LRFD of shallow foundations / K. C. Foye, R. Salgado, B. Scott // *Transportation Research Record*. – 2006. – No. 1975. – P. 21–30.
48. Bathurst, R. J. Calibration concepts for load and resistance factor design (LRFD) of reinforced soil walls / R. J. Bathurst, T. M. Allen, A. S. Nowak // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2008. – Vol. 45, No. 10. – P. 1377–1392.
49. Osnovy proektirovaniya stroitel'nykh konstrukcij: stroitel'nye normy Respubliki Belarus' : SN 2.01.01-2022. – Vved. 23.11.2022. – Minsk : Ministerstvo arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus', 2022. – III, 46 s.
50. Designer's guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical design – General rules / R. Frank, C. Bauduin, R. Driscoll [et al.]. – London : Thomas Telford, 2004. – 216 s.
51. Prästings, A. Characteristic values of geotechnical parameters in Eurocode 7 / A. Prästings, J. Spross, S. Larsson // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. – Vol. 172 (4). – 2011. – P. 301–314.
52. Derechennik, S. S. CHislennoe reshenie zadachi ocenivaniya empiricheskoy funkcii raspredeleniya dlya malyh vyborok s zadannoj dostovernost'yu / S. S. Derechennik, N. N. Meshechek // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. – 2024. – № 1 (133). – S. 67–71. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-67-71.

Материал поступил 16.07.2026, одобрен 24.08.2026, принят к публикации 25.08.2026

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.83+519.85

МЕТОД ОБРАТНОГО КИНЕМАТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПЛОСКОГО РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА

А. В. Котов¹, Д. Г. Кроль²

¹ Магистр технических наук, ведущий инженер-конструктор, АО «Сейсмостехника», аспирант кафедры механики, УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Гомель, Беларусь, e-mail: androsv@mail.ru

² К. ф.-м. н., доцент, первый проректор УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Гомель, Беларусь, e-mail: kr-dmityr@gstu.by

Реферат

Представлен оригинальный метод обратного кинематического синтеза плоского рычажного механизма для решения задачи о воспроизведении заданной траектории движения точки с учетом функциональных ограничений. В отличие от классических подходов, требующих предварительного решения прямой задачи кинематики и формирования целевой функции на основе невязки координат траекторий, предлагаемый метод базируется непосредственно на решении обратной задачи кинематики. Кинематическое описание механизма выполняется для каждого заданного положения целевой точки без использования обобщенной координаты с применением метода преобразования координат в неизменном базисе на основе теории комплексных чисел. Благодаря такому подходу удается свести задачу синтеза к минимизации среднеквадратичного отклонения длины всего одного замыкающего звена (ведущего звена) во всех расчетных положениях, что значительно упрощает аналитическое описание и повышает наглядность процесса поиска оптимального решения.

Численная реализация предложенного метода выполнена в математическом пакете PTC MathCAD с использованием встроенной функции minimize(), реализующей квазиньютоновский метод поиска минимума. Для тестового примера воспроизведения траектории в форме эллипса, заданной десятью целевыми точками, получены оптимальные значения длин звеньев и координат неподвижных шарниров. Максимальная абсолютная погрешность отклонения расчетной траектории от заданных целевых точек не превысила 0,1 мм, относительная погрешность составила не более 1 %.

Полученные результаты подтверждают работоспособность и высокую точность предложенного метода, который может быть рекомендован для практического использования при проектировании новых или модернизации существующих рычажных механизмов в различных отраслях машиностроения.

Ключевые слова: рычажный механизм, кинематический синтез, траектория, алгоритм, ограничения.

METHOD OF INVERSE KINEMATIC SYNTHESIS OF A FLAT LEVER MECHANISM

A. V. Kotov, D. G. Krol

Abstract

An original method for the inverse kinematic synthesis of a flat lever mechanism is presented for solving the problem of reproducing a given trajectory of a point motion taking into account functional constraints. In contrast to classical approaches that require preliminary solution of the forward kinematics problem and the formulation of an objective function based on the residual of trajectory coordinates, the proposed method is based directly on solving the inverse kinematics problem. The kinematic description of the mechanism is performed for each specified position of the target point without using a generalized coordinate, applying the method of coordinate transformation in a fixed basis using complex number theory. Due to this approach, it is possible to reduce the synthesis problem to minimizing the root-mean-square deviation of the length of a single closing link (the driving link) in all calculated positions, which significantly simplifies the analytical description and increases the clarity of the optimal solution search process.

Numerical implementation of the proposed method is carried out in the mathematical package PTC MathCAD using the built-in minimize() function, which implements the quasi-Newton method for finding the minimum. For a test example of reproducing an elliptical trajectory defined by ten target points, optimal values of link lengths and coordinates of fixed pivots are obtained. The maximum absolute error of deviation of the calculated trajectory from the given target points did not exceed 0,1 mm, and the relative error was no more than 1 %.

The obtained results confirm the operability and high accuracy of the proposed method, which can be recommended for practical use in the design of new or modernization of existing lever mechanisms in various branches of mechanical engineering.

Keywords: lever mechanism, kinematic synthesis, trajectory, algorithm, constraints.

Введение

Кинематический синтез плоского рычажного механизма заключается в определении параметров его кинематической схемы по заданным условиям движения ведомого звена. Одной из разновидностей этой задачи является синтез механизма, воспроизводящего заданную траекторию движения определенного звена или точки [1]. Такие механизмы до сих пор остаются востребованными во многих отраслях машиностроения [2–4], а их оптимальное проектирование непосредственно связано с постановкой и решением задачи кинематического синтеза.

Несмотря на постоянное развитие и совершенствование методов кинематического синтеза плоских рычажных механизмов, не существует единого подхода к решению данной задачи. Известные графические методы [5] эффективны только для простейших

плоских рычажных механизмов и практически не применимы для многозвенных механизмов. Графоаналитические методы [6] кинематического синтеза разрабатываются под решение задач для конкретных рычажных механизмов и, как правило, не обладают высокой гибкостью в решении других задач. Известные аналитические методы [7–9] кинематического синтеза многозвенных рычажных механизмов в подавляющем большинстве достаточно сложны, громоздки и могут использовать оптимизационные алгоритмы, недоступные для подробного изучения. Поэтому разработка новых, наглядных и универсальных методов кинематического синтеза плоских рычажных механизмов, способных легко адаптироваться в специализированных математических пакетах и языках программирования, все еще представляет важную научную и практическую задачу.

Традиционно при решении задачи кинематического синтеза о воспроизведении заданной траектории движения точки плоского рычажного механизма предварительно решается прямая задача кинематики, по результатам которой формируется некоторая целевая функция. Как правило, в качестве такой целевой функции выступает невязка координат полученной расчетной траектории шатунной кривой некоторой точки с требуемой траекторией [10] или их среднеквадратичное отклонение [11]. Встречаются работы, в которых в качестве целевой функции выступает функция, учитывающая одновременно квадраты разниц между площадями описываемых областей, и длины желаемой и текущей траекторий [12]. Минимизация сформированной целевой функции достигается с помощью того или иного оптимизационного алгоритма за счет подбора рациональных длин подвижных звеньев, а в некоторых случаях и координат размеров стойки. Используемые для решения прямой задачи кинематики классические методы, в подавляющем большинстве основаны на методе замкнутых векторных контурах Зинovieва [13, 14] и требуют значительных математических выкладок. Но, как показывает практика [15] чем меньшее число аналитических выражений будет заложено в математическую модель механизма, тем более эффективно происходит поиск оптимального решения при его кинематическом синтезе.

В данной работе предлагается метод решения обратной задачи кинематики плоского рычажного механизма, используя непосредственно координаты целевых точек траектории для заданных расчетных положений. При этом минимальное число аналитических выражений достигается за счет применения метода преобразования координат в неизменном базисе с помощью теории комплексных чисел, а в качестве целевой функции предлагается использовать среднеквадратичное отклонение длины всего лишь одного из звеньев механизма. В результате такой постановке и решении задачи о воспроизведении заданной траектории движения точки получен эффективный метод с приемлемой точностью и скоростью поиска оптимального решения.

Целью данного исследования является разработка метода решения задачи о воспроизведении заданной траектории движения точки плоского рычажного механизма методом обратного кинематического синтеза с учетом наложенных функциональных ограничений. Компьютерная реализация предложенного метода представлена в математическом пакете PTC MathCAD.

Материалы и методы

Кинематический анализ плоского рычажного механизма основан на методе преобразования координат в неизменном базисе с помощью теории комплексных чисел. Решение задачи обратного кинематического синтеза осуществлено численным методом на основе встроенной функции *minimize()* математического пакета PTC MathCAD квазинытоновским методом.

Метод обратного кинематического синтеза

Постановку и решение задачи предлагаемым методом обратного кинематического синтеза рассмотрим на примере плоского четырехзвенника, кинематическая схема которого, соответствующая одной из возможных сборок, приведена на рисунке 1. В качестве ведущего звена (кривошипа) выступает звено AC, а требуемая для воспроизведения траектория движения т. М задается координатами для *n*-го количества целевых точек на комплексной плоскости (в системе координат *Re-Im*).

При проведении кинематического синтеза в качестве оптимизируемых параметров выберем все длины звеньев механизма (кроме ведущего звена) и координаты неподвижных точек, которые представим в виде следующего вектора независимых оптимизируемых параметров:

$$\bar{p} = \{p_i\} = (A_x, A_y, B_x, B_y, L_{BD}, L_{MD}, L_{DC}, L_{MC})^T. \quad (1)$$

В общем случае заданная траектория движения т. М может представлять собой любую кривую. Для тестирования и отладки предложенного метода обратного кинематического синтеза примем, что для рассматриваемого плоского рычажного механизма требуемая для воспроизведения траектория движения т. М имеет форму

эллипса, большая ось которого параллельна действительной оси принятой системы координат, и задана с помощью следующих 10-ти целевых точек [16–18]:

$$M_i = \{(20; 10), (17,66; 15,142), (11,736; 17,878), (5; 16,928), (0,60307; 12,736), (0,60307; 7,2638), (5; 3,0718), (11,736; 2,1215), (17,66; 4,8577), (20; 10)\}.$$

Решение обратной задачи кинематики для рассматриваемого рычажного механизма будем проводить методом преобразования координат в неизменном базисе с применением теории комплексных чисел [19, 20]. Данный метод помимо своей простоты и наглядности обладает еще одним неоспоримым преимуществом – минимальным числом аналитических выражений, что, как отмечалось выше, является достаточно весомым аргументом при решении любой задачи кинематического синтеза.

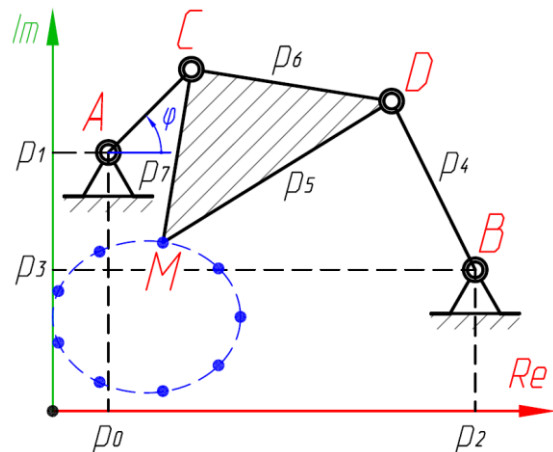


Рисунок 1 – Кинематическая схема плоского рычажного механизма

Используя приведенные в работах [19, 20] аналитические зависимости, а также вектор оптимизируемых параметров (1) опишем кинематику рассматриваемого рычажного механизма. Для этого представим промежуточные параметры расчетов (координаты точек, длины звеньев и др.) в виде радиус-вектора комплексного числа, для обозначения которого здесь и далее будет применяться символ нижнего подчеркивания. При этом при решении обратной задачи кинематики не будет использоваться какая-либо обобщенная координата, т. к. в аналитическом описании будут участвовать только *n* статических положений механизма.

Точки М, А и В:

$$\underline{M} = M_x + j \cdot M_y; \underline{A}(p) = p_0 + j \cdot p_1; \underline{B}(p) = p_2 + j \cdot p_3,$$

где *j* – мнимая единица.

Звено BM:

$$\underline{BM}(p) = \underline{M} - \underline{B}(p).$$

Угол *MBD* найдем по теореме косинусов с помощью пользовательской функции *Tcos()* [19, 20]:

$$\alpha_{MBD}(p) = Tcos(|\underline{BM}(p)|, p_4, p_5).$$

Вектор звена *BD* найдем с помощью пользовательской функции *TurnRI()* путем поворота найденного радиус-вектора звена *BM* на угол α_{MBD} по ходу часовой стрелки (перед углом стоит знак «–») с изменением его длины на оптимизируемую длину $p_4 \equiv L_{BD}$ [19, 20]:

$$\underline{BD}(p) = TurnRI(\underline{BM}(p), -\alpha_{MBD}(p), p_4).$$

Для краткости, приведем далее только расчетные формулы оставшихся параметров [19, 20]:

$$\underline{D}(p) = \underline{B}(p) + \underline{BD}(p); \underline{DM}(p) = \underline{M} - \underline{D}(p);$$

$$\alpha_{MDC}(p) = Tcos(p_5, p_6, p_7);$$

$$\underline{DC}(p) = TurnRI(\underline{DM}(p), -\alpha_{MDC}(p), p_6);$$

$$\underline{C}(p) = \underline{D}(p) + \underline{DC}(p); \underline{AC}(p) = \underline{C}(p) - \underline{A}(p); \underline{AB}(p) = \underline{B}(p) - \underline{A}(p).$$

В результате решена обратная задача кинематики рассматриваемого плоского рычажного механизма. При этом все найденные величины зависят от вектора оптимизируемых параметров и определяются для конкретного положения радиус-вектора t . M .

Дальнейшее решение задачи обратного кинематического синтеза заключается в формировании целевой функции, которая является центральным элементом при решении любой задачи синтеза. При решении рассматриваемой задачи в качестве целевой функции уже не может выступать невязка координат траекторий t . M , т. к. данная траектория была взята за основу при описании кинематики механизма. В предложенном методе обратного кинематического синтеза в качестве целевой функции будет выступать среднеквадратическое отклонение длины замыкающего звена AC во всех расчетных положениях:

$$f(\bar{p}) = \sigma(|\underline{AC}(\bar{p})|) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Такой подход к решению задачи кинематического синтеза сводится к минимизации целевой функции всего лишь одного звена (замыкающего), что делает решение задачи более простой и наглядной. Чем ближе к нулю в процессе кинематического синтеза будет получено значение целевой функции (2), тем более постоянную длину будет иметь замыкающее звено для всех рассматриваемых положений механизма, а, следовательно, будет обеспечено минимальное отклонение t . M от заданной траектории.

Стоит также отметить, что при решении обратной задачи кинематического анализа в качестве замыкающего звена для формирования целевой функции не обязательно должно выступать ведущее звено. В качестве замыкающего звена может быть выбрано любое другое звено, удобное для аналитического описания обратной задачи кинематики рассматриваемого механизма.

Для корректной работы сформированной целевой функции (2) необходимо наложить определенные функциональные ограничения на поиск решения задачи обратного кинематического синтеза. С этой целью все длины звеньев рассматриваемого механизма, а также координаты его неподвижных шарниров, используемые в векторе оптимизируемых параметров (1), ограничим определенным диапазоном поиска, который на практике, как правило, устанавливается исходя из определенных требований компоновки механизма. Данный диапазон поиска примем по аналогии с аналогичными механизмами, см. например [16–18], увеличив его на 12,5 % относительно принятых в них значений:

$$p_0, p_1, p_2, p_3 \in [-90, 90]; \quad p_4, p_5, p_6, p_7 \in (0, 90]. \quad (3)$$

Кроме того, обеспечим условие существования треугольника для жесткого звена MDC , согласно которому треугольник существует тогда и только тогда, когда сумма любых двух его сторон больше третьей стороны:

$$p_5 + p_6 > p_7; \quad p_6 + p_7 > p_5; \quad p_7 + p_5 > p_6. \quad (4)$$

Для обеспечения условия существования кривошипа для рассматриваемого четырехзвенника воспользуемся теоремой Грасгофа:

$$L_{AC}(\bar{p}) + |\underline{AB}(\bar{p})| < p_4 + p_6; \\ \min(L_{AC}(\bar{p}), |\underline{AB}(\bar{p})|, p_4, p_6) - L_{AC}(\bar{p}) = 0. \quad (5)$$

С помощью второго уравнения в выражении (5) определяется, что входное звено AC является наименьшим. При этом длина звена AC задается равной среднему значению во всех расчетных положениях:

$$L_{AC}(\bar{p}) = \text{mean}(|\underline{AC}(\bar{p})|). \quad (6)$$

После того, как сформирована целевая функция (2) и заданы функциональные ограничения (3)–(5), задача обратного кинематического синтеза механизма сводится к классическому поиску значений вектора оптимизируемых параметров (1), при которых она достигает минимума с приемлемым значением. Приемлемое значение минимума соответствует допустимым отклонениям длин звеньев и координат неподвижных шарниров, а, следовательно, приемлемой точности воспроизведения требуемой траектории движения t . M .

Поиск минимального значения целевой функции может осуществляться с помощью того или иного оптимизационного алгоритма (например, методом деформируемого многогранника [15], генетического [21] и др.) или с использованием специальных встроенных функций в математических пакетах или языках программирования. На сего-

дняшний день развитие численных методов и алгоритмов оптимизации с использованием современных математических пакетов и языков программирования позволяет на качественно новом уровне решать задачи кинематического синтеза плоских рычажных механизмов.

В данной работе численное решение обратной задачи кинематического синтеза будем проводить в математическом пакете PTC MathCAD при помощи встроенной функции *minimize* (f , var) [22]. Данная функция может осуществлять поиск экстремума целевой функции методом сопряженных градиентов или квазиньютоновским методом с приемлемой точностью и за короткое время. Программная реализация поиска минимума целевой функции в математическом пакете PTC MathCAD приведена на рисунке 2 и для простоты его описания разбита на пять условных блоков.

Сформированная целевая функция и средняя длина замыкающего звена:

$$f(p) := \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (|AC(M_i, p)| - L_{AC}(p))^2} \quad L_{AC}(p) := \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |AC(M_i, p)| \quad (1)$$

Начальное приближение вектора оптимизируемых параметров, мм:

$$p := (-5 \quad 15 \quad 35 \quad 5 \quad 15 \quad 25 \quad 20 \quad 15)^T \quad (2)$$

Поиск решения:

Given
область допустимых значений параметров:

$-90 \leq p_0 \leq 90$	- координата $t.A$ по X , мм	Условие существования кривошипа:
$-90 \leq p_1 \leq 90$	- координата $t.A$ по Y , мм	
$-90 \leq p_2 \leq 90$	- координата $t.B$ по X , мм	
$-90 \leq p_3 \leq 90$	- координата $t.B$ по Y , мм	Условие существования треугольника:
$0 < p_4 \leq 90$	- длина звена L_{MD} , мм	
$0 < p_5 \leq 90$	- длина звена L_{MD} , мм	
$0 < p_6 \leq 90$	- длина звена L_{DC} , мм	
$0 < p_7 \leq 90$	- длина звена L_{MC} , мм	

$$L_{AC}(p) + |AB(p)| < p_4 + p_6$$

$$\min(L_{AC}(p), |AB(p)|, p_4, p_6) - L_{AC}(p) = 0$$

$$(p_5 + p_6) > p_7$$

$$(p_6 + p_7) > p_5$$

$$(p_7 + p_5) > p_6$$

Найденное решение задачи обратного кинематического синтеза, мм:

$$P_{mcd} := \text{Minimize}(f, p)$$

$$P_{mcd}^T = (7.015 \quad 13.371 \quad 48.92 \quad 2.73 \quad 24.313 \quad 25.806 \quad 27.843 \quad 4.905)$$

Проверка условия выполнения ограничений, а также значение целевой функции, мм:

$$L_{AC}(P_{mcd}) + |AB(P_{mcd})| - P_{mcd_4} - P_{mcd_6} = -7.584 \times 10^{-5} \quad \text{выполнено}$$

$$\min(L_{AC}(P_{mcd}), |AB(P_{mcd})|, P_{mcd_4}, P_{mcd_6}) - L_{AC}(P_{mcd}) = 0 \quad \text{выполнено}$$

$$f(P_{mcd}) = 0.036 \quad L_{AC}(P_{mcd}) = 8.92$$

(3)

Рисунок 2 – Программная реализация минимизации целевой функции в математическом пакете PTC MathCAD

В первом блоке задана целевая функция и средняя длина замыкающего звена, которые были рассчитаны для всех заданных положений. Во втором блоке для корректной работы алгоритма записано начальное приближение для всех величин вектора оптимизируемых параметров. В третьем блоке в виде системы неравенств задаются области допустимых значений изменения оптимизируемых параметров (левая часть блока), а также принятые функциональные ограничения (правая часть блока). В четвертом блоке решается сама задача обратного кинематического синтеза, учитывая все заданные выше функциональные ограничения, с окончательным выводом найденных результатов синтеза. В пятом блоке проверяется выполнение всех заданных функциональных ограничений, а также выводятся значения целевой функции и длины замыкающего звена для найденных оптимальных кинематических параметров механизма.

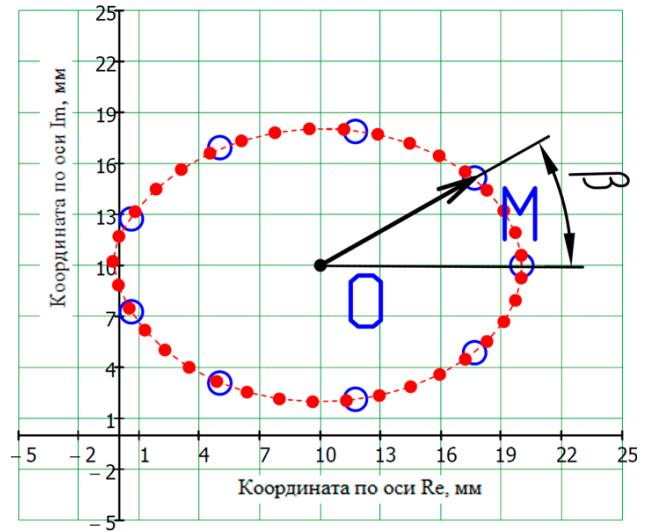
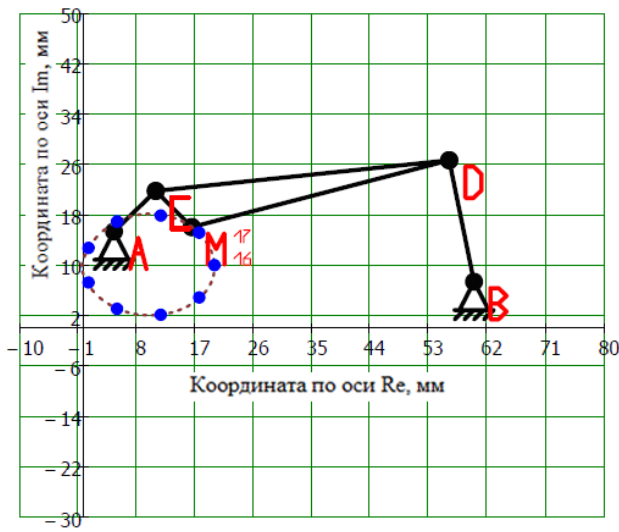
Результаты исследования

В результате решения задачи обратного кинематического синтеза были получены значения вектора оптимизируемых параметров и среднего значения длины замыкающего звена AC (см. рисунок 2). С помощью данных величин проведено уточнение итоговой траектории t . M путем проведения повторного кинематического анализа, но уже в прямом порядке с использованием обобщенной координаты (угла поворота φ ведущего звена) [19, 20]:

$$(A_X, A_Y, B_X, B_Y, L_{BD}, L_{MD}, L_{DC}, L_{MC})^T = \bar{p}_{mcd}; \quad L_{AC} = L_{AC}(\bar{p}_{mcd}); \\ A = A_X + jA_Y; \quad B = B_X + jB_Y; \quad AC(\varphi) = \text{TurnRI}(e_{Re}, \varphi, L_{AC}); \\ C(\varphi) = A + AC(\varphi); \quad BC(\varphi) = C(\varphi) - B; \\ \alpha_{CBD}(\varphi) = \text{Tcos}(|BC(\varphi)|, L_{BD}, L_{DC}); \\ BD(\varphi) = \text{TurnRI}(BC(\varphi), -\alpha_{CBD}(\varphi), L_{BD});$$

$$\begin{aligned} D(\varphi) &= B + \underline{BD}(\varphi); \quad \underline{CD}(\varphi) = D(\varphi) - \underline{C}(\varphi); \\ \alpha_{DCM} &= T\cos(L_{DC}, L_{MC}, L_{MD}); \quad \underline{CM}(\varphi) = \text{TurnRI}(\underline{CD}(\varphi), -\alpha_{DCM}, L_{MC}); \\ \underline{M}'(\varphi) &= \underline{C}(\varphi) + \underline{CM}(\varphi). \end{aligned}$$

На рисунке 3, а представлена визуализация в математическом пакете PTC MathCAD кинематической схемы синтезированного механизма [23, 24], а на рисунке 3, б – график полученной траектории движения т. M' , проходящей через заданные целевые точки.



а – кинематическая схемы синтезированного механизма; б – траектория движения т. M'

Рисунок 3 – Визуализация в математическом пакете PTC MathCAD кинематической схемы синтезированного плоского рычажного механизма и траектории движения т. M'

Оценку погрешности отклонения полученной траектории движения т. M' от заданных целевых точек будем проводить с помощью радиус-векторов. За отчетную точку радиус-вектора, т. O , примем центр тяжести плоской фигуры (эллипс, см. рисунок 3, б), ограниченной заданными точками, и определяемую с помощью выражения:

$$\underline{O} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \underline{M}_i.$$

Сравниваемые радиус-векторы $\underline{OM}_i$ (исходные данные) и $\underline{OM}^*$ (расчетные данные) получим по формулам:

$$\underline{OM}_i = \underline{M}_i - \underline{O}; \quad \underline{OM}^*(\varphi) = \underline{M}'(\varphi) - \underline{O}. \quad (7)$$

Здесь необходимо отметить, что для корректного сравнения между собой радиус-векторы (7) должны иметь одинаковый угол наклона к действительной оси комплексной плоскости, который можно найти из аргумента соответствующего вектора комплексного числа:

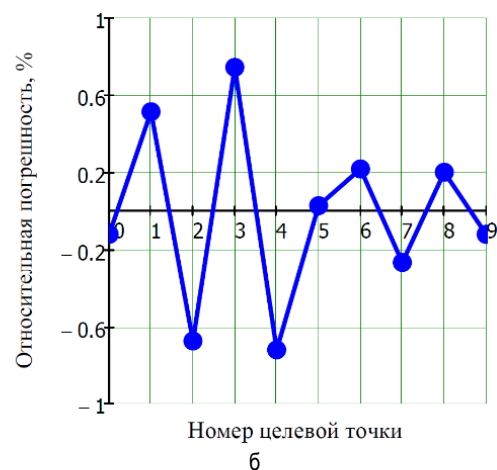
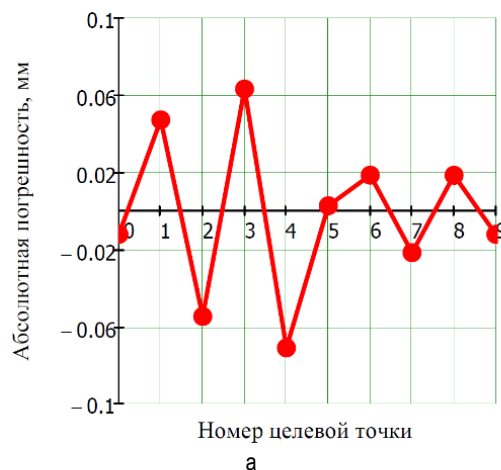
$$\beta_i = \arg(\underline{OM}_i).$$

Тогда абсолютную и относительную погрешность отклонения полученной траектории движения т. M' в заданных целевых точках вычислим как

$$\Delta_i = |\underline{OM}_i| - |\underline{OM}^*(\varphi(\beta_i))|; \quad \delta_i = \frac{\Delta_i}{|\underline{OM}^*(\varphi(\beta_i))|}.$$

Графики рассчитанных абсолютных и относительных погрешностей в каждой целевой точке траектории движения т. M приведены на рисунке 4.

Как видно из полученных результатов расчета, максимальная абсолютная погрешность отклонения траектории т. M' в контрольных точках не превышает в абсолютных величинах 0,1 мм или 1 % в относительных величинах. Это говорит о достаточно высокой точности рассчитанных величин вектора оптимизируемых параметров, а также подтверждает правильность постановки и решения полученной задачи обратного кинематического синтеза.



а – график абсолютной погрешности; б – график относительной погрешности

Рисунок 4 – Графики изменения абсолютной и относительной погрешности в целевых точках траектории движения т. M

Заключение

Предложенный способ обратного кинематического синтеза плоского рычажного механизма позволил обеспечить приближенное воспроизведение заданной траектории движения точки механизма с достаточно высокой точностью (расчетная погрешность в целевых точках не превысила 1 % в относительных единицах). В основе предложенного метода лежит решение обратной задачи кинематического синтеза с последующим формированием целевой функции в виде среднеквадратичного отклонения длины одного замыкающего звена.

Данный способ показал высокую адаптацию в математическом пакете PTC MathCAD, однако точность метода будет всецело зависеть от возможностей используемого оптимизационного алгоритма, способного находить глобальный минимум целевой функции с учетом наложенных ограничений.

Результаты работы могут быть использованы на практике при проектировании новых или модернизации существующих рычажных механизмов в различных отраслях машиностроения.

Список цитированных источников

1. Артоболевский, И. И. Теория механизма и машин: учебник / И. И. Артоболевский. – 4-е изд., перераб. и доп. / Репринтное воспроизведение издания 1988 г. – М. : Транспортная компания, 2023. – 640 с.
2. Кикин, А. А. Оптимизационный синтез шестизвенных направляющих механизмов для машин легкой промышленности : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.18 / Антон Андреевич Кикин. – СПб., 2010. – 150 с.
3. Халтурин, М. А. Синтез прямолинейно-направляющего механизма для отрезки заготовок эскимо / М. А. Халтурин // Вестник ВоГУ. Серия: Технические науки. – 2019. – № 1(3). – С. 27–34.
4. Зыкова, Е. П. Практическое применение кривошипно-коромыслового прямилы Чебышева / Е. П. Зыкова, Р. М. Мухтарбекова // World science: problems and innovations : сборник статей LXV Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 30 мая 2022 г. – Пенза : Наука и Просвещение, 2022. – С. 28–32.
5. Сункуев, Б. С. Синтез механизмов: учеб. пособие / Б. С. Сункуев. – Витебск : ВГТУ, 2001. – 84 с.
6. Артоболевский, И. И. Синтез плоских механизмов / И. И. Артоболевский, Н. И. Левитский, С. А. Черкудинов. – М. : Физматгиз, 1959. – 1084 с.
7. Гебель, Е. С. Математическая модель аппроксимационного синтеза рычажных механизмов / Е. С. Гебель, Б. И. Журсенбаев // Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования : материалы VII Всеросс. науч.-практ. конф. ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием), Омск, 26–27 апр. 2012 г. – Омск : СибАДИ, 2012. – Кн. 2. – С. 132–138.
8. Кінематичний синтез механізму регулювання форми стрічки конвеєра / В. Р. Пасіка, П. С. Коруняк, П. Л. Носко [та ін.] // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – 2018. – № 45 (1321). – С. 47–58. – DOI: 10.20998/2413-4295.2018.45.07.
9. Халтурин, М. А. Синтез шарнирного четырехзвенного механизма конвейера с прерывистым движением тяговых цепей / М. А. Халтурин // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2018. – № 4 (121). – С. 92–108. – DOI: 10.18698/0236-3941-2018-4-92-108.
10. Бейсенов, Н. К. Оптимизационно-метрический синтез шарнирного четырехзвенника / Н. К. Бейсенов // Технические науки – от теории к практике. – 2016. – № 55. – С. 65–77.
11. Люминарский, С. Е. Метрический синтез кривошипно-ползунного механизма / С. Е. Люминарский, И. Е. Люминарский // Альманах современной науки и образования. – 2017. – № 2 (116). – С. 80–86.
12. Борисов, И. И. Разработка метода геометрического синтеза и параметрической оптимизации механизма ноги галопирующего робота / И. И. Борисов, Д. С. Монич, С. А. Колюбин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Т. 19, № 5. – С. 832–839. – DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-832-839.
13. Куцополенко, А. В. Геометрический анализ шарнирного механизма центробежного ограничителя скорости лифта с двумя выходными звеньями / А. В. Куцополенко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2024. – № 4 (69). – С. 61–69. – DOI: 10.46864/1995-0470-2024-4-69-61-69.
14. Кинематический и силовой анализ механизма привода двухстанной очистки зерноуборочного комбайна / Д. А. Дубовик, В. И. Прибыльский, А. А. Новиков, А. Н. Вырский // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – № 6. – С. 78–90. – DOI: 10.1134/S023571191906004X.
15. Котов, А. В. Оценка возможности применения метода деформируемого многогранника к задаче оптимизационного кинематического синтеза плоского рычажного механизма / А. В. Котов, Д. Г. Кроль // Механика. Исследования и инновации. – 2025. – № 18. – С. 81–89.
16. An evolutionary algorithm for path synthesis of mechanisms / J. A. Cabrera, A. Ortiz, F. Nadal, J. Castillo // Mechanism and Machine Theory. – 2011. – Vol. 46. – P. 127–141. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.10.003.
17. A new approach for the optimal synthesis of four-bar path generator linkages / N. N. Romero, A. Campos, D. Martins, R. S. Vieira // Applied Sciences. Springer Science and Business Media LLC. – 2019. – Vol. 1. – P. 1504. – DOI: 10.1007/s42452-019-1511-3.
18. Optimum Synthesis of Four-Bar Mechanism by Using Relative Angle Method: A Comparative Performance Study / L. E. Valencia-Segura, M. G. Villarreal-Cervantes, L. G. Corona-Ramirez [et al.] // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 132990–133010. – DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3115444.
19. Котов, А. В. Исследование эксплуатационных характеристик механизма агрегатирования самоходной уборочной косилки методом математического моделирования / А. В. Котов, Д. Г. Кроль // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–17 окт. 2025 г. / редкол.: П. П. Казакевич [и др.] – Минск : Беларуская навука, 2025. – С. 120–125.
20. Котов, А. В. Кинематический и силовой анализ механизма подъема наклонной камеры зерноуборочного комбайна с применением теории комплексных чисел / А. В. Котов, Д. Г. Кроль // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения : сборник научных работ. – 2025. – № 1 (24). – С. 40–48.
21. Гальченко, В. Я. MathCAD: математические методы и инструментальные средства оптимизации / В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецкая. – Черкассы : ЧП Гордиенко Е. И., 2018. – 516 с.
22. Орловский, Б. В. Метрический синтез обернутого кулисного механизма ниткопритягивача швейной машины. Повідомлення 2 / Б. В. Орловський, В. М. Дворжак, Є. С. Радченко // Технології та дизайн. – 2012. – № 1. – С. 1–9.
23. Котов, А. В. Способ графического отображения математических моделей плоских рычажных механизмов с помощью матриц однородного преобразования / А. В. Котов // XIX Машеровские чтения : материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Витебск, 24 октября 2025 г. : в 2 т. / редкол.: Е. Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.] – Витебск : ВГУ им. П. М. Машерова, 2025. – Т. 1. – С. 25–28.
24. Котов, А. В. Способ визуализации решения кинематических задач для плоских рычажных механизмов сельскохозяйственных машин с помощью матриц однородного преобразования координат / А. В. Котов, Д. Г. Кроль // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. науч. статей 9-й междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч., Гомель, 5 нояб. 2025 г. / Гомсельмаш. – Гомель, 2025. – Ч. 1. – С. 131–136.

References

1. Artobolevskij, I. I. Teoriya mekhanizma i mashin: uchebnik / I. I. Artobolevskij. – 4-e izd., pererab. i dop. / Reprintnoe vosproizvedenie izdaniya 1988 g. – M. : Transportnaya kompaniya, 2023. – 640 s.

2. Kikin, A. A. Optimizatsionnyy sintez shestizvennykh napravlyayushchikh mekhanizmov dlya mashin legkoj promyshlennosti : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.02.18 / Anton Andreevich Kikin. – SPb., 2010. – 150 s.
3. Halturin, M. A. Sintez pryamolinejno-napravlyayushchego mekhanizma dlya otrezki zagotovok eskimo / M. A. Halturin // Vestnik VoGU. Seriya: Tekhnicheskie nauki. – 2019. – № 1(3). – S. 27–34.
4. Zykova, E. P. Prakticheskoe primeneniye krivoshipno-koromyslovogo pryamila Chebysheva / E. P. Zykova, R. M. Muhtarbekova // World science: problems and innovations : sbornik statej LXV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Penza, 30 maya 2022 g. – Penza : Nauka i Prosveshchenie, 2022. – S. 28–32.
5. Sunkuev, B. S. Sintez mekhanizmov: ucheb. posobie / B. S. Sunkuev. – Vitebsk : VGTU, 2001. – 84 s.
6. Artobolevskij, I. I. Sintez ploskih mekhanizmov / I. I. Artobolevskij, N. I. Levitskij, S. A. Cherkudinov. – M. : Fizmatgiz, 1959. – 1084 s.
7. Gebel', E. S. Matematicheskaya model' approksimatsionnogo sinteza rychaznykh mekhanizmov / E. S. Gebel', B. I. Zhursenbaev // Razvitie dorozhno-transportnogo kompleksa i stroitel'noj infrastruktury na osnove racional'nogo prirodopol'zovaniya : materialy VII Vseross. nauch.-prakt. konf. FGBOU VPO «SibADI» (s mezhdunarodnym uchastiem), Omsk, 26–27 apr. 2012 g. – Omsk : SibADI, 2012. – Kn. 2. – S. 132–138.
8. Kinematichnij sintez mekhanizmu reguliruyannyya formi strichki konveera / V. R. Pasika, P. S. Korunyak, P. L. Nosko [ta in.] // Visnik NTU «HP». Seriya: Novi rishennya u suchasniy tekhnologiyah. – 2018. – № 45 (1321). – S. 47–58. – DOI: 10.20998/2413-4295.2018.45.07.
9. Halturin, M. A. Sintez sharnirnogo chetyrehzvennogo mekhanizma konveera s preryvistym dvizheniem tyagovykh cepej / M. A. Halturin // Vestnik MGU im. N. E. Baumana. Seriya Mashinostroenie. – 2018. – № 4 (121). – S. 92–108. – DOI: 10.18698/0236-3941-2018-4-92-108.
10. Bejsenov, N. K. Optimizatsionno-metricheskij sintez sharnirnogo chetyrehzvennika / N. K. Bejsenov // Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike. – 2016. – № 55. – S. 65–77.
11. Lyuminarskij, S. E. Metricheskij sintez krivoshipno-polzunnogo mekhanizma / S. E. Lyuminarskij, I. E. Lyuminarskij // Al'manah sovremennoj nauki i obrazovaniya. – 2017. – № 2 (116). – S. 80–86.
12. Borisov, I. I. Razrabotka metoda geometricheskogo sinteza i parametricheskoj optimizatsii mekhanizma nogi galopiruyushchego robota / I. I. Borisov, D. S. Monich, S. A. Kolyubin // Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki. – 2019. – T. 19, № 5. – S. 832–839. – DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-832-839.
13. Kucepolenko, A. V. Geometricheskij analiz sharnirnogo mekhanizma centrobezhnogo ogranichatelya skorosti lifta s dvumya vyhodnymi zven'yami / A. V. Kucepolenko // Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov. – 2024. – № 4 (69). – S. 61–69. – DOI: 10.46864/1995-0470-2024-4-69-61-69.
14. Kinematicheskij i silovoj analiz mekhanizma privoda dvuhstannojo ochistki zemouborochnogo kombajna / D. A. Dubovik, V. I. Pribyl'skij, A. A. Novikov, A. N. Vyrs'kij // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. – 2019. – № 6. – S. 78–90. – DOI: 10.1134/S023571191906004X.
15. Kotov, A. V. Ocenka vozmozhnosti primeneniya metoda deformiruemogo mnogogrannika k zadache optimizatsionnogo kinematicheskogo sinteza ploskogo rychaznogo mekhanizma / A. V. Kotov, D. G. Krol' // Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii. – 2025. – № 18. – S. 81–89.
16. An evolutionary algorithm for path synthesis of mechanisms / J. A. Cabrera, A. Ortiz, F. Nadal, J. Castillo // Mechanism and Machine Theory. – 2011. – Vol. 46. – P. 127–141. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.10.003.
17. A new approach for the optimal synthesis of four-bar path generator linkages / N. N. Romero, A. Campos, D. Martins, R. S. Vieira // Applied Sciences. Springer Science and Business Media LLC. – 2019. – Vol. 1. – P. 1504. – DOI: 10.1007/s42452-019-1511-3.
18. Optimum Synthesis of Four-Bar Mechanism by Using Relative Angle Method: A Comparative Performance Study / L. E. Valencia-Segura, M. G. Villarreal-Cervantes, L. G. Corona-Ramirez [et al.] // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 132990–133010. – DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3115444.
19. Kotov, A. V. Issledovanie ekspluatatsionnykh harakteristik mekhanizma agregirovaniya samohodnoj uborochnoj kosilki metodom matematicheskogo modelirovaniya / A. V. Kotov, D. G. Krol' // Nauchno-tekhnicheskij progress v sel'skohozyajstvennom proizvodstve : materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Minsk, 16–17 okt. 2025 g. / redkol.: P. P. Kazakevich [i dr.] – Minsk : Belaruskaya navuka, 2025. – S. 120–125.
20. Kotov, A. V. Kinematicheskij i silovoj analiz mekhanizma pod"ema naklonnoj kamery zernouborochnogo kombajna s primeneniem teorii kompleksnykh chisel / A. V. Kotov, D. G. Krol' // Konstruirovaniye, ispol'zovanie i nadezhnost' mashin sel'skohozyajstvennogo naznacheniya : sbornik nauchnykh rabot. – 2025. – № 1 (24). – S. 40–48.
21. Gal'chenko, V. YA. MathCAD: matematicheskie metody i instrumental'nye sredstva optimizatsii / V. YA. Gal'chenko, R. V. Tremboveckaya. – Cherkassy : CHP Gordienko E. I., 2018. – 516 s.
22. Orlov's'kij, B. V. Metrichnij sintez obremenogo kulisnogo mekhanizmu nitkoprit'yaguvacha shvejnoj mashini. Povidomlennyya 2 / B. V. Orlov's'kij, V. M. Dvorzhak, E. S. Radchenko // Tekhnologii ta dizajn. – 2012. – № 1. – S. 1–9.
23. Kotov, A. V. Sposob graficheskogo otobrazheniya matematicheskikh modelej ploskih rychaznykh mekhanizmov s pomoshch'yu matric odnorodnogo preobrazovaniya / A. V. Kotov // XIX Masherovskie chteniya : materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchennykh, Vitebsk, 24 oktyabrya 2025 g. : v 2 t. / redkol.: E. YA. Arshanskij (gl. red.) [i dr.] – Vitebsk : VGU im. P. M. Masherova, 2025. – T. 1. – S. 25–28.
24. Kotov, A. V. Sposob vizualizatsii resheniya kinematicheskikh zadach dlya ploskih rychaznykh mekhanizmov sel'skohozyajstvennykh mashin s pomoshch'yu matric odnorodnogo preobrazovaniya koordinat / A. V. Kotov, D. G. Krol' // Innovatsionnye tekhnologii v agropromyshlennom komplekse – segodnya i zavtra : sb. nauch. statej 9-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 2 ch., Gomel', 5 noyab. 2025 g. / Gomsel'mash. – Gomel', 2025. – CH. 1. – S. 131–136.

Материал поступил 05.06.2026, одобрен 01.07.2026,
принят к публикации 06.07.2026

УДК 621.793

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГИБРИДНЫХ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ AlTiN НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ

**Е. В. Овчинников¹, Н. М. Чека², И. П. Акула³, А. И. Веремейчик⁴, А. Е. Овчинников⁵,
Е. И. Эйсымонт⁶**

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., заведующий лабораторией наноматериалов и ионно-плазменных процессов, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: pec@bas-net.by

³ К. т. н., ведущий научный сотрудник лаборатории наноматериалов и ионно-плазменных процессов, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: shark@phti.by

⁴ К. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vai_mrtm@bstu.by

⁵ Студент инженерного факультета, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: hugaralex@mail.ru

⁶ К. т. н., доцент кафедры логистики и методов управления, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: ya.eisymont@gmail.com

Реферат

Одним из эффективных способов повышения ресурса металлорежущего инструмента является формирование на его рабочей поверхности тонких износостойких покрытий на основе нитридов переходных металлов, среди которых особый интерес представляют покрытия системы AlTiN. В статье исследовано влияние состава многофункциональных вакуумных покрытий системы AlTiN, AlTiCN, AlTiCF, AlTiNCF, сформированных методом катодно-дугового физического осаждения из паровой фазы (PVD), на физико-механические, триботехнические и поверхностно-энергетические свойства быстрорежущей стали Р6М5. Проведен комплекс экспериментальных исследований, включающий измерение микротвердости, коэффициента трения, анализ морфологии поверхности методом атомно-силовой микроскопии, исследование шероховатости и определение поверхностной энергии по краевым углам смачивания. Установлено, что изменение химического состава покрытий существенно влияет на особенности формирования их микроструктуры, размеры кристаллитов, параметры шероховатости формируемых слоев. Введение углерода способствует уплотнению структуры покрытия, снижению размеров структурных элементов и повышению равномерности распределения микронеровностей. Дополнительное легирование фтором приводит к уменьшению поверхностной энергии и снижению адгезионного взаимодействия с жидкими средами, что сопровождается уменьшением коэффициента трения. Показано, что покрытия AlTiCF обладают наиболее благоприятным сочетанием микротвердости, шероховатости и морфологии поверхности, тогда как покрытия AlTiNCF характеризуются минимальной поверхностной энергией и наиболее выраженными антиадгезионными свойствами. Предложен механизм повышения триботехнических характеристик, основанный на совместном влиянии дисперсионного упрочнения, формирования плотной наноструктуры покрытия и образования низкоэнергетического поверхностного слоя. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанные покрытия для повышения долговечности режущего инструмента, работающего в условиях интенсивного абразивного и адгезионного изнашивания.

Ключевые слова: PVD-покрытия, алитины, фтор, быстрорежущая сталь, микротвердость, поверхностная энергия, коэффициент трения, атомно-силовая микроскопия, трибология.

INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF HYBRID AlTiN VACUUM COATINGS ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED STEELS

Y. V. Auchynnikau, N. M. Chekan, I. P. Akula, A. I. Verameichyk, A. Y. Auchynnikau, E. I. Eysymont

Abstract

One of the effective ways to increase the life of a metal cutting tool is to form thin wear-resistant coatings on its working surface based on transition metal nitrides, among which the coatings of the AlTiN system are of particular interest. The article examines the effect of the composition of multifunctional vacuum coatings of the AlTiN, AlTiCN, AlTiCF, AlTiNCF system formed by the method of cathode-arc physical vapor deposition (PVD) on the physico-mechanical, tribotechnical and surface-energy properties of high-speed steel R6M5. The study included microhardness measurements, friction coefficient determination, atomic force microscopy, surface roughness analysis and surface free energy evaluation using contact angle measurements. The results demonstrate that the chemical composition of the coatings significantly affects the formation of the columnar microstructure, grain refinement and surface morphology. Carbon alloying promotes densification of the coating structure and decreases the characteristic size of structural elements, whereas fluorine incorporation reduces the surface free energy and adhesion, resulting in lower friction coefficients. Among the investigated coatings, AlTiCF exhibits the optimum combination of hardness, morphology and roughness, while AlTiNCF provides the lowest surface energy and the highest anti-adhesive performance. A mechanism explaining the improvement in tribological properties through grain refinement, dense nanostructure formation and low-energy surface layer development is proposed. The obtained results demonstrate the potential of the developed coatings for increasing the service life of cutting tools operating under severe abrasive and adhesive wear conditions.

Keywords: PVD coatings, AlTiN, AlTiCN, AlTiCF, AlTiNCF, high-speed steel, microhardness, surface free energy, tribology, AFM.

Введение

Одним из наиболее эффективных способов повышения ресурса металлорежущего инструмента является формирование на его рабочей поверхности тонких износостойких покрытий, обладающих высокой твердостью, термической стабильностью и низким коэффициентом трения. Наибольшее распространение в современной инструментальной

промышленности получили покрытия на основе нитридов переходных металлов, сформированные методами физического осаждения из паровой фазы (Physical Vapor Deposition, PVD) [1, 2]. Среди них особый интерес представляют покрытия системы AlTiN, сочетающие высокую твердость, устойчивость к окислению при повышенных температурах и способность сохранять эксплуатационные свойства при интенсивных

Машиностроение

механических нагрузках [3–5]. Повышение эксплуатационных характеристик таких покрытий в настоящее время достигается преимущественно за счет модифицирования их химического состава и управления процессами формирования микроструктуры в ходе осаждения. Известно, что введение углерода способствует образованию более дисперсной структуры, уменьшению размеров кристаллитов и повышению сопротивления пластической деформации. Одновременно модифицирование покрытия фторсодержащими компонентами позволяет существенно снизить поверхностную энергию и уменьшить адгезионное взаимодействие между поверхностями трения, что положительно сказывается на коэффициенте трения и интенсивности изнашивания. Несмотря на большое количество работ, посвященных покрытиям AlTiN [6–8], вопросы комплексного влияния одновременного легирования углеродом и фтором на структурное состояние покрытия, его триботехнические характеристики и поверхностную энергию остаются недостаточно изученными. Большинство исследований рассматривает отдельные свойства покрытий без установления взаимосвязи между микроструктурой, морфологией поверхности, параметрами шероховатости и поверхностной энергией, тогда как именно совокупность этих факторов определяет работоспособность режущего инструмента в условиях реальной эксплуатации [9–14]. Кроме того, практически отсутствуют работы, в которых одновременно анализируются изменения микротвердости, коэффициента трения, морфологии поверхности и энергетического состояния покрытий системы AlTiN, AlTiCN, AlTiCF, AlTiNCF, сформированных при идентичных технологических режимах. Такой комплексный подход позволяет установить механизмы формирования функциональных свойств покрытий и определить оптимальные направления их дальнейшей модификации.

Представляет интерес в установлении взаимосвязи между химическим составом покрытий AlTiN, AlTiCN, AlTiCF, AlTiNCF и особенностями формирования их микроструктуры, морфологией поверхности, поверхностной энергией и триботехническими характеристиками.

Целью работы является исследование влияния состава многофункциональных вакуумных покрытий AlTiN, AlTiCN, AlTiCF и AlTiNCF на физико-механические, триботехнические и поверхностно-энергетические свойства быстрорежущей стали P6M5, а также установление механизмов формирования их эксплуатационных характеристик.

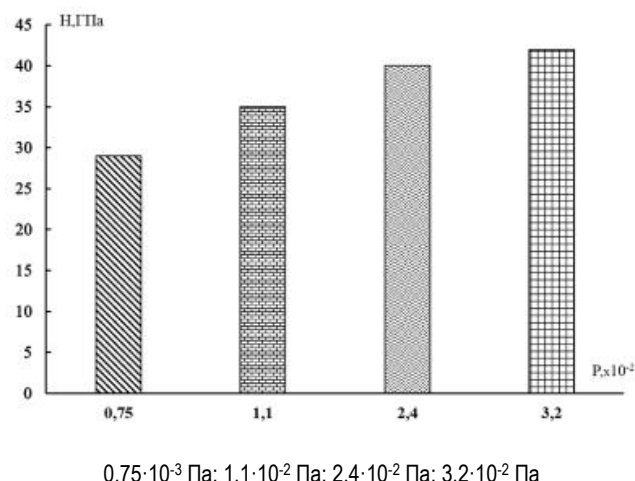
Материалы и методы исследований

В качестве материала подложки использовали быстрорежущую сталь P6M5 после стандартной термической обработки с твердостью 63–66 HRC. Перед нанесением покрытий поверхность образцов подвергали последовательному шлифованию и полированию до достижения средней арифметической шероховатости не более 0,16–0,20 мкм, после чего выполняли ультразвуковую очистку и ионную активацию поверхности высокочастотными ионами аргона. Покрытия формировали методом катодно-дугового физического осаждения из паровой фазы (Cathodic Arc PVD) на вакуумной установке УВНИПА-1-001, оснащенной катодно-дуговым испарителем с электромагнитной фильтрацией плазменного потока и ионным источником ИИ-4-0,15. Использование предварительной ионной очистки обеспечивало удаление поверхностных загрязнений, разрушение оксидных пленок и повышение адгезии покрытия к металлической подложке. В процессе осаждения изменяли давление реакционного азота и величину отрицательного потенциала смещения на подложке, что позволяло регулировать энергию осаждаемых частиц и особенности формирования столбчатой структуры покрытия. Исследовали покрытия AlTiN, а также модифицированные покрытия AlTiCN, AlTiCF и AlTiNCF. Микротвердость покрытий определяли методом инструментального индентирования на микротвердометре HWMHT-X7 при нагрузках от 1 до 30 Н. Для каждого режима выполняли не менее десяти измерений, после чего рассчитывали средние значения и стандартные отклонения. Триботехнические испытания проводили на машине трения FT-2 по схеме «шар–диск» при нормальной нагрузке до 30 Н, скорости скольжения 0,036 м/с и температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$. В качестве контртела использовали сталь ШХ15. По результатам испытаний определяли коэффициент трения и оценивали характер изнашивания поверхностей. Исследование морфологии поверхности выполняли методом атомно-силовой микроскопии в режиме полуконтактного сканирования. По полученным трехмер-

ным изображениям анализировали размеры структурных элементов, особенности роста столбчатых кристаллитов, распределение высот поверхности и параметры микрорельефа. Поверхностную энергию покрытий определяли методом измерения краевых углов смачивания с использованием воды и глицерина в качестве тестовых жидкостей. Расчет дисперсионной и полярной составляющих поверхностной энергии выполняли по методу Оуэнса – Вендта с последующим определением полной удельной поверхностной энергии. Для интерпретации полученных результатов использовали комплексный подход, основанный на сопоставлении данных микротвердости, морфологии поверхности, триботехнических характеристик и поверхностной энергии, что позволило установить взаимосвязь между структурным состоянием покрытий и их эксплуатационными свойствами.

Результаты исследований

Одним из основных критериев эффективности вакуумных покрытий, предназначенных для повышения эксплуатационной долговечности режущего инструмента, является их микротвердость (рисунок 1). Именно данный параметр определяет сопротивление локальной пластической деформации, зарождению микротрещин и интенсивности абразивного изнашивания контактирующих поверхностей. Результаты экспериментальных исследований показали, что изменение параметров процесса катодно-дугового осаждения оказывает существенное влияние на формирование структуры покрытий и их механические характеристики. При увеличении давления реакционного азота наблюдается устойчивое повышение микротвердости покрытий AlTiN независимо от величины отрицательного потенциала смещения. Установленная закономерность свидетельствует об изменении механизма формирования покрытия при увеличении давления реакционного газа. Рост концентрации азота сопровождается уменьшением средней длины свободного пробега ионов, увеличением количества центров кристаллизации и снижением размеров формирующихся столбчатых зерен. В результате развивается более мелкодисперсная структура покрытия, обладающая повышенным сопротивлением пластической деформации. С позиций механизма Холла – Петча уменьшение размеров зерен приводит к увеличению числа границ раздела, препятствующих движению дислокаций, вследствие чего возрастает микротвердость сформированного покрытия. Вместе с тем повышение давления реакционного газа сопровождается снижением скорости роста отдельных столбчатых кристаллов и увеличением плотности упаковки покрытия. Это уменьшает вероятность образования межзеренных пор и снижает концентрацию технологических дефектов, являющихся потенциальными концентраторами напряжений. Полученные результаты хорошо согласуются с современными представлениями о процессах формирования покрытий, содержащих в своем составе азот, согласно которым повышение давления реакционного газа способствует переходу от крупнотолбчатой структуры к более плотной нанокристаллической морфологии.



0,75·10⁻³ Па; 1,1·10⁻² Па; 2,4·10⁻² Па; 3,2·10⁻² Па
Рисунок 1 – Зависимость микротвердости покрытий AlTiN от давления реакционного азота

Не менее важной характеристикой является изменение микротвердости по глубине покрытия (рисунок 2). Исследование распределения твердости по толщине сформированного слоя показало наличие выраженного градиента механических свойств. Максимальные значения микротвердости наблюдаются в поверхностной части покрытия, после чего по мере увеличения глубины отпечатка происходит постепенное уменьшение измеряемых значений. Данная закономерность объясняется уменьшением вклада покрытия в общую несущую способность системы «покрытие-подложка». При глубине внедрения индентора, превышающей приблизительно половину толщины покрытия, в процесс пластической деформации начинает активно вовлекаться материал подложки, обладающий значительно меньшей твердостью.

Экспериментально установлено, что эффективная толщина покрытия составляет около 1,5–2,0 мкм, тогда как общая глубина модифицированного слоя достигает приблизительно 3 мкм. Это свидетельствует о формировании плотного рабочего слоя, обеспечивающего основную долю сопротивления контактному нагружению.

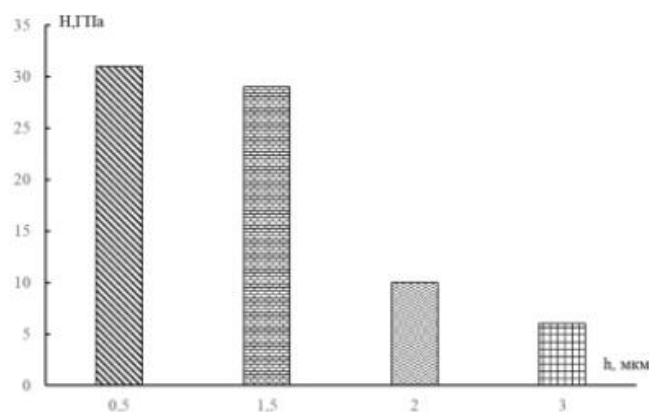


Рисунок 2 – Зависимость микротвердости покрытия на основе алтинов от глубины внедрения индентора, давление газов в вакуумной камере $0,75 \cdot 10^{-3}$ Па

Наряду с высокой твердостью важнейшим эксплуатационным параметром современных инструментальных покрытий является коэффициент трения. Испытания показали, что увеличение давления реакционного азота сопровождается уменьшением коэффициента трения практически для всех исследованных режимов формирования покрытий (рисунок 3). Снижение коэффициента трения обусловлено совокупным влиянием нескольких факторов. Во-первых, повышение плотности покрытия уменьшает количество открытых пор и дефектов поверхности, являющихся центрами схватывания контактирующих материалов. Во-вторых, уменьшение размеров структурных элементов приводит к более равномерному распределению контактных напряжений. В-третьих, формирование более гладкого рельефа поверхности снижает вероятность механического зацепления микронеровностей. Таким образом, изменение структуры покрытия непосредственно влияет на характер контактного взаимодействия поверхностей трения.

Следует отметить, что между микротвердостью покрытия и коэффициентом трения существует выраженная корреляционная зависимость. По мере повышения микротвердости уменьшается глубина внедрения микронеровностей контртела, вследствие чего снижается площадь фактического контакта поверхностей. Кроме того, уменьшение пластической деформации покрытия препятствует развитию адгезионного взаимодействия между поверхностями трения. Таким образом, рост микротвердости сопровождается уменьшением коэффициента трения. Дополнительная обработка сформированных покрытий растворами фторсодержащих олигомеров приводит к существенному изменению их трибологических характеристик (рисунок 4).

По сравнению с исходными покрытиями наблюдается дальнейшее уменьшение коэффициента трения и увеличение микротвердости поверхностного слоя. Несмотря на сравнительно небольшую толщину сформированной фторорганической пленки, ее влияние на процессы

контактного взаимодействия оказывается весьма существенным. Это объясняется тем, что молекулы фторорганических соединений химически взаимодействуют с поверхностью нитридного покрытия и формируют тонкий слой с чрезвычайно низкой поверхностной энергией. Одновременно происходит частичное заполнение микропор и микродефектов покрытия. В результате уменьшается концентрация локальных напряжений, снижается вероятность зарождения микротрещин и уменьшается интенсивность адгезионного взаимодействия между поверхностями трения. Кроме того, фторорганический слой характеризуется крайне низким сопротивлением межмолекулярному сдвигу. Вследствие этого при относительном перемещении контактирующих поверхностей реализуется механизм самосмазывания, аналогичный наблюдаемому в покрытиях на основе политетрафторэтилена. В результате коэффициент трения уменьшается, а стабильность процесса трения существенно возрастает.

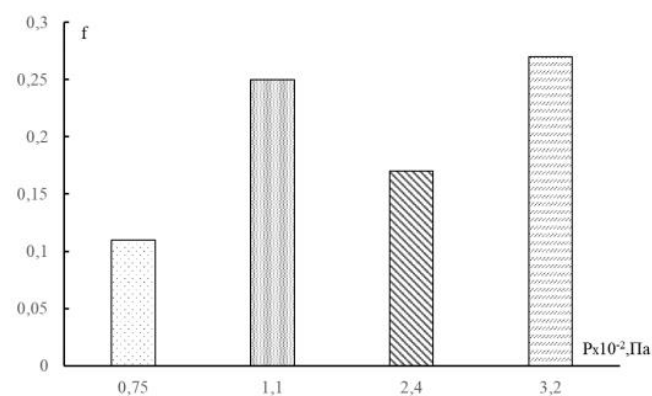
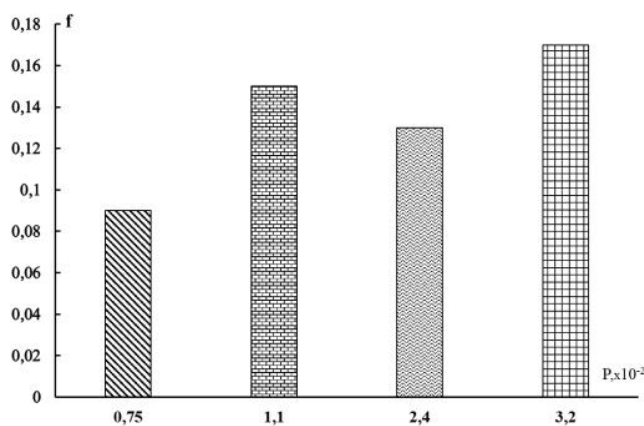


Рисунок 3 – Значения коэффициента трения пары алтин-ШХ15 от значения давления реакционного газа в вакуумной камере



Количество обработок в растворе ФСО n=3

Рисунок 4 – Значения коэффициента трения пары алтин-ШХ15, модифицированный фторсодержащими олигомерами, от значения давления реакционного газа в вакуумной камере

Одним из факторов, определяющих эксплуатационные свойства вакуумных покрытий, является морфология их поверхности, формирующаяся непосредственно в процессе конденсации парового потока (рисунок 5). Геометрия структурных элементов оказывает определяющее влияние на контактную жесткость, распределение локальных напряжений, фактическую площадь контакта, коэффициент трения и интенсивность изнашивания. Для анализа особенностей формирования поверхностного слоя покрытия исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Полученные трехмерные изображения позволили установить характер изменения микрорельефа в зависимости от химического состава покрытий (рисунок 6). Исследования показали, что покрытие AlTiN характеризуется выраженной столбчатой морфологией с развитым микрорельефом, состоящим из крупных глобулярных образований, формирующихся в результате

роста отдельных кристаллитов. Поверхность отличается значительной амплитудой высот и наличием локальных выступов, которые являются вершинами столбчатых зерен (рисунок 6). При модифицировании покрытия углеродом (AlTiCN) наблюдается существенное изменение характера роста. Размер глобулярных образований уменьшается, распределение структурных элементов становится значительно более равномерным, а профиль поверхности приобретает более регулярный характер. Это свидетельствует о переходе процесса роста покрытия в режим формирования мелкодисперсной нанокристаллической структуры. Наиболее существенные изменения происходят после введения фтора. Поверхность покрытий AlTiCF становится значительно более сглаженной, уменьшается амплитуда микронеровностей, а размеры отдельных структурных элементов приобретают практически одинаковые значения. Покрытие AlTiNCF, несмотря на сохранение достаточно развитой микро-структуры, характеризуется наиболее однородным распределением поверхностной энергии вследствие формирования поверхностного фторсодержащего слоя. Полученные результаты свидетельствуют

о том, что изменение химического состава покрытий оказывает влияние не только на фазовый состав, но и на механизм роста покрытия непосредственно во время его осаждения. Формирование исследуемых покрытий осуществляется в условиях высокотемпературного катодно-дугового осаждения, при котором механизм роста определяется одновременно энергией падающих ионов, скоростью конденсации материала и температурой поверхности подложки. Согласно современной модели структурных зон Торнтона (Structure Zone Model, SZM), морфология покрытий AlTiN соответствует переходной области между зонами Zone T и Zone II, где формируются плотные столбчатые кристаллиты с ограниченной поперечной диффузией адатомов (рисунок 5). В начальной стадии осаждения на поверхности подложки возникают многочисленные центры кристаллизации, которые по мере увеличения толщины покрытия начинают конкурировать между собой за поток поступающих атомов. Вследствие эффекта геометрического экранирования наиболее быстро растущие зерна начинают перекрывать соседние области, формируя характерную столбчатую структуру.

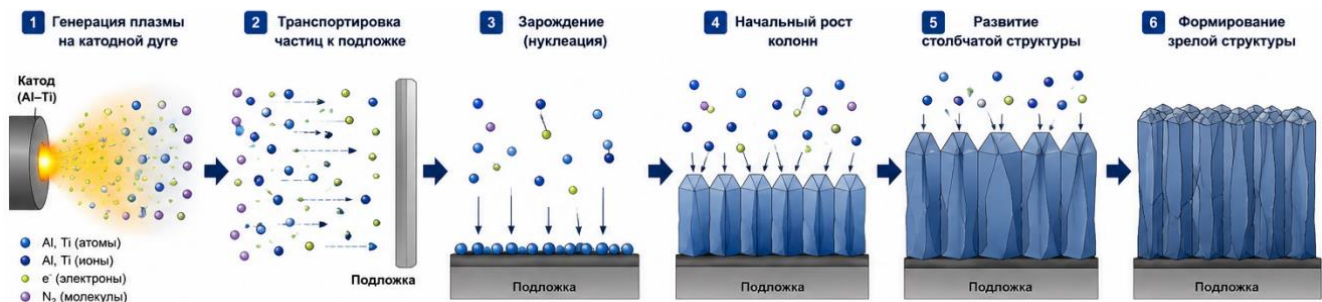
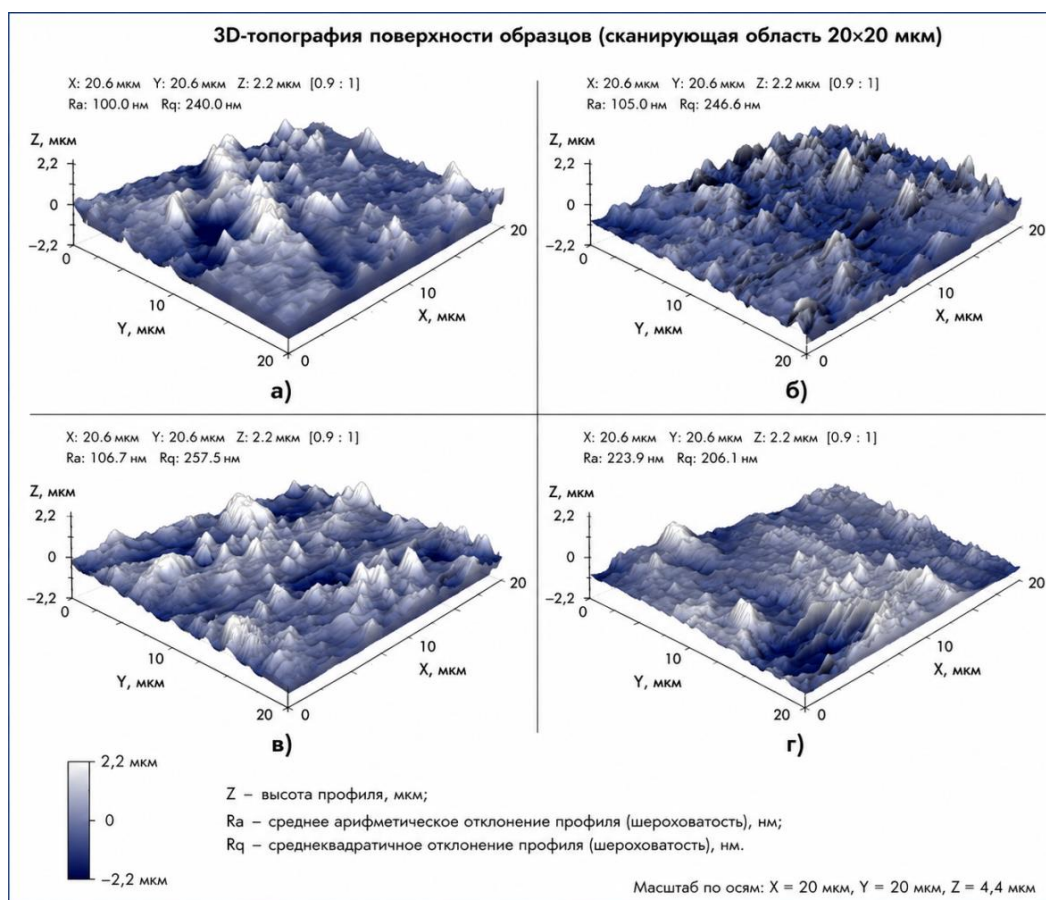


Рисунок 5 – Схема формирования столбчатой структуры покрытия AlTiN при катодно-дуговом осаждении



а – AlTiN, б – AlTiCN, в – AlTiCF, г – AlTiNCF

Рисунок 6 – Морфология поверхностей покрытий алтинов

Введение углерода существенно изменяет кинетику данного процесса. Атомы углерода, обладая меньшими размерами по сравнению с атомами титана и алюминия, концентрируются преимущественно в приграничных областях между растущими зёрнами, препятствуя их дальнейшему укрупнению. В результате происходит образование значительно большего количества центров роста при уменьшении среднего размера каждого кристаллита. Данный процесс приводит к возникновению эффекта дисперсионного упрочнения покрытия. Одновременно уменьшается вероятность образования крупных межзеренных пустот и дефектов. Морфология поверхности определяет характер взаимодействия покрытия с контртелом уже на начальном этапе контактирования. Для покрытия AlTiN наличие крупных выступающих столбчатых зёрен приводит к локальной концентрации контактных напряжений.

При приложении нагрузки первоначальный контакт реализуется лишь на ограниченном числе наиболее высоких микронеровностей. В этих областях возникают максимальные контактные напряжения, способствующие развитию локальной пластической деформации и микросколов покрытия. Кроме того, выступающие вершины становятся центрами зарождения адгезионного взаимодействия между покрытием и контртелом. Это объясняет относительно более высокие значения коэффициента трения по сравнению с модифицированными покрытиями. После введения углерода происходит выравнивание распределения высот поверхности. Количество контактирующих микровыступов увеличивается, однако нагрузка перераспределяется между значительно большим числом структурных элементов. В результате уменьшается максимальная величина локальных напряжений. Для покрытия AlTiCN данный эффект проявляется наиболее выражено. Поверхность характеризуется высокой однородностью распределения высот и отсутствием доминирующих выступающих вершин. Фактическая площадь контакта увеличивается постепенно, без возникновения локальных перегрузок. Это обеспечивает стабильный режим трения и минимальную вероятность образования микротрещин. Таким образом, морфология покрытия непосредственно определяет его способность воспринимать контактные нагрузки. Параметры шероховатости отражают не только качество поверхности, но и особенности процессов формирования покрытия на наномасштабном уровне. Установлено, что изменение морфологии сопровождается закономерным изменением параметров R_a , R_q и R_z . Для покрытия AlTiN характерны максимальные значения полной высоты профиля вследствие интенсивного развития столбчатых зёрен. После введения углерода происходит уменьшение средней арифметической шероховатости, что связано со снижением размеров глобулярных структур. Фторсодержащие покрытия характеризуются наиболее равномерным распределением высот поверхности. Уменьшение параметра R_z свидетельствует о снижении вероятности появления локальных концентраторов напряжений. Снижение значений R_q отражает уменьшение среднеквадратического отклонения высот, что приводит к более равномерному распределению контактных нагрузок.

Поверхностная энергия является одной из важнейших характеристик функциональных покрытий, определяющей характер их взаимодействия с жидкими средами, смазочно-охлаждающими жидкостями и контактирующими материалами. Для режущего инструмента данный параметр во многом определяет интенсивность адгезионного изнашивания, склонность к налипанию обрабатываемого материала и стабильность процесса резания. В настоящей работе поверхностную энергию исследовали методом определения краевых углов смачивания водой и глицерином с последующим расчетом дисперсионной и полярной составляющих по методу Оуэнса – Вендта. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Поверхностно-энергетические характеристики исследуемых покрытий

Покрытие	Угол смачивания водой, °	Поверхностная энергия, мДж/м ²
P6M5	43,6	54,47
AlTiN	17,2	301,08
AlTiCN	40,0	260,17
AlTiCF	50,3	194,11
AlTiNCF	55,9	174,61

Из представленных данных следует, что после нанесения покрытия характер поверхностного состояния существенно изменяется. Наибольшая поверхностная энергия характерна для покрытия AlTiN, что обусловлено высокой плотностью ненасыщенных химических связей на поверхности нитридной керамики. Высокая концентрация активных центров способствует интенсивному взаимодействию поверхности с полярными жидкостями, что проявляется в минимальном краевом угле смачивания.

Введение углерода приводит к снижению полной поверхностной энергии приблизительно на 14 %, тогда как модифицирование фтором обеспечивает уменьшение данного параметра более чем на 35 %. Максимальное снижение наблюдается для покрытия AlTiNCF, обладающего наиболее низкой поверхностной энергией среди исследованных образцов.

Полученные результаты свидетельствуют, что именно химический состав поверхностного слоя является основным фактором, определяющим энергетическое состояние покрытия.

Таким образом, изменение параметров шероховатости является следствием изменения механизма роста покрытия. На основании проведенных исследований предложена схема формирования комплекса эксплуатационных характеристик разработанных покрытий. На первом этапе катодно-дугового осаждения формируется плотная столбчатая структура AlTiN с высокой микротвердостью. На втором этапе введение углерода приводит к измельчению зёрен, увеличению числа границ раздела и формированию более плотной нанокристаллической структуры. На третьем этапе модифицирование поверхности фтором сопровождается образованием тонкого поверхностного слоя с пониженной поверхностной энергией. Совместное действие указанных процессов обеспечивает: повышение микротвердости покрытия; уменьшение шероховатости поверхности; снижение концентрации остаточных напряжений; уменьшение коэффициента трения; снижение адгезионного взаимодействия; повышение сопротивления микросколам; увеличение эксплуатационного ресурса покрытия. Полученные результаты свидетельствуют, что изменение химического состава покрытий оказывает комплексное влияние на процессы их формирования. Введение углерода изменяет кинетику роста столбчатых кристаллитов и способствует развитию мелкодисперсной структуры, тогда как фтор преимущественно модифицирует поверхностный слой, снижая его свободную поверхностную энергию. Сочетание этих механизмов обеспечивает синергетический эффект: повышается сопротивление пластической деформации, уменьшается концентрация локальных контактных напряжений и снижается склонность к адгезионному изнашиванию. Комплексный анализ результатов позволяет сделать вывод, что эксплуатационные свойства исследуемых покрытий определяются не отдельным параметром, а совокупностью взаимосвязанных структурных, механических и энергетических факторов [16–18]. В отличие от большинства исследований, в которых основное внимание уделяется исключительно повышению микротвердости, в настоящей работе показано, что максимальная износостойкость покрытий достигается при оптимальном сочетании высокой твердости, развитой наноструктуры, низкой шероховатости и минимальной поверхностной энергии [19–22]. Полученные закономерности хорошо согласуются с современными представлениями о механизмах упрочнения многокомпонентных нитридных покрытий. Известно, что при катодно-дуговом осаждении формируется выраженная столбчатая структура, размеры которой определяются подвижностью адатомов на поверхности роста. Введение углерода уменьшает скорость роста отдельных столбчатых зёрен и увеличивает плотность центров кристаллизации. Вследствие этого происходит переход к более мелкодисперсной структуре с высокой плотностью границ зёрен. Увеличение числа границ раздела приводит к росту сопротивления движению дислокаций и реализует механизм дисперсионного упрочнения, описываемый зависимостью Холла-Петча. Одновременно уменьшается вероятность образования межзеренных пор и снижается концентрация технологических дефектов. Следующим этапом повышения эксплуатационных характеристик является модифицирование поверхности фторсодержащими компонентами. Полученные результаты свидетельствуют, что влияние фтора проявляется преимущественно не в изменении объемной структуры покрытия, а в трансформации

поверхностного слоя толщиной несколько нанометров. Формирование химически стабильных связей Ti–F и C–F сопровождается уменьшением количества ненасыщенных поверхностных связей, вследствие чего резко снижается поверхностная энергия. Данный эффект определяет уменьшение работы адгезии между покрытием и материалом контртела, что сопровождается снижением коэффициента трения и интенсивности адгезионного изнашивания. Следовательно, углерод и фтор выполняют различные функциональные задачи. Углерод преимущественно формирует высокопрочную наноструктуру покрытия, тогда как фтор обеспечивает необходимое энергетическое состояние поверхности. Именно сочетание этих двух механизмов определяет синергетический эффект повышения эксплуатационных характеристик разработанных покрытий.

Выводы

В ходе проведенных исследований установлено, что химический состав исследуемых покрытий оказывает определяющее влияние на процессы формирования их микроструктуры, морфологии поверхности и комплекса эксплуатационных свойств. Введение углерода способствует уменьшению размеров столбчатых кристаллитов, увеличению плотности покрытия и повышению микротвердости вследствие реализации механизма дисперсионного упрочнения. Легирование поверхности фтором сопровождается существенным снижением поверхностной энергии вследствие образования химически стабильных связей Ti–F и C–F и уменьшения концентрации активных поверхностных центров. Установлено, что снижение поверхностной энергии сопровождается уменьшением работы адгезии и коэффициента трения, что способствует повышению износостойкости покрытий. Выявлена корреляционная зависимость между морфологией поверхности, параметрами шероховатости, поверхностной энергией и трибологическими характеристиками покрытий. Наиболее сбалансированным комплексом физико-механических и трибологических характеристик обладает покрытие AlTiCF, тогда как покрытие AlTiNCF характеризуется минимальной поверхностной энергией и наиболее выраженными антиадгезионными свойствами. Предложенный механизм совместного влияния углерода и фтора позволяет объяснить повышение эксплуатационных характеристик разработанных покрытий и может быть использован при проектировании новых многофункциональных защитных покрытий для режущего инструмента.

Список цитированных источников

- Influence of TiAlN coatings thickness indry machining of AISI 1045 steel using Finite Element simulation experiments, surface and coatings / C. Upadhyay, S. S. Rajput, S. Bera [et al.] // *Technology*. – 2024. – Vol. 495. – Art. 131496. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131496.
- Münz, W. D. Titanium aluminum nitride films: a new alternative to TiN coatings / W. D. Münz // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum*. – 1986. – Vol. 4 (6). – P. 2717–2725.
- Адгезионные характеристики сверхтвердых вакуумных покрытий на основе алтинов / Н. М. Чекан, Е. В. Овчинников, И. П. Акула [и др.] // *Перспективные направления инновационного развития и подготовка кадров : сборник тезисов Междунар. науч.-практ. конф.*, 31 окт. – 2 нояб. 2024 г. / редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2024. – С. 32–35.
- Structure, hardness and thermal stability of TiAlN and nanolayered TiAlN/CrN multilayer films / H. Barshilia, M. S. Prakash, A. Jain, K. Rajam // *Vacuum*. – 2005. – Vol. 77. – P. 169–179.
- Структурно-морфологические особенности покрытий на базе соединений Al–Ti–N / Е. В. Овчинников, Н. М. Чекан, В. В. Посылкин [и др.] // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника*. – 2012. – № 2 (133). – С. 18–23.
- Физико-механические характеристики жаростойких покрытий на основе Al–Ti–N / Н. М. Чекан, Е. В. Овчинников, Е. И. Эйсымонт [и др.] // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника*. – 2014. – № 1 (169). – С. 95–102.
- Энергетические характеристики покрытий на базе соединений Al–Ti–N / Е. В. Овчинников, Н. М. Чекан, В. В. Посылкин [и др.] // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника*. – 2013. – № 1 (145). – С. 75–85.
- Наноконпозиционные покрытия, формируемые на базе соединений AlTiN / Е. В. Овчинников, Н. М. Чекан, И. П. Акула, Е. И. Эйсымонт // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 15–18.
- Овчинников, Е. В. Триботехнические характеристики плазмохимических покрытий AlTiN / Е. В. Овчинников, Н. М. Чекан, И. П. Акула // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2014. – № 1 (303). – С. 55–63.
- Different approaches to superhard coatings and nanocomposites / S. Veprek, M. G. J. Veprek-Heijman, P. Karvankova, J. Prochazka // *Thin Solid Films*. – 2005. – Vol. 476. – P. 1–29.
- Wasa, K. Structures and resistive properties of sputtered TiZrAlN thin films / K. Wasa, S. Hayakawa // *Thin Solid Films*. – 1972. – Vol. 10. – P. 367–375.
- Ichimura, H. High-temperature oxidation of ion-plated TiN and TiAlN films / H. Ichimura, A. Kawana // *J Mater Res*. – 1993. – Vol. 8. – P. 1093–1100.
- Shew, B. Y. Effects of r.f. bias and nitrogen flow-rates on the reactive sputtering of TiAlN films / B. Y. Shew, J. L. Huang, D. Lii // *Thin Solid Films*. – 1997. – Vol. 293. – P. 212–219.
- Effect of bilayer period on structure, mechanical and thermal properties of TiAlN/AlTiN multilayer coatings / L. Chen, Y. X. Xu, D. Yong, L. Yong // *Thin Solid Films*. – 2015. – Vol. 592. – P. 207–214.
- Tribological behaviour of low carbon-containing TiAlCN coatings deposited by hybrid (DCMS/HiPIMS) technique / W. Tillmann, D. Grisales, D. Stangier, N. F. Lopes Dias // *Tribol. Int.* – 2020. – Vol. 151. – P. 106528.
- Овчинников, Е. В. 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.
- Wear and breakage of TiAlN- and TiSiN-coated carbide tools during high-speed milling of hardened steel / C. Y. Wang, Y. X. Xie, Z. Qin [et al.] // *Wear*. – 2015. – Vol. 336–337. – P. 29–42. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.04.018.
- Deposition of superhard TiAlSiN thin films by cathodic arc plasma deposition / S. K. Kim, P. V. Vinh, J. H. Kim, T. Ngoc // *Surf. Coat. Technol.* – 2005. – Vol. 200. – P. 1391–1394. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.08.109.
- Chang, Y.-Y. High temperature oxidation resistance of multicomponent Cr–Ti–Al–Si–N coatings / Y.-Y. Chang, C.-Y. Hsiao // *Surf. Coat. Technol.* – 2009. – Vol. 204. – P. 992–996. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.04.009.
- Impact of Al and Cr alloying in TiN-based PVD coatings on cutting performance during machining of hard to cut materials / A. I. Kovalev, D. L. Wainstein, A. Y. Rashkovskiy [et al.] // *Vacuum*. – 2009. – Vol. 84. – P. 184–187. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2009.06.019.
- Bolz, S. F. Abscheidung nanostrukturierter Verschleißschutzschichten für Zerspanwerkzeuge mittels Kathodenzerstäubung / S. F. Bolz // RWTH Aachen University. – Shaker, Aachen, Diss, 2011.
- TiAlN film preparation by Y-shape filtered-arc-deposition system / T. Mashiki, H. Hikosaka, H. Tanoue [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2008. – Vol. 516. – P. 6650–6654.

References

- Influence of TiAlN coatings thickness indry machining of AISI 1045 steel using Finite Element simulation experiments, surface and coatings / C. Upadhyay, S. S. Rajput, S. Bera [et al.] // *Technology*. – 2024. – Vol. 495. – Art. 131496. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131496.
- Münz, W. D. Titanium aluminum nitride films: a new alternative to TiN coatings / W. D. Münz // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum*. – 1986. – Vol. 4 (6). – P. 2717–2725.
- Адгезионные характеристики сверхтвердых вакуумных покрытий на основе алтинов / Н. М. Чекан, Е. В. Овчинников, И. П. Акула [и др.] // *Перспективные направления инновационного развития и подготовка кадров : сборник тезисов Междунар. науч.-практ. конф.*, 31 окт. – 2 нояб. 2024 г. / редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2024. – С. 32–35.
- Structure, hardness and thermal stability of TiAlN and nanolayered TiAlN/CrN multilayer films / H. Barshilia, M. S. Prakash, A. Jain, K. Rajam // *Vacuum*. – 2005. – Vol. 77. – P. 169–179.

5. Strukturno-morfologicheskie osobennosti pokrytij na baze soedinenij Al-Ti-N / E. V. Ovchinnikov, N. M. CHekan, V. V. Posylkin [i dr.] // Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni YAnki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika. – 2012. – № 2 (133). – S. 18–23.
6. Fiziko-mekhanicheskie harakteristiki zharostojkih pokrytij na osnove Al-Ti-N / N. M. CHekan, E. V. Ovchinnikov, E. I. Ejsymont [i dr.] // Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni YAnki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika. – 2014. – № 1 (169). – S. 95–102.
7. Energeticheskie harakteristiki pokrytij na baze soedinenij Al-Ti-N / E. V. Ovchinnikov, N. M. CHekan, V. V. Posylkin [i dr.] // Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni YAnki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika. – 2013. – № 1 (145). – S. 75–85.
8. Nanokompozicionnye pokrytiya, formiruemye na baze soedinenij AlTiN / E. V. Ovchinnikov, N. M. CHekan, I. P. Akula, E. I. Ejsymont // Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya. – 2013. – T. 13, № 1. – S. 15–18.
9. Ovchinnikov, E. V. Tribotekhnicheskie harakteristiki plazmohimicheskikh pokrytij AlTiN / E. V. Ovchinnikov, N. M. CHekan, I. P. Akula // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 1 (303). – S. 55–63.
10. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites / S. Veprek, M. G. J. Veprek-Heijman, P. Karvankova, J. Prochazka // Thin Solid Films. – 2005. – Vol. 476. – P. 1–29.
11. Wasa, K. Structures and resistive properties of sputtered TiZrAlN thin films / K. Wasa, S. Hayakawa // Thin Solid Films. – 1972. – Vol. 10. – P. 367–375.
12. Ichimura, H. High-temperature oxidation of ion-plated TiN and TiAlN films / H. Ichimura, A. Kawana // J Mater Res. – 1993. – Vol. 8. – P. 1093–1100.
13. Shew, B. Y. Effects of r.f. bias and nitrogen flow-rates on the reactive sputtering of TiAlN films / B. Y. Shew, J. L. Huang, D. Lii // Thin Solid Films. – 1997. – Vol. 293. – P. 212–219.
14. Effect of bilayer period on structure, mechanical and thermal properties of TiAlN/AlTiN multilayer coatings / L. Chen, Y. X. Xu, D. Yong, L. Yong // Thin Solid Films. – 2015. – Vol. 592. – P. 207–214.
15. Tribological behaviour of low carbon-containing TiAlCN coatings deposited by hybrid (DCMS/HiPIMS) technique / W. Tillmann, D. Grisales, D. Stangier, N. F. Lopes Dias // Tribol. Int. – 2020. – Vol. 151. – P. 106528.
16. Ovchinnikov, E. V. Antifrikcionnye elektroiskrovye pokrytiya dlya zubchatyh peredach / E. V. Ovchinnikov, V. I. Lun', A. CH. Svistun [i dr.] // Gornaya mekhanika i mashinostroenie. – 2024. – № 4. – S. 92–99.
17. Wear and breakage of TiAlN- and TiSiN-coated carbide tools during high-speed milling of hardened steel / C. Y. Wang, Y. X. Xie, Z. Qin [et al.] // Wear. – 2015. – Vol. 336–337. – P. 29–42. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.04.018.
18. Deposition of superhard TiAlSiN thin films by cathodic arc plasma deposition / S. K. Kim, P. V. Vinh, J. H. Kim, T. Ngoc // Surf. Coat. Technol. – 2005. – Vol. 200. – P. 1391–1394. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.08.109.
19. Chang, Y.-Y. High temperature oxidation resistance of multicomponent Cr–Ti–Al–Si–N coatings / Y.-Y. Chang, C.-Y. Hsiao // Surf. Coat. Technol. – 2009. – Vol. 204. – P. 992–996. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.04.009.
20. Impact of Al and Cr alloying in TiN-based PVD coatings on cutting performance during machining of hard to cut materials / A. I. Kovalev, D. L. Wainstein, A. Y. Rashkovskiy [et al.] // Vacuum. – 2009. – Vol. 84. – P. 184–187. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2009.06.019.
21. Bolz, S. F. Abscheidung nanostrukturierter Verschleißschutzschichten für Zerspanwerkzeuge mittels Kathodenzerstäubung / S. F. Bolz // RWTH Aachen University. – Shaker, Aachen, Diss, 2011.
22. TiAlN film preparation by Y-shape filtered-arc-deposition system / T. Mashiki, H. Hikosaka, H. Tanoue [et al.] // Thin Solid Films. – 2008. – Vol. 516. – P. 6650–6654.

Материал поступил 06.07.2026, одобрен 09.07.2026,
принят к публикации 14.07.2026

УДК 534.1+539.3+539.4

ОСОБЕННОСТИ КОЛЕБАНИЙ ОДНОМАССОВОЙ СИСТЕМЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВИДА РЕОЛОГИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Б. Г. Холодарь

*К. т. н., доцент, старший научный сотрудник НИЧ, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,
e-mail: hbg@list.ru*

Реферат

Конструкционные материалы проявляют сложный комплекс механических свойств, зависящий от условий их эксплуатации (температура, характер нагружения, длительность воздействия и др.). Для их отражения используются подходы, основанные как на современных представлениях физики материалов, так и на известных реологических моделях Максвелла, Кельвина, Фойгта с постоянной вязкостью, не зависящей от изменений напряженно-деформированного состояния материала, что позволяет получать аналитические решения прикладных задач и прогнозировать особенности поведения конструкций. Усовершенствования моделей с учетом трансформации структуры материалов при нагружении вызывают необходимость численных решений, что вносит соответствующие затруднения в анализ и обобщения. В настоящей работе рассматривается задача о продольных колебаниях механических систем в виде массы на стержневой связи, свойства которой подчиняются упомянутым моделям, при действии гармонической нагрузки. Существенные различия в поведении систем наблюдаются в дорезонансной зоне частот нагружения. Результаты решения визуализированы в виде графиков коэффициентов динамичности для деформаций и напряжений как в установившемся процессе вынужденных колебаний, так и для начального периода движения, в течение которого напряжения и деформации достигают своих максимальных значений. Построены траектории, показывающие переход во времени напряжений и деформаций к установившимся уровням при варьировании параметров системы. Приведенные результаты могут быть полезны как для учебных целей, так и в научно-технических приложениях.

Ключевые слова: механические колебания, реономные материалы, структурные модели, гармоническое нагружение, полные и вынужденные деформации и напряжения, коэффициент динамичности.

FEATURES OF OSCILLATIONS OF A SINGLE-MASS SYSTEM DEPENDING ON THE TYPE OF RHEOLOGICAL LINK

B. G. Kholodar

Abstract

Structural materials exhibit a complex set of mechanical properties that depend on the conditions of their use (temperature, type of loading, duration of exposure, etc.). These are modeled using approaches based on both modern concepts of materials physics and well-known rheological models (Maxwell, Kelvin, Voigt) with constant viscosity independent of changes in the stress-strain state of the material. This allows for analytical solutions to practical problems and the prediction of structural behavior. Improvements to models that take into account the transformation of material structure under loading require numerical solutions, which introduces corresponding difficulties in analysis and generalizations. This paper examines the problem of longitudinal vibrations of mechanical systems in the form of a mass on a rod connection, the properties of which are subject to the aforementioned models, under the action of a harmonic load. Significant differences in system behavior are observed in the pre-resonance frequency range of loading. The results of the analysis are visualized in the form of graphs of dynamic coefficients for deformations and stresses both in the steady-state process of forced vibrations and for the initial period of motion during which stresses and deformations reach their maximum values. Trajectories showing the time-dependent transition of stresses and deformations to steady-state levels with variation of system parameters are constructed. The presented results can be useful both for educational purposes and in scientific and technical applications.

Keywords: mechanical vibrations, rheonomic materials, structural models, harmonic loading, total and forced deformations and stresses, dynamic coefficient.

1 Введение

Конструкционные материалы обладают сложным набором механических свойств, проявление которых зависит от условий нагружения, в первую очередь таких как температура, уровень, скорость и длительность воздействия. В возникающей при силовых воздействиях деформации ε выделяют в качестве составляющих упругую (мгновенно-обратимую) ε_y , пластическую (остаточную) ε_n и возвратную (запаздывающе-обратимую) ε_v компоненты деформаций: $\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_n + \varepsilon_v$.

Для установления связи между компонентами полной деформации и их скоростями используются структурные модели, состоящие из упругих и вязких элементов и позволяющие устанавливать взаимосвязь между указанными деформациями во времени.

В модели упругого тела имеет место однозначная зависимость напряжений σ и деформаций ε , в других моделях скорости остаточных и возвратных деформаций зависят от уровня напряжений и деформаций и соответствующей вязкости материала. На рисунке 1

показаны модель Максвелла, применяемая для описания упруго-пластического деформирования, модель Фойгта, описывающая материал с последствием без наличия остаточных деформаций, и модель Кельвина обобщенного твердого тела, позволяющая описать связь напряжений с упругими, остаточными и возвратными деформациями. Указанные модели учитывают рассеяние энергии вязкими элементами и наряду с моделью упругого тела позволяют в той или иной мере отразить известные из опыта эффекты поведения материалов в различных режимах нагружения. Модель Кельвина сравнительно с другими показывает наиболее полное соответствие экспериментальным данным [1, 2]. Данные модели широко используются в технических приложениях, медицине, биологии [3–6]. Модель Фойгта, в которой внутреннее демпфирование в материале связывается только со скоростью деформирования, в наименьшей степени соответствует реальным материалам [1] и более пригодна для описания демпфирования гидравлическими (поршневыми) амортизаторами при умеренных скоростях движения.

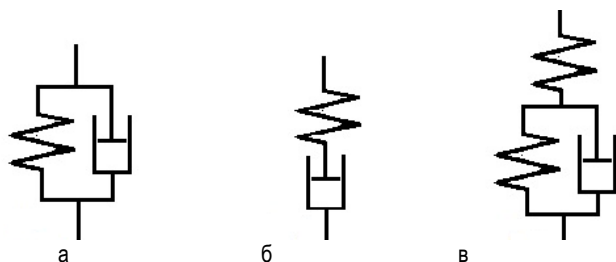


Рисунок 1 – Модели Фойгта (а), Максвелла (б), Кельвина (в)

Соответствующие уравнения, описывающие свойства материалов по указанным моделям, для одномерного случая имеют вид (здесь и далее штрихом обозначено дифференцирование по времени):

$$(a) \sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}; \quad (b) \dot{\varepsilon} = \frac{\sigma'}{E} + \frac{\sigma}{\eta}; \quad (c) \dot{\varepsilon} = \frac{\sigma'}{E} + \frac{\sigma - E\varepsilon}{\eta}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости, $E\varepsilon = E \cdot E^*/(E + E^*)$ – равновесный (длительный) модуль, E^* – равновесный модуль возвратных деформаций, η – вязкость материала. Вязкости в моделях, определяющие демпфирование, являются величинами феноменологическими, и для материалов сложной структуры (в частности, металлов) их строгое физическое обоснование затруднительно ввиду многочисленности механизмов, вызывающих рассеяние энергии в процессе деформирования.

Если параметры E , E^* , η приняты как некоторые константы, то уравнения являются линейными, и их достоинством является возможность построения аналитических решений для основных случаев нагружения. Уточнение описания фактического поведения материалов на соответствующем отрезке времени при заданном режиме нагружения достигается включением в модель дополнительных вязких элементов или непосредственно элементов Фойгта, что соответственно повышает порядок уравнений. Принципиальные особенности поведения материалов, отражаемые с помощью уравнений такого вида, рассмотрены в [1, 2]. Недостатком линейных моделей является отсутствие учета трансформации структуры материала в процессе деформирования, что не позволяет им адекватно отразить некоторые наблюдаемые экспериментальные факты. Примеры соответствующих усложнений моделей деформированного твердого тела и их использования известны [7–13]. Поведение упруго-пластического материала с вязкостью, характеристики которой прямо связаны с формой диаграммы растяжения при стандартных испытаниях образцов, рассмотрено в [14] для различных режимов нагружения. Результаты применения такого подхода показывают их соответствие опытным данным.

В данной работе на примере задачи о колебаниях одномассовой системы при циклическом нагружении рассматриваются в линейной постановке отличия в напряженно-деформированном состоянии материала связи, вызываемые способом учета рассеяния энергии моделями, что может повлиять на прогнозирование поведения динамических систем и принятие решений по управлению соответствующими процессами.

2 Описание движения колебательных систем

Далее с помощью линейных уравнений типа (1) при $\eta = \text{const}$ рассмотрим различия в поведении одномассовой системы при нагружении силой $F(t) = F_0 \sin(pt)$. Масса M соединена с неподвижным основанием прямым стержнем длиной L , площадью сечения A и плотностью ρ , который может создавать связь упругую либо подчиняющуюся уравнениям (1).

Дифференциальное уравнение движения такой массы имеет вид: $M\ddot{x} = F - R$, где x – перемещение массы, R – сила в связи. Перемещение связано с деформацией материала стержня зависимостью $x = L\varepsilon$, используя которую уравнение можно представить через деформацию: $\varepsilon'' = (F - R)/ML$.

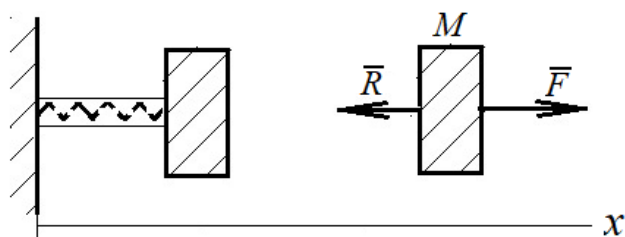


Рисунок 2 – Одномассовая система

Для связи в виде тела Фойгта уравнение колебаний запишем привычным образом через деформации, для тел Максвелла и Кельвина более удобным является запись через напряжения:

$$(a) \quad \varepsilon'' + \eta/M \cdot \varepsilon' + AE/ML \cdot \varepsilon = F/ML \\ (b) \quad \sigma'' + E/\eta \cdot \sigma' + AE/ML \cdot \sigma = FE/ML \\ (v) \quad \sigma''' + E/\eta \cdot \sigma'' + AE/ML \cdot \sigma' + AEE^*/\eta ML \cdot \sigma = (F' + FE\varepsilon/\eta)/E/ML. \quad (2)$$

Для всех уравнений решения являются суммой общего решения однородного уравнения и частного, определяемого видом правой части. В соответствии с этим будем рассматривать колебания полные, затухающие (неустановившиеся, сопровождающие) и вынужденные. Начальные условия далее принимаем соответствующими состоянию покоя. При необходимости учета массы стержня его приведенную массу определяем по формуле $M_{пр} = 4/\pi^2 \cdot \rho AL$, которая обеспечивает совпадение ее частоты колебаний с нижней частотой колебаний стержня с равномерно распределенной массой.

Одним из важных моментов практического использования решений рассматриваемых уравнений является определение коэффициентов динамичности по перемещениям массы M (по деформации связи) и по развивающейся в связях продольной силе, которые определяются в виде отношения максимальных во времени значений переменных к их статическим значениям: $K_\delta^\varepsilon = \varepsilon_{\max}/(F_0/AE)$ и $K_\delta^R = R_{\max}/F_0$. Коэффициенты обоих видов представляют интерес для случаев как установившегося, так и общего процесса движения системы с учетом затухающих колебаний. Далее выражения для K_δ получим для колебаний при «слабом затухании».

2.1 Модель Фойгта

Решение для уравнения (2а) имеет вид

$$\varepsilon = e^{-nt}[A_1 \cos(k_n t) + A_2 \sin(k_n t)] + B_1 \cos(pt) + B_2 \sin(pt) \quad (3)$$

Коэффициенты частного решения равны

$$B_1 = -\varepsilon_0 \cdot 2sz / [(1 - z^2)^2 + 4s^2 z^2]; \\ B_2 = \varepsilon_0 \cdot (1 - z^2) / [(1 - z^2)^2 + 4s^2 z^2],$$

однородного уравнения: $A_1 = -B_1$,

$$A_2 = -\varepsilon_0 (1 - z^2 - 2s^2) / [(1 - z^2)^2 + 4s^2 z^2].$$

Здесь дополнительно обозначено: $n = \eta/2M$, $k = \sqrt{EA/LM}$, $z = p/k$, $s = n/k$, $k_n = k\sqrt{1 - s^2}$, $\varepsilon_0 = F_0/LMLk^2$.

Переведем частное решение к амплитудной форме $\varepsilon_{\text{част}} = a_\varepsilon \sin(pt - \gamma_\varepsilon)$,

$R_{\text{част}} = a_R \sin(pt - \gamma_R)$, получаем K_δ^ε и K_δ^R для вынужденных колебаний в виде

$$K_\delta^\varepsilon = 1 / [(1 - z^2)^2 + 4s^2 z^2], \quad K_\delta^R = K_\delta^\varepsilon \cdot \sqrt{1 + 4s^2 z^2}. \quad (4)$$

Соответствующие графики приведены на рисунке 3. Здесь и далее на соответствующих рисунках отложены вдоль оси абсцисс – параметр Z , вдоль оси ординат – коэффициенты K_δ .

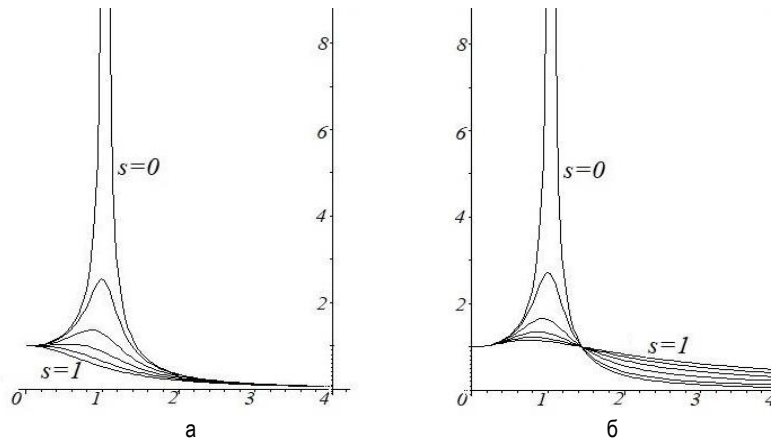
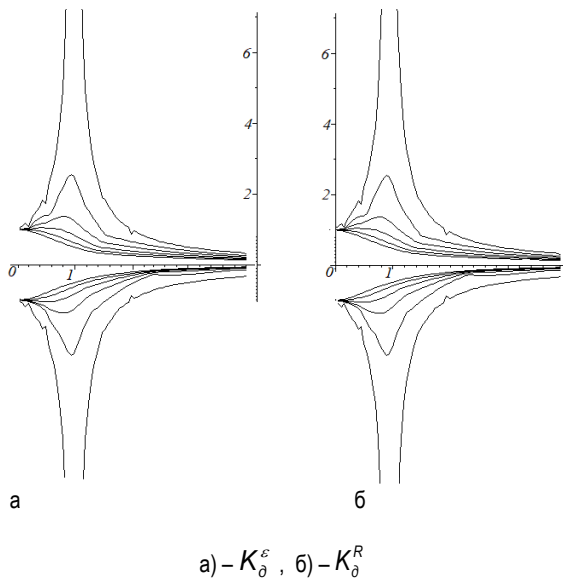


Рисунок 3 – Коэффициенты динамичности вынужденных колебаний: $S = 0.0, 0.2, \dots, 1.0, Z = 0-4$; а) – K_0^ε , б) – K_0^R

Коэффициенты динамичности с учетом сопутствующих колебаний определяем численно (рисунок 4).



а) – K_0^ε , б) – K_0^R

Рисунок 4 – Коэффициенты динамичности полных колебаний

Из рисунка 4 видно, что в отличие от случая вынужденных колебаний коэффициенты различны для положительных и отрицательных значений переменных, причем по модулю положительные значения практически всегда больше отрицательных, – при $S > 0.2$ и $Z > 1$ может наблюдаться отличие в несколько раз. Отношение коэффициентов динамичности одинаковых знаков K_0^R/K_0^ε близко к единице. Сравнение графиков на рисунке 3 и рисунке 4 показывает существенное различие соответствующих друг другу коэффициентов K_0 по величине. На рисунке 5 показано развитие зависимости $\sigma(\varepsilon)$ во времени и выход на стабильную форму петли гистерезиса. Траектория выхода зависит как от вязкости, так и от частоты возбуждения. Петля имеет форму эллипса, который с ростом вязкости увеличивает наклон к оси деформаций, поворачиваясь против часовой стрелки. Отношение размеров полуосей эллипса и его площадь зависят от значений S и Z , вначале увеличиваясь, а далее уменьшаясь при изменении уровня Z относительно значения $Z = 1$. На больших Z ось эллипса может занять положение практически вдоль оси ординат. Для удобства представления графиков на рисунке их шкалы деформировались, расчетное время движения на графиках одинаковое.

В связи с распределением усилия в связи между упругой и вязкой ветвями ($R = R_y + R_0$) напряжения, соответствующие упругим деформациям, определяются законом Гука и их коэффициенты динамичности совпадают с коэффициентами по деформациям ($K_0^R = K_0^\varepsilon$).

В окрестности резонансной зоны (при $Z \approx 1$) на зависимостях $\varepsilon(t)$, $\sigma(t)$ реализуются биения, затухающие при наличии демпфирования.

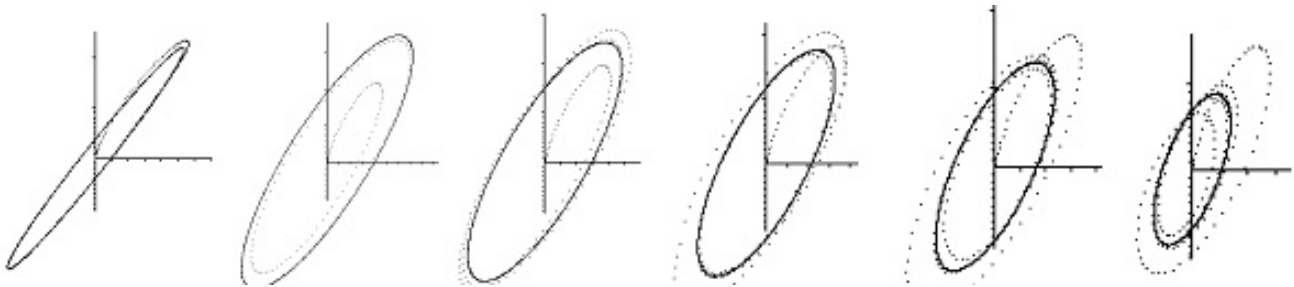


Рисунок 5 – Траектории движения изображающей точки $\sigma(\varepsilon)$ с ростом частоты возбуждения: параметр демпфирования $S = 0.3$; значения Z слева направо $Z = 0.3, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 2.1$

2.2 Модель Максвелла

Для тела Максвелла дифференциальное уравнение движения может быть записано через деформации в виде уравнения третьего порядка, что требует использования дополнительного начального условия по ускорению [1]. При записи уравнения в виде (26) решение имеет вид, аналогичный (3):

$\sigma = e^{-\eta t} [A_1 \cos(k_g t) + A_2 \sin(k_g t)] + B_1 \cos(pt) + B_2 \sin(pt)$
при константах

$$B_1 = -\sigma_0 \cdot 2qz / [(1 - z^2)^2 + 4q^2 z^2],$$

$$B_2 = \sigma_0 \cdot (1 - z^2) / [(1 - z^2)^2 + 4q^2 z^2], \quad A_1 = -B_1,$$

$$A_2 = -(qB_1 + zB_2) / \sqrt{1 - z^2},$$

где $2g = E/\eta$, $q = g/k$, $k_g = k\sqrt{1 - q^2}$, $\sigma_0 = E\varepsilon_0$.

Зависимость $\varepsilon(t)$ получаем интегрированием (1а):

$\varepsilon = \sigma/E + (\int \sigma dt + C)/\eta$. Определив константу C из начального условия

$$\varepsilon(0) = A_1/E - (A_1 g/k_g + A_2)/[\eta k_g \cdot ((g/k_g)^2 + 1)] + B_1/E - B_2/(\eta p) + C/\eta = 0$$

и выделив в ней слагаемые, соответствующие частотам собственных и вынужденных колебаний, находим для последних выражение

$$\varepsilon_{\text{вын}}(t) = (B_1/E - B_2/(\eta p))(\cos(pt) - 1) + (B_2/E + B_1/(\eta p))\sin(pt), \quad (5)$$

которое далее используем для вычисления коэффициента динамичности K_δ^ε для вынужденных колебаний. Отметим, что такое разделение константы C на две части обеспечивает одновременное равенство нулю деформаций в начальный момент времени для полных, затухающих и вынужденных колебаний.

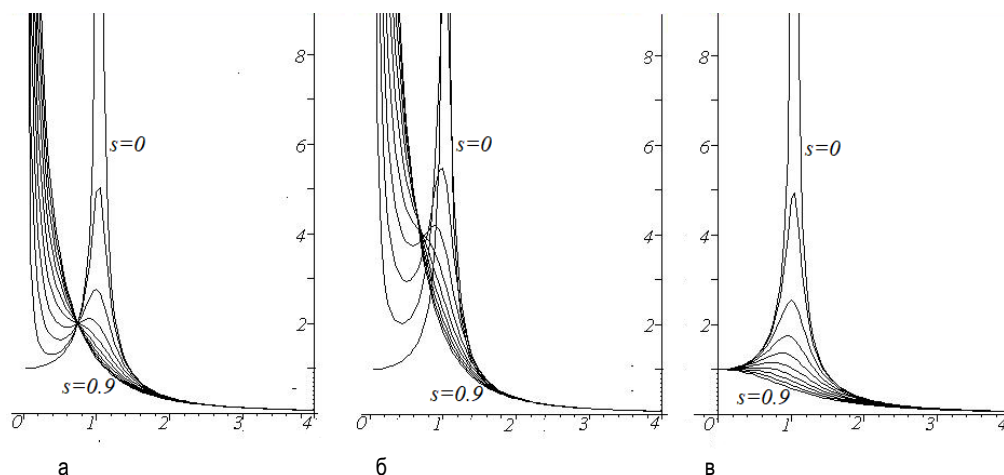
Так как в данном случае передаваемое вдоль связи усилие в упругом и вязком элементах одинаково, то коэффициент динамичности K_δ^R совпадает с коэффициентом динамичности по напряжениям K_δ^σ . Как видно из сравнения уравнений (2а) и (2б), эти коэффициенты для установившегося процесса вынужденных колебаний совпадают по форме с выражением K_δ^ε из (4). Выражение

для коэффициента $K_\delta^\varepsilon(q, z)$ с использованием (5) принимает вид

$$K_\delta^\varepsilon = \sqrt{(1 + 4q^2/z^2)/((1 - z^2)^2 + 4q^2 z^2)} + 2q/(z \cdot ((1 - z^2)^2 + 4q^2 z^2)), \quad (6)$$

в котором первое слагаемое соответствует учету только переменных компонент в (5) и совпадает с приведенным в [1].

Графики K_δ показаны на рисунке 6.



а) – K_δ^ε по [1], б) – K_δ^ε по (6), в) – K_δ^R

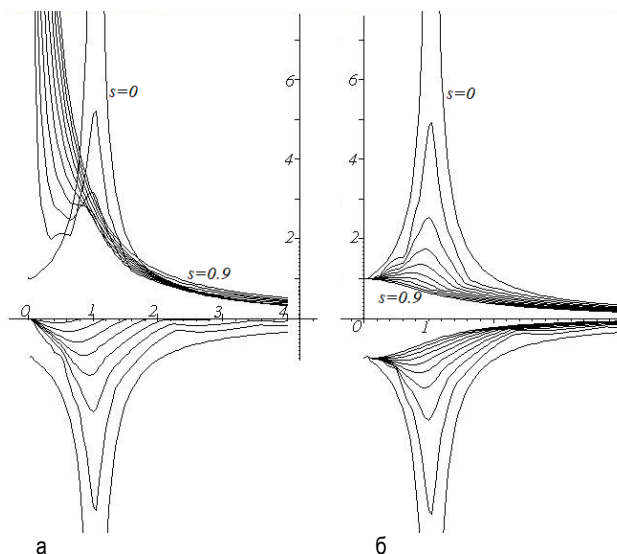
Рисунок 6 – Коэффициенты динамичности вынужденных колебаний $S = 0.0, 0.1, \dots, 0.9$

В рассматриваемой модели до значений $q \approx 0,35$ отсутствует монотонность изменения коэффициентов K_δ^ε (рисунок 6), что выражается в сложной трансформации их формы, приводящей к сближению уровней экстремальных точек и последующему их исчезновению при $q > 0,35$. После достижения параметром Z значения $Z \approx 1,5$ коэффициент K_δ^ε становится меньше единицы при всех уровнях демпфирования. Отношение коэффициентов $K_\delta^R/K_\delta^\varepsilon > 1$ независимо от величины параметров Z и g . В соответствии с этим K_δ^R по Фойгту выше, чем по Максвеллу.

Коэффициенты динамичности полных колебаний определяем численно (рисунок 7).

Во всем спектре частот коэффициенты динамичности K_δ^R для полных колебаний выше, чем для вынужденных. Коэффициенты K_δ^R для положительных и отрицательных значений σ на участке $Z < 1,0$ достаточно близки (равны при $Z = 0$ и $Z = 1,0$). Их различие, за исключением небольшого отрезка $1,5 < Z < 2,0$, увеличивается с ростом Z , и при его приближении к значению $Z = 4$ положительные больше модуля отрицательных примерно в два раза. Коэффициенты $K_\delta^\varepsilon(q, z)$ для положительных и отрицательных деформаций существенно отличаются как по уровню, так и по форме (это относится и к сравнению K_δ^ε для вынужденных колебаний в моделях Фойгта и Максвелла).

Как и для тела Фойгта, вблизи точки $Z = 1$ на начальном участке движения имеют место низкочастотные затухающие биения. Скорости затухания при используемых параметрах моделей примерно соответствуют друг другу.



а) – K_δ^ε , б) – K_δ^R

Рисунок 7 – Коэффициенты динамичности полных колебаний $S = 0.0-0.9$

Петли гистерезиса при вынужденных колебаниях с ростом частоты возбуждения меняют свои размеры и форму, поворачиваясь против часовой стрелки. Траектории $\sigma(\varepsilon)$ для полных колебаний (рисунок 8) петлеобразны, с ростом Z их переход к стабильной форме усложняется, а занимаемая область смещается вдоль оси деформаций к началу координат.

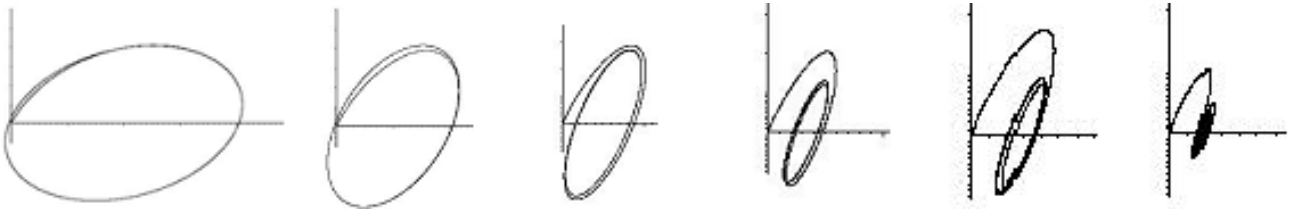


Рисунок 8 – Траектории движения изображающей точки $\sigma(\varepsilon)$ с ростом частоты возбуждения. Параметр демпфирования $S = 0,3$; значения Z слева направо $Z = 0,3, 0,6, 1,2, 1,8, 2,1, 3,3$

2.3 Модель Кельвина

Для тела Кельвина дифференциальные уравнения движения может быть записано через деформации в виде уравнения третьего порядка, что требует использования начального условия по ускорению [1]. Устойчивость колебательного решения обеспечивается [1] при $E/E_\Sigma > 1$, т. е. всегда.

Решение дифференциального уравнения в форме (2в) требует определения трех корней $\gamma_{1,2,3}$ характеристического уравнения $\gamma^3 + E/\eta \cdot \gamma^2 + AE/ML \cdot \gamma + AEE_\Sigma/ML\eta = \gamma^3 + 2g \cdot \gamma^2 + k^2 \cdot \gamma + 2g_\Sigma k^2 = 0$, где $2g_\Sigma = E_\Sigma/\eta$. В данной работе это выполнено по [15] с использованием тригонометрической формы решения. Условие устойчивости решения также всегда выполняется: $g > g_\Sigma$.

Для напряжений получаем выражение $\sigma(t) = A_0 \exp(\gamma_1 t) + \exp(\gamma_2 t) \cdot (A_1 \cos(\gamma_3 t) + A_2 \sin(\gamma_3 t)) + B_1 \cos(pt) + B_2 \sin(pt)$. Константы частного решения равны:

$$E\varepsilon(t) = (\gamma_1 + 2g)/(\gamma_1 + 2g_\Sigma) \cdot A_0 \exp(\gamma_1 t) + \exp(\gamma_2 t) / (\gamma_3((2g + 2g_\Sigma)/\gamma_3)^2 + 1) \cdot \Phi_\varepsilon[\gamma_2, \gamma_3, g, g_\Sigma, A_1, A_2, \cos(\gamma_3 t), \sin(\gamma_3 t)] + 1/(p((2g_\Sigma/p)^2 + 1)) \cdot \Phi_\sigma[p, g, g_\Sigma, B_1, B_2, \cos(pt), \sin(pt)] + C_0 \exp(-2g_\Sigma t) \quad (8)$$

Первые два слагаемых в (8) представляют собой затухающее движение, связанное происхождением с напряжениями, третье – установившееся (незатухающее) вынужденные колебания, четвертое – затухающее движение, зависящее от всех входящих в (8) параметров: $C_0 = C_0[\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, g, g_\Sigma, A_1, A_2, B_1, B_2]$. Аналогично тому, как было сделано выше для модели Максвелла, в константе C_0 можно выделить слагаемые, своим появлением не связанные с константами A_0, A_1, A_2 :

$D = 1/(p((2g_\Sigma/p)^2 + 1)) \cdot [2(g_\Sigma - g)B_2 + (4g \cdot g_\Sigma/p + p)B_1]$, и вместе с установившимися вынужденными колебаниями обеспечивающие равенство нулю вынужденной компоненты колебаний в момент $t = 0$.

$$B_1 = \sigma_0 \cdot 2Z \cdot [s(k_\Sigma - Z^2) - q_\Sigma(1 - Z^2)] / [(k_\Sigma - Z^2)^2 s^2 + (1 - Z^2)^2 Z^2],$$

$$B_2 = \sigma_0 \cdot [4sq_\Sigma(k_\Sigma - Z^2) + Z^2(1 - Z^2)] / [(k_\Sigma - Z^2)^2 s^2 + (1 - Z^2)^2 Z^2],$$

где кроме принятых ранее обозначений введено: $k_\Sigma = g_\Sigma/g = E_\Sigma/E$, $q_\Sigma = g_\Sigma/k$.

Деформации определяются из уравнения (1в) после записи его в форме

$$\varepsilon' + 2g_\Sigma \varepsilon = (\sigma' + 2g\sigma)/E. \text{ Решение этого уравнения имеет вид:}$$

$$E\varepsilon(t) = \exp(-g_\Sigma t) \cdot (\int \exp(g_\Sigma t) \cdot (\sigma' + 2g\sigma) dt + C_0). \quad (7)$$

Неопределенные константы A_0, A_1, A_2 и C_0 находятся из нулевых начальных условий по напряжениям, деформациям и их скоростям: $\sigma(0) = \sigma'(0) = \varepsilon(0) = \varepsilon'(0) = 0$.

Ввиду громоздкости выражения, получаемого при интегрировании уравнения (7), приведем только общую форму этого решения:

Точно так же остающиеся в C_0 слагаемые обеспечивают равенство нулю компонент движения, связанных с собственными колебаниями.

Коэффициенты динамичности для установившихся колебаний имеют вид:

$$K_\sigma^\varepsilon = \sqrt{(Z^2 + 4s^2) / (Z^2(1 - Z^2)^2 + 4s^2(k_\Sigma - Z^2)^2)},$$

$$K_\sigma^\sigma = \sqrt{(Z^2 + 4k_\Sigma^2 s^2) / (Z^2(1 - Z^2)^2 + 4s^2(k_\Sigma - Z^2)^2)}.$$

Ниже представлены результаты вычислений при изменении Z в пределах $0 < Z < 2$.

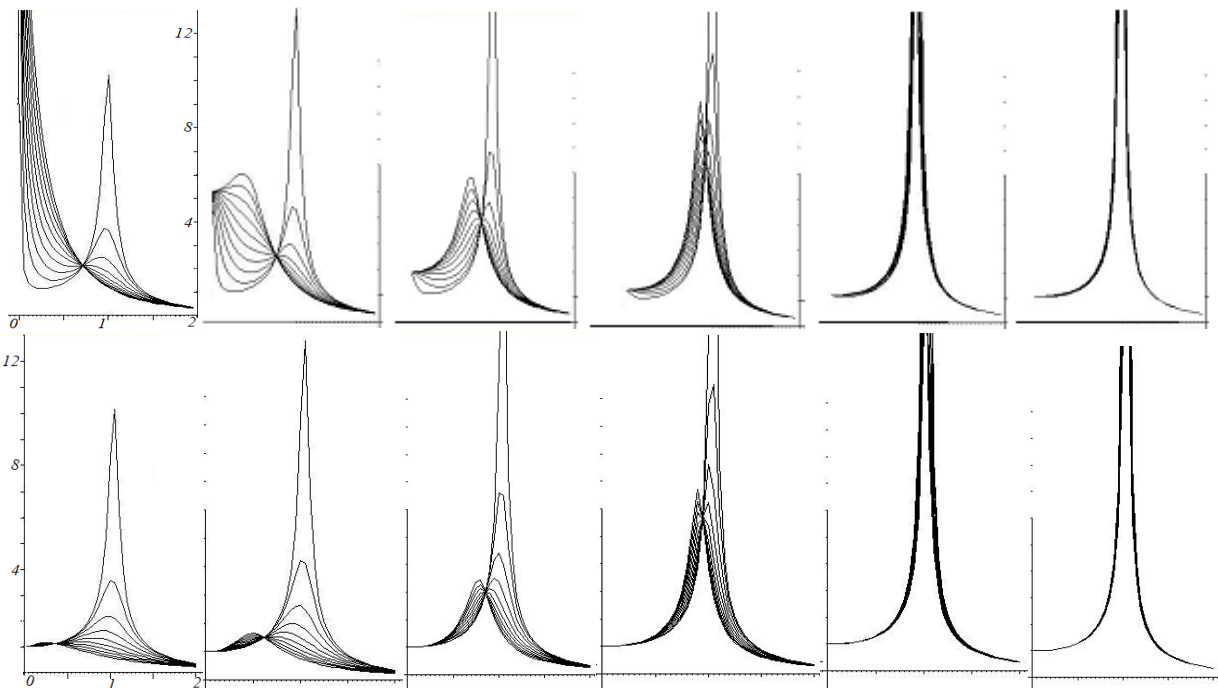


Рисунок 9 – Коэффициенты динамичности вынужденных установившихся колебаний. Верхний ряд – деформации, нижний – напряжения, $0 < Z \leq 2$, $0,05 < S \leq 0,95$, k_Σ слева направо $k_\Sigma = 0,05, 0,2, 0,5, 0,7, 0,9, 0,95$

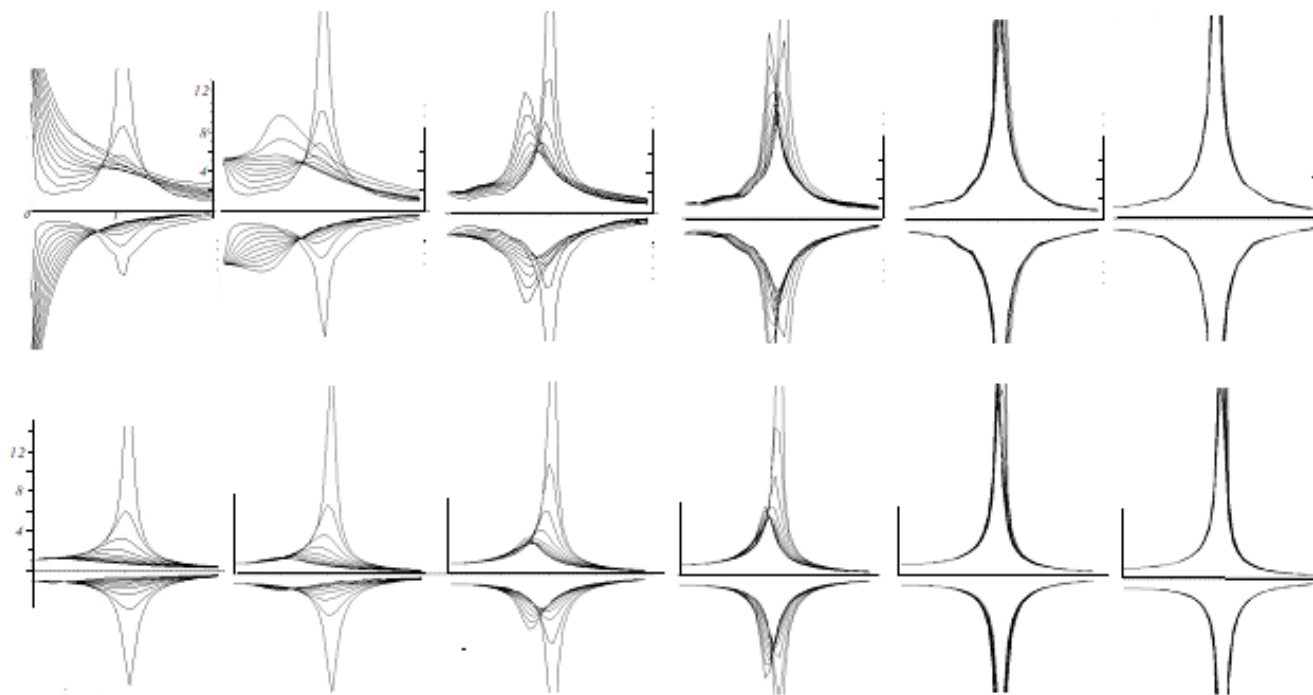


Рисунок 10 – Коэффициенты динамичности полных колебаний. Верхний ряд – деформации, нижний – напряжения, $0 < Z \leq 2$, $0.05 < S \leq 0.95$, k_x слева направо $k_x = 0.05, 0.2, 0.5, 0.7, 0.9, 0.95$

Формы приведенных графиков показывают существенное отличие поведения материала связи по модели Кельвина от других моделей. Влияние модуля E_x неоднозначно и по-разному сказывается на уровнях напряжений и деформаций как полных, так и вынужденных, и локально зависит от значений частотных параметров задачи.

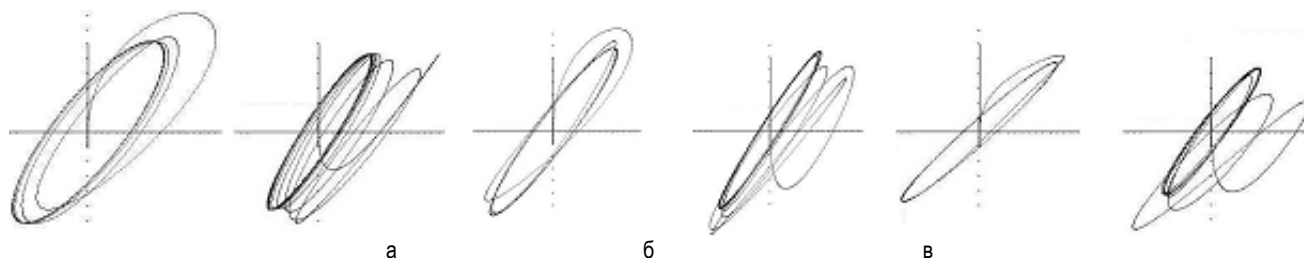
Рост E_x вызывает сложную трансформацию поведения механической системы, характеризующуюся изменением формы графиков K_d в направлении от модели Максвелла к модели Фойгта. Имеет место увеличение ординаты узловой точки на графиках $\sigma_{\text{вн}}$, $\varepsilon_{\text{вн}}^{\text{уст}}$ и увеличение коэффициентов K_d для $\sigma_{\text{вн}}$. Значения K_d для $\varepsilon_{\text{вн}}^{\text{уст}}$ также в целом возрастают, но при низких уровнях E_x на участке оси Z от нуля до узловой точки (при $E_x/E = 0.2$ ей соответствует $Z \approx 0.65$) имеет место их более сложное поведение.

Для полных деформаций узловая точка «размывается». Модуль K_d отрицательных деформаций меньше K_d положительных во всем диапазоне изменения Z и S , но с ростом E_x это различие уменьшается, а сам процесс установления во времени напряжений и дефор-

маций происходит быстрее. Максимальные уровни σ и ε достигаются в направлении воздействия (в положительной области), но при больших уровнях затухания (например, для $S \approx 0.9$) максимум напряжений меняет знак при Z , даже не достигших значения $Z = 1$. Уровень E_x сложным образом влияет на максимальные значения K_d напряжений и деформаций: если с уровня $k_x \approx 0.5$ коэффициенты динамичности возрастают во всем диапазоне изменения Z , то при более низких значениях параметра k_x их поведение проявляет зависимость как от E_x , так и от частоты воздействия, что особенно ярко выражается для деформаций (рисунок 10).

На графиках $\varepsilon_{\text{полн}}$ наблюдаются затухающие биения небольшой глубины, более выраженные при $Z > 1$, и слабеющие с ростом E_x . На графиках напряжений они выражены в меньшей степени или не наблюдаются.

Траектории движения изображающей точки $\sigma(\varepsilon)$ во времени и выход на стабильную форму петли гистерезиса в модели Кельвина повторяют основные черты предыдущих моделей, имея несколько более сложный характер.



а) $k_x = 0.2$, $S = 0.3$, $Z = 0.6$ и $Z = 1.2$; б) $k_x = 0.5$, $S = 0.3$, $Z = 0.6$ и $Z = 1.2$; в) $k_x = 0.5$, $S = 0.6$, $Z = 0.6$ и $Z = 1.2$
Рисунок 11 – Траектории движения изображающей точки $\sigma(\varepsilon)$ при различных значениях параметров k_x , S и Z

3 Заключение

Рассмотрена задача о продольных колебаниях одномассовой системы при действии циклической синусоидальной нагрузки со связью в виде прямого стержня, для которого реологические свойства материала описываются линейными моделями Фойгта, Максвелла и Кельвина. Проведен анализ отличий в напряженно-деформированном состоянии таких связей для случая слабого затухания.

Поведение рассмотренных систем сложным образом зависит от совокупности их частотных параметров, что особенно характерно для дорезонансной области внешнего воздействия. Расчеты показывают, что в связи с двухчастотностью полных колебаний их коэффициенты динамичности могут заметно превышать соответствующие значения для вынужденных. Поэтому учет затухающих компонент колебаний для всех моделей может оказать существенное

влияние на назначение допустимых уровней нагружения применительно к фактическим условиям эксплуатации изделий. Это особенно касается ограничения деформаций.

Необходимо отметить, что одним из недостатков линейных моделей, касающихся описания процессов затухания колебаний в реальных материалах, является несоответствие зависимости поглощенной энергии от частоты и амплитуды воздействия опытным данным, что может быть связано с учетом трансформации структуры материалов при изменениях напряженно-деформированного состояния.

Список цитированных источников

1. Ржаницын, А. Р. Теория ползучести / А. Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1968. – 416 с.
2. Работнов, Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука, 1977. – 384 с.
3. Белаш, Т. А. Энергопоглощение в системах сейсмозащиты зданий и сооружений : монография / Т. А. Белаш, А. М. Уздин. – СПб. : ПГУПС, 2020. – 178 с.
4. Петров, И. Б. Математическое моделирование в медицине и биологии на основе моделей механики сплошных сред / И. Б. Петров // Труды МФТИ. – 2009. – Т. 1, № 1. – С. 5–16.
5. Моделирование механического поведения вязкоупругого элемента при малоцикловом деформировании / М. Ю. Демина, Л. С. Полугрудова, И. Н. Андропов, Н. П. Богданов // Известия Коми научного центра УрО РАН. – Сыктывкар, 2013. – Выпуск 1 (13). – С. 79–83.
6. Богданов, Н. П. Моделирование ползучести биологических тканей / Н. П. Богданов, М. Ю. Демина, Л. С. Полугрудова // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2011. – Вып. 2 (6). – С. 76–79.
7. Гуревич, Г. И. Деформируемость сред и распространение сейсмических волн / Г. И. Гуревич. – М. : Наука, 1974. – 483 с.
8. Рабинович, А. Л. Введение в механику армированных полимеров / А. Л. Рабинович. – М. : Наука, 1970. – 482 с.
9. Рыбин, В. В. Большие пластические деформации и разрушение материала / В. В. Рыбин. – М. : Metallurgiya, 1986. – 224 с.
10. Лихачев, В. А. Структурно-аналитическая теория прочности / В. А. Лихачев, В. Г. Малинин. – СПб. : Наука, 1993. – 470 с.
11. Панин, В. Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В. Е. Панин, В. А. Лихачев, Ю. В. Гриняев. – Новосибирск : Наука, 1990. – 225 с.
12. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / В. Е. Панин, Ю. В. Гриняев, В. И. Данилов [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1990. – 225 с.
13. Хохлов, А. В. Свойства нелинейной модели вязкоупругопластичности типа Максвелла с двумя материальными функциями / А. В. Хохлов // Вестн. Моск. ун-та. Серия 1. Математика. Механика. – 2016. – № 6. – С. 36–41.
14. Холодарь, Б. Г. Описание поведения упруго-пластических материалов с помощью уравнений Максвелла с нелинейной вязкостью / Б. Г. Холодарь // Механика. Исследования и инновации. – Гомель, 2025. – Вып. 18. – С. 167–177.
15. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1970. – 720 с.

References

1. Rzhanitsyn, A. R. Teoriya polzuchesti / A. R. Rzhanitsyn. – M. : Strojizdat, 1968. – 416 s.
2. Rabotnov, YU. N. Elementy nasledstvennoj mekhaniki tverdyh tel / YU. N. Rabotnov. – M. : Nauka, 1977. – 384 s.
3. Belash, T. A. Energopogloshchenie v sistemah sejsmozashchity zdaniy i sooruzhenij : monografiya / T. A. Belash, A. M. Uzdin. – SPb. : PGUPS, 2020. – 178 s.
4. Petrov, I. B. Matematicheskoe modelirovanie v medicine i biologii na osnove modelej mekhaniki sploshnyh sred / I. B. Petrov // Trudy MFTI. – 2009. – T. 1, № 1. – S. 5–16.
5. Modelirovanie mekhanicheskogo povedeniya vyazkoupругogo elementa pri malociklovom deformirovanii / M. YU. Demina, L. S. Polugrudova, I. N. Andropov, N. P. Bogdanov // Izvestiya Komi nauchnogo centra UrO RAN. – Syktyvkar, 2013. – Vypusk 1 (13). – S. 79–83.
6. Bogdanov, N. P. Modelirovanie polzuchesti biologicheskikh tkanej / N. P. Bogdanov, M. YU. Demina, L. S. Polugrudova // Izve-stiya Komi nauchnogo centra UrO RAN. – 2011. – Vyp. 2 (6). – S. 76–79.
7. Gurevich, G. I. Deformiruemosť sred i rasprostranenie sejsmicheskikh voln / G. I. Gurevich. – M. : Nauka, 1974. – 483 s.
8. Rabinovich, A. L. Vvedenie v mekhaniku armirovannyh polimerov / A. L. Rabinovich. – M. : Nauka, 1970. – 482 s.
9. Rybin, V. V. Bol'shie plasticheskie deformacii i razrushenie materiala / V. V. Rybin. – M. : Metallurgiya, 1986. – 224 s.
10. Lihachev, V. A. Strukturno-analiticheskaya teoriya prochnosti / V. A. Lihachev, V. G. Malinin. – SPb. : Nauka, 1993. – 470 s.
11. Panin, V. E. Strukturnye urovni deformacii tverdyh tel / V. E. Panin, V. A. Lihachev, YU. V. Grinyaev. – Novosibirsk : Nauka, 1990. – 225 s.
12. Strukturnye urovni plasticheskoy deformacii i razrusheniya / V. E. Panin, YU. V. Grinyaev, V. I. Danilov [i dr.]. – Novosibirsk : Nauka, 1990. – 225 s.
13. Hohlov, A. V. Svoystva nelinejnoj modeli vyazkoupругoplastichnosti tipa Maksvela s dvumya material'nymi funkciyami / A. V. Hohlov // Vestn. Mosk. un-ta. Seriya 1. Matematika. Mekhanika. – 2016. – № 6. – S. 36–41.
14. Holodar', B. G. Opisaniye povedeniya upругo-plasticheskikh materialov s pomoshch'yu uravnenij Maksvela s nelinejnoj vyazko-st'yu / B. G. Holodar' // Mekhanika. Issledovaniya i innovacii. – Gornel', 2025. – Vyp. 18. – S. 167–177.
15. Korn, G. Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov / G. Korn, T. Korn. – M. : Nauka, 1970. – 720 s.

Материал поступил 25.05.2026, одобрен 01.07.2026,
принят к публикации 06.07.2026

УДК [628.218+551.506.1](083.74)

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫПАДЕНИЯ ОСАДКОВ В БЕЛАРУСИ С ПРЕДЛОЖЕНИЯМИ ПО ЕЕ УЧЕТУ ПРИ РАСЧЕТАХ И ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ДОЖДЕВОЙ КАНАЛИЗАЦИИ

В. Н. Ануфриев¹, В. Н. Корнеев², Г. А. Волкова³

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: vladimir.anufriev@rambler.ru

² Ведущий специалист, ООО «БелГидротехпроект», Минск, Беларусь, e-mail: v_korn@rambler.ru

³ К. т. н., доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: volga-brest@mail.ru

Реферат

Проведена оценка изменения максимальной интенсивности выпадения осадков в Беларуси, включая ее значение за 20 мин. с учетом анализа слоя осадков. В том числе, выполнена количественная оценка характеристик дождевого стока, включая максимальные расходы воды при интенсивных дождях различной вероятности превышения (обеспеченности) и их распределение за заданный период максимальной интенсивности дождя. Разработаны предложения по учету полученных данных при расчетах и проектировании систем дождевой канализации. В том числе, разработаны предложения по учету полученных данных в СП 2.24.04-2026 «Строительная климатология» и внесению изменений в СН 4.01.02-2019 «Канализация. Наружные сети и сооружения». Предложено обновление таблицы с данными по расчетной интенсивности дождя, средним годовым суммам осадков, суммам осадков за теплый (апрель – октябрь) и холодный (ноябрь – март) периоды с учетом результатов обработки исходной метеорологической информации за период с 2003 года по 2024 год. Расчетная интенсивность дождя в Беларуси по данным метеорологических наблюдений за период с 2003 года по 2024 год отличается от исследований, которые выполнялись более 30 лет назад. Значения обновленного параметра расчетной интенсивности дождя сравнимы с результатами его исследований в соседних государствах, что подтверждает корректность выполненных расчетов и оценок, а также необходимость учета их результатов в нормативных документах.

Ключевые слова: водоотведение, воды сточные поверхностные, дождевая канализация, интенсивность дождя, канализация, количество осадков, коэффициент стока, система канализации, слой атмосферных осадков, слой атмосферных осадков за дождь.

ASSESSMENT OF CHANGES IN MAXIMUM PRECIPITATION INTENSITY IN BELARUS WITH PROPOSALS FOR ITS CONSIDERATION IN CALCULATIONS AND DESIGN OF STORM DRAINAGE SYSTEMS

V. N. Anoufrieu, V. N. Korneev, G. A. Volkova

Abstract

An assessment of changes in maximum precipitation intensity in Belarus, including its value over a 20-minute period, was conducted, taking into account the precipitation layer analysis. Research included a quantitative assessment of rainfall runoff characteristics including maximum water discharges during intense rainfall with varying probabilities of exceedance (probability) and their distribution over a given period of maximum rainfall intensity. Proposals were developed for incorporating the obtained data into the calculations and design of storm water drainage systems. These proposals also included proposals for using the obtained data in the SP "Construction Climatology" and for amending SN 4.01.02-2019 "Sewerage. External networks and constructions". An update to the table of estimated rainfall intensity, average annual precipitation totals, and precipitation totals for warm (April-October) and cold (November-March) periods was proposed, taking into account the results of processing the initial meteorological data for the period from 2003 to 2025. Estimated rainfall intensity in Belarus, based on meteorological observations for the period from 2003 to 2024, differs from studies conducted more than 30 years ago. The updated estimated rainfall intensity values are comparable to the results of studies in neighbouring countries. This confirms the accuracy of the calculations and estimates, as well as the need to incorporate their results in regulatory documents.

Keywords: water drainage, storm water, storm water drainage, rainfall intensity, sewerage, precipitation amount, runoff coefficient, sewerage system, precipitation layer, precipitation layer for rain.

Введение

Представленные в настоящей публикации результаты получены в целях повышения качества проектирования и эксплуатации сетей канализации, в том числе в условиях изменяющегося климата и сложившейся застройки, в также для совершенствования ТНПА, в том числе для уточнения существующих, а также установления новых технических требований к проектированию наружных сетей и сооружений канализации.

В процессе развития городских агломераций и промышленности существенным образом меняются условия формирования и отвода поверхностных сточных вод. Здесь действуют различные факторы, среди которых следует отметить влияние изменения климата, увеличение расходов поверхностных сточных вод вследствие изменения регулирующей и аккумулирующей способности урбанизированных территорий. При этом пропускная способность систем дождевой канализации может быть недостаточна для пропуска быстро сфор-

мировавшихся максимальных расходов дождевых сточных вод, в результате чего могут возникать подпоры в системе отвода дождевой канализации, что приводит к интенсивному подъему уровней на отдельных участках. Риск указанных неблагоприятных ситуаций особенно возрастает в связи с изменением климата и его воздействием на водные ресурсы, которое выражается в более частом возникновении опасных гидрометеорологических явлений, включая дождевые паводки и засушливые периоды, усилении неравномерности внутригодового распределения выпадения осадков и поверхностного стока [1].

При проведении гидравлического расчета в ходе проектирования сетей дождевой канализации основной величиной является расчетный расход поверхностных сточных вод с использованием метода предельных интенсивностей, для чего необходимо определение удельного расхода воды q_{20} (л/с) на 1 га водосборной территории с учетом характеристик выпавшего слоя осадков

при максимальной интенсивности дождя продолжительностью 20 мин. При вероятности превышения (обеспеченности) $P = 1\%$. Указанные параметры используются согласно технических нормативных правовых актов, устанавливающих требования к проектированию и эксплуатации дождевой канализации в Беларуси, включая СН 4.01.02-2019 «Канализация. Наружные сети и сооружения» [2] и СП 2.04.04-2026 «Строительная климатология» [3]. Обобщая анализ нормативной базы Российской Федерации, можно отметить, что в Российской Федерации также, как и в Республике Беларусь, расчетные расходы дождевых сточных вод для канализационных сетей определяются методом предельных интенсивностей стока с параметрами, указанными в [4–8]. Положения нормативов по проектированию систем отведения поверхностных сточных вод в странах Европейского Союза на примере Германии, также как и в Республике Беларусь, основаны на подобных параметрах, включая слой осадков, интенсивность и продолжительность их выпадения, а также на последующих гидрологических и гидравлических расчетах.

В Беларуси исследования по оценке изменения максимальной интенсивности выпадения осадков выполнялись, в основном, в конце 70-х годов XX-го века, результаты которых представлены в Методических рекомендациях 1978 г. [9, 10]. С учетом значимого изменения климата за последние более чем 50 лет актуальным является проведение оценки современного изменения максимальной интенсивности выпадения осадков в Беларуси с предложениями по учету полученных при этом результатов при расчетах и проектировании систем дождевой канализации.

По результатам проведенных исследований разработаны предложения по учету полученных данных в СП 2.04.04 [3] и внесению изменений в СН 4.01.02 [2].

Исходными данными при проведении исследований являлись данные, полученные по репрезентативным пунктам наблюдений государственной сети гидрометеорологических наблюдений Республики Беларусь, расчетные параметры, установленные в ТНПА для проектирования дождевой канализации.

Обобщение результатов анализа изменения максимальной интенсивности выпадения осадков в Беларуси

С целью уточнения удельного расхода воды q_{20} (л/с) на 1 га водосборной территории с учетом характеристик выпавшего слоя осадков при максимальной интенсивности дождя продолжительностью 20 мин. при различной вероятности превышения (обеспеченности), включая $P = 1\%$, выполнен анализ наблюдений максимальной интенсивности осадков (мм), выпавших за 20-минутный интервал за современный период 2003–2024 гг. по 10-ти пунктам наблюдений ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (рисунок 1), а также детальных наблюдений за слоем выпавших осадков в период дождя максимальной интенсивности (гидрографа дождя по слою осадков). На данных пунктах наблюдений функционируют pluвиографы – приборы, предназначенные для непрерывной записи количества, интенсивности и продолжительности осадков. Запись результатов измерений на ленте самописца осуществляется с интервалом в 10 минут, что позволяет отследить как прохождение максимума осадков, так и гидрограф их выпадения за 20 минут и за другой интервал при прохождении максимума, например, при необходимости до одного или двух часов.

Обобщение результатов наблюдений гидрографа дождя по слою осадков для периода максимальной интенсивности дождя по пунктам наблюдений приведено на рисунке 2.

Обобщение результатов наблюдений и расчетов в виде измеренных в 20-минутный период максимальной интенсивности выпадения осадков за последние 20 лет (мм/мин), расчетного максимального слоя осадков вероятностью превышения (обеспеченностью) $P = 1\%$ (мм/мин) и по интенсивности дождя q_{20} (л/с) на 1 га продолжительностью 20 мин при вероятности превышения $P = 1\%$ год приведены в таблице 1.

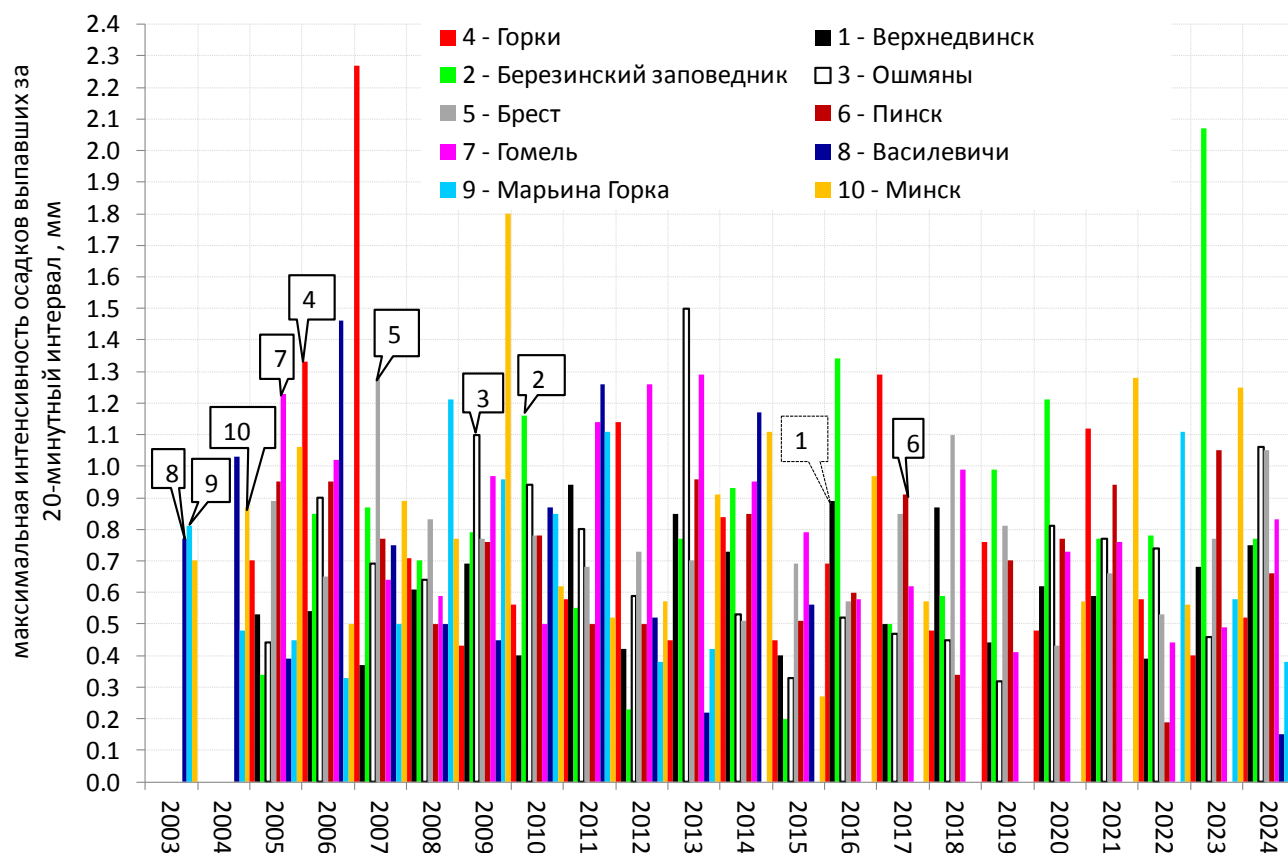


Рисунок 1 – Обобщение результатов наблюдений максимальной интенсивности осадков (мм), выпавших за 20-минутный интервал по пунктам наблюдений

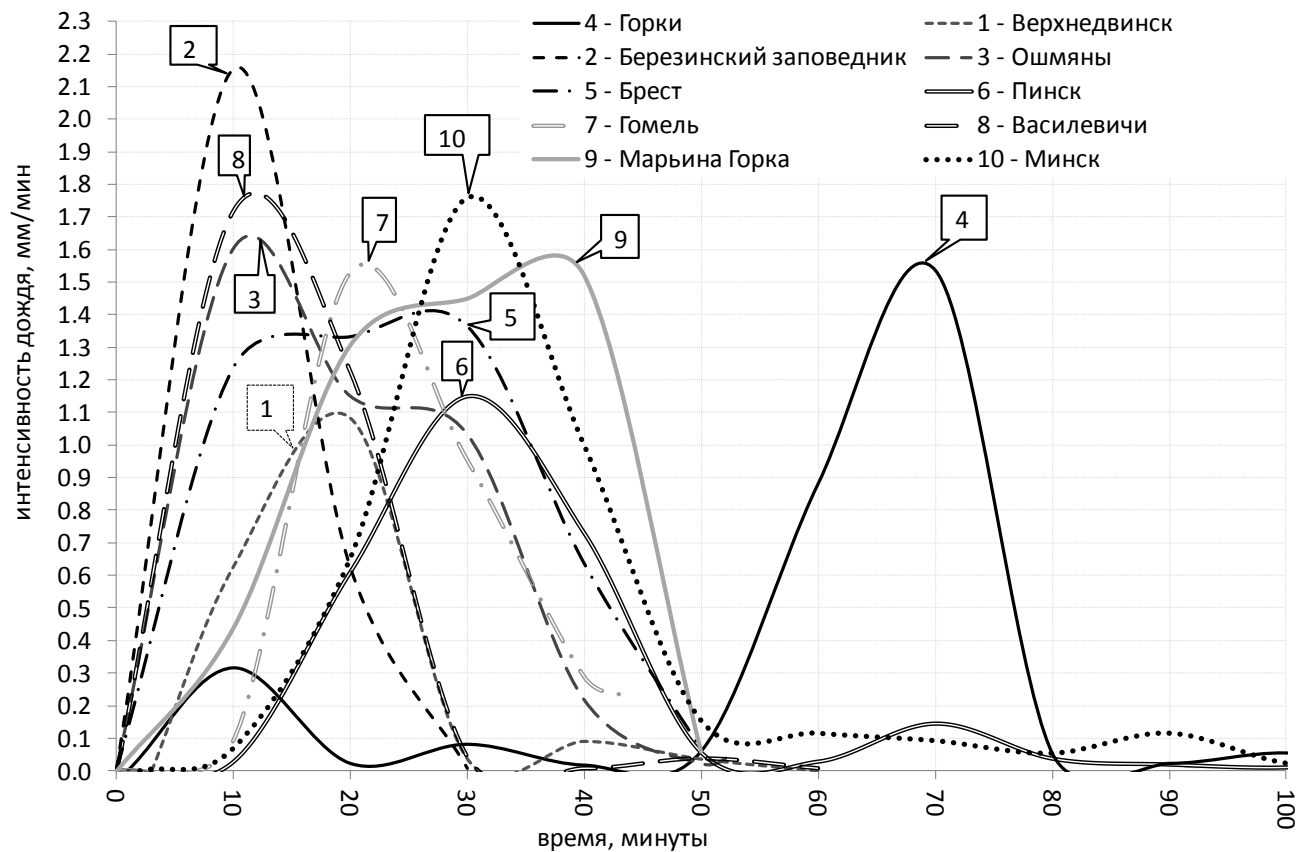


Рисунок 2 – Обобщение результатов наблюдений гидрографа дождя по слою осадков в период максимальной интенсивности дождя по пунктам наблюдений

Таблица 1 – Обобщение результатов наблюдений и расчетов максимального слоя осадков и интенсивности дождя в период максимальной интенсивности выпадения осадков

Пункт наблюдения	Максимальный измеренный слой осадков за 1 мин, мм/мин	Расчетные значения при максимальной интенсивности дождя продолжительностью 20 мин при вероятности превышения $P = 1\%$			Расчетные значения при максимальной интенсивности дождя продолжительностью 20 мин при вероятности превышения $P = 10\%$		
		Максимальный слой осадков, мм/мин	Слой осадков h_{20} за 20 мин, мм/мин	Интенсивность дождя q_{20} (л/с) на 1 га	Максимальный слой осадков, мм/мин	Коэффициент перехода от q_{20} , $P = 10\%$ к q_{20} , $P = 1\%$	Интенсивность дождя q_{20} (л/с) на 1 га
Верхнедвинск	1,190	1,083	0,708	118	0,905	1,20	99
Березинский заповедник	3,210	2,155	1,234	206	1,52	1,42	145
Ошмяны	2,200	1,601	1,088	181	1,15	1,39	130
Горки	2,880	1,536	1,001	167	1,44	1,07	156
Брест	1,290	1,363	1,173	195	1,11	1,23	159
Пинск	1,280	1,149	0,909	151	1,04	1,10	137
Гомель	1,590	1,529	1,027	171	1,25	1,22	140
Василевичи	3,960	1,718	1,165	194	1,21	1,42	137
Марьино Горка	1,280	1,521	1,138	190	1,22	1,25	152
Минск	2,290	1,760	1,293	216	1,25	1,41	153

Следует отметить, что расчетная интенсивность дождя q_{20} по данным наблюдений за период наблюдений 2005–2024 гг. в диапазоне от 118 л/с до 216 л/с на 1 га отличается в большую сторону от расчетной интенсивности дождя, приведенной в Методических рекомендациях 1978 года [9] q_{20} в диапазоне от 85 л/с до 114 л/с на 1 га, которые также представлены в таблице А.1 приложения к СН 4.01.02-2019 (см. рисунок 3). Увеличение интенсивности дождя

может быть обусловлено совершенствованием средств измерений слоя осадков с увеличением частоты измерений и повышением точности выявления и измерения пика выпадения осадков, а также с увеличением риска опасных гидрометеорологических явлений и усилением степени неравномерности внутригодового выпадения осадков и речного стока в связи с изменением климата, приводящего к наводнениям и засухам.

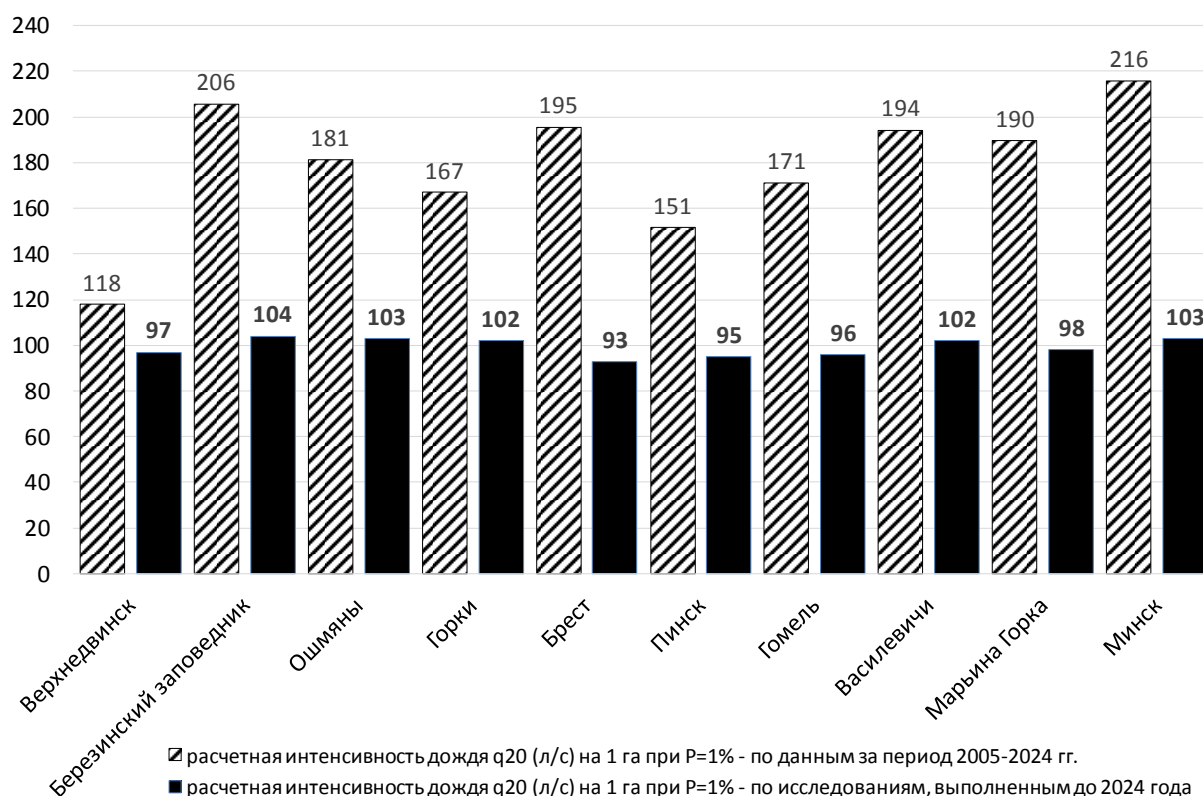


Рисунок 3 – Сравнение расчетной интенсивности дождя по данным за период 2005–2024 гг. и по результатам исследований, выполненных до 2024 года

По результатам проведенных исследований разработаны предложения по учету полученных данных при расчетах и проектировании систем дождевой канализации, в том числе изменения и дополнения в СП 2.04.04 [3] и СН 4.01.02 [2] путем включения обновленных расчетных значений интенсивности дождя q_{20} (л/с) на 1 га при максимальной интенсивности дождя продолжительностью 20 мин. при вероятности превышения $P = 1\%$ в табличном виде (таблица 2) и в графическом виде (рисунок 4).

Таблица 2 – Расчетная интенсивность дождя q_{20} , л/с за 20 мин с 1 га при $P = 1\%$ для населенных пунктов

№ п/п	Станция	Расчетная интенсивность дождя q_{20} , л/с за 20 мин с 1 га при $P = 1\%$
Витебская область		
1	Езерище	182
2	Верхнедвинск	118
3	Полоцк	157
4	Шарковщина	156
5	Витебск	190
6	Лынтупы	186
7	Докшицы	191
8	Сенно	194
9	Березинский заповедник	206
10	Орша	183
Гродненская область		
11	Ошмяны	181
12	Лида	181
13	Гродно	180
14	Новогрудок	182
15	Волковыск	179
Минская область		
16	Нарочь	189
17	Вилейка	201
18	Борисов	210

№ п/п	Станция	Расчетная интенсивность дождя q_{20} , л/с за 20 мин с 1 га при $P = 1\%$
19	Воложин	196
20	Минск	216
21	Березино	199
22	Столбцы	191
23	Марьяна Горка	190
24	Слуцк	180
Могилевская область		
25	Могилев	180
26	Горки	167
27	Кличев	192
28	Славгород	175
29	Костюковичи	172
30	Бобруйск	190
31	Мстиславль	180
Брестская область		
32	Барановичи	177
33	Высокое	193
34	Ганцевичи	171
35	Ивацевичи	171
36	Пружаны	179
37	Полесская	161
38	Брест	195
39	Пинск	151
Гомельская область		
40	Жлобин	186
41	Октябрь	190
42	Гомель	171
43	Василевичи	194
44	Житковичи	179
45	Мозырь	194
46	Лельчицы	185
47	Брагин	189

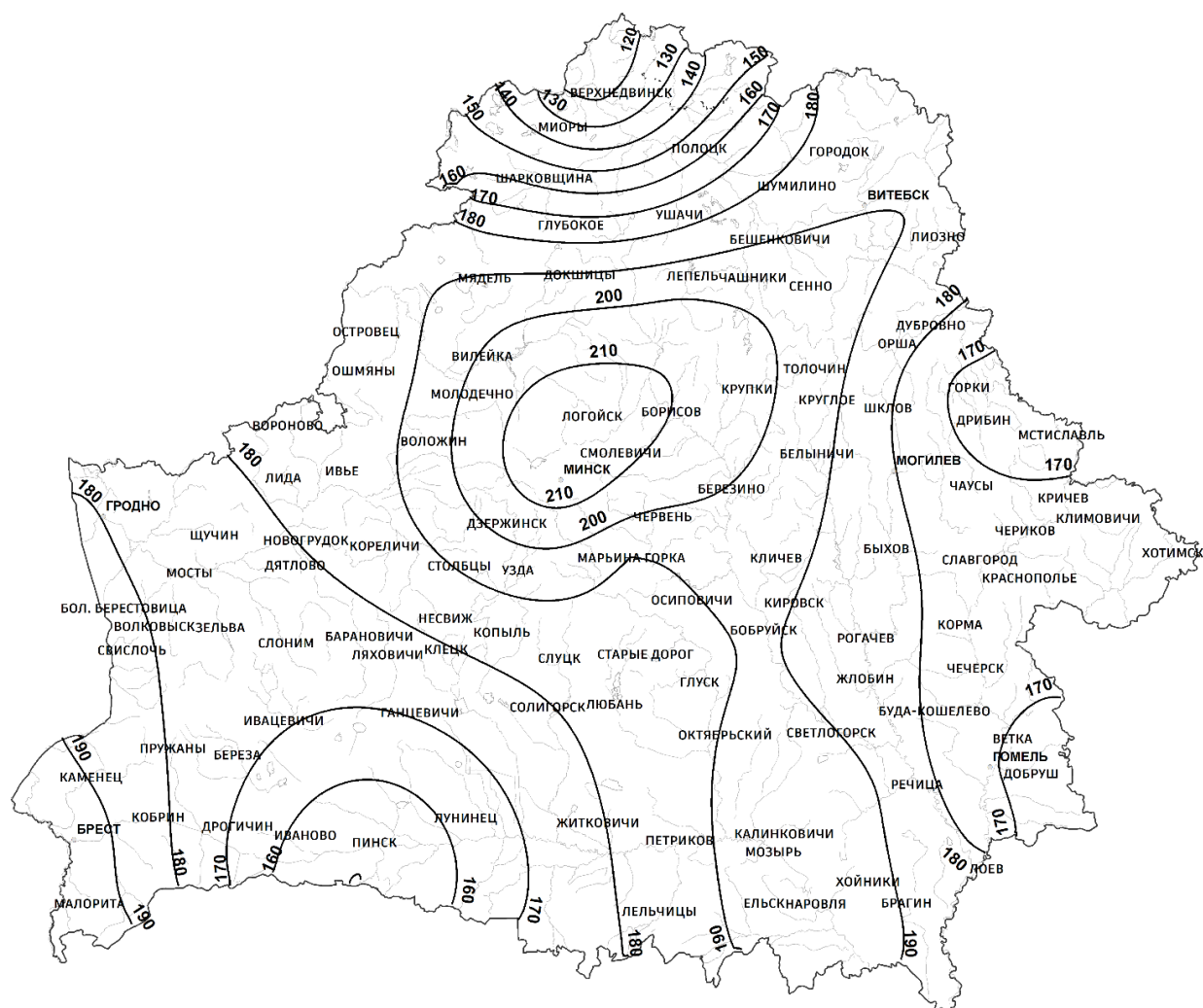


Рисунок 4 – Карта – схема интенсивности дождя q_{20} (л/с) на 1 га продолжительностью 20 мин при $P = 1\%$

Расчетная интенсивность дождя q_{20} для территории Беларуси в диапазоне от 118 л/с до 216 л/с на 1 га по всем десяти пунктам наблюдений осадков, на которых имеется возможность дискретных измерений через заданный временной интервал в режиме реального времени, сравнимы с результатами измерений интенсивности дождя в странах Европейского Союза.

Например, в Германии по 40 пунктам наблюдений указанная интенсивность дождя q_{20} составляет от 85 до 200 (л/с) на 1 га [11].

В Польше по 21 пункту наблюдений слой стока составил от 31,0 мм/ч до 39,5 мм/ч [12, 13] или от 0,517 мм/мин до 0,658 мм/мин, что в пересчете на интенсивность дождя q_{60} составит от 86 л/с до 110 л/с на 1 га при максимальной интенсивности дождя продолжительностью 1 ч (60 мин) согласно результатам наблюдений, при вероятности превышения $P = 1\%$. Расчет интенсивности дождя q_{60} по результатам наблюдений для всех пунктов наблюдений Беларуси при максимальной интенсивности дождя продолжительностью 1 ч (60 мин), при вероятности превышения $P = 1\%$ позволил определить соответствующий диапазон для Беларуси с учетом пересчета от q_{20} с диапазоном от 118 л/с до 216 л/с к q_{60} с диапазоном от 72 л/с до 159 л/с на 1 га, что сравнимо с данными соседнего государства – Польши, с диапазоном от 86 л/с до 110 л/с на 1 га.

В Латвии расчетная интенсивность дождя продолжительностью 20 мин. при вероятности превышения $P = 10\%$ изменяется в диапазоне от 100 л/с до 180 л/с [14, 15]. С использованием кривых вероятностей распределения максимального слоя осадков коэффициент перехода от вероятности превышения $P = 10\%$ к вероятности превышения $P = 1\%$ для пунктов наблюдения осадков в Беларуси, выполняемых в дистанционном режиме, изменяется в диапазоне

от 1,07 до 1,42 со средним значением 1,27 (см. таблицу 1 выше). С учетом указанного коэффициента перехода для Беларуси расчетный диапазон q_{20} при вероятности превышения $P = 10\%$ может составить от 99 л/с до 159 л/с, что сравнимо с диапазоном изменения q_{20} при $P = 10\%$ в Латвии (от 100 л/с до 180 л/с), и меньше чем в Латвии за счет более влажного климата в указанном государстве, обусловленного более близким расположением к морю.

Построение гидрографов дождевых паводков для естественных водотоков может выполняться по разделу 7.7 СП 3.04.03-2026 [16], либо с использованием алгоритма, представленного в публикации [17], либо с использованием методики М. В. Молокова [18–20]. Методика построения гидрографов дождевых паводков М. В. Молокова при заданном максимальном расходе дождевых вод q_0 , определенном по максимальной интенсивности дождя q_{20} , при $P = 1$ год может быть использована и для водосборов территорий населенных пунктов и предприятий.

Заключение

Расчетная интенсивность дождя в Беларуси продолжительностью 20 мин. при вероятности превышения $P = 1\%$ по данным метеорологических наблюдений за период с 2005 года по 2024 год отличается от ранее проведенных исследований, которые выполнялись более 30 лет назад, а также значения указанного параметра сравнимы с результатами его исследований в соседних государствах, что подтверждает корректность выполненных оценок и гидрологических расчетов указанного параметра и необходимость его учета в СП 2.04.04 [3] и внесения изменений в СН 4.01.02 [2] при расчетах и проектировании систем дождевой канализации.

Список цитированных источников

1. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / под общ. ред. А. А. Волчека, В. Н. Корнеева. – Брест : Альтернатива, 2017. – 228 с.
2. Канализация. Наружные сети и сооружения : СН 4.01.02-2019. – Минск : Минстройархитектуры, 2024. – 82 с.
3. Строительная климатология : СП 2.04.04-2026. – Минск : Минстройархитектуры, 2026. – 58 с.
4. Курганов, А. М. Таблицы параметров предельной интенсивности дождя для определения расходов в системах водоотведения. Справочное пособие / А. М. Курганов. – М. : Стройиздат, 1989. – 113 с.
5. Алексеев, М. И. Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий. Учебное пособие. / М. И. Алексеев, А. М. Курганов. – М. : АСВ; СПб. : Спайсу, 2000. – 352 с.
6. Канализация. Наружные сети и сооружения : СП 32.13330.2018 : СНиП 2.04.03-85 : утв. приказом Мин-ва строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 25 дек. 2018 г. № 860/пр. – М. : Стандартинформ, 2019. – 76 с.
7. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. – М. : НИИ ВОДГЕО, 2014. – 88 с.
8. Пособие по проектированию водоотводных и дренажных систем / Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве (к СП 121.13330.2019). – М., 2026. – 110 с.
9. Методические рекомендации по расчету интенсивности дождей при проектировании канализации в условиях Белоруссии (временные). – Минск : Белорусский политехнический институт, 1978. – 31 с.
10. Гатилло, П. Д. Распределение периодов однократного превышения сумм осадков за дождь на территории Белоруссии / П. Д. Гатилло, А. Н. Одинец // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – Минск, 1986. – Вып. 3. – С. 25–34.
11. Bischof, W. Abwassertechnik / W. Bischof. – Stuttgart : Teubner, 1993. – 629 s.
12. Wilk-Jakubowski, J. Measuring Rain Rates Exceeding the Polish Average by 0.01% / J. Wilk-Jakubowski // Polish Journal of Environmental Studies. – 2018. – Vol. 27, № 1. – P. 383–390.
13. Probability Function Estimation for the Maximum Precipitation Model Using Kernel Estimators / M. Karczewski, B. Kaźmierczak, A. Michalski, L. Kuchar // Rocznik Ochrona Środowiska. – 2022. – Vol. 24. – P. 260–275.
14. Tilgalis, F. Calculation of maximum rainstorm flow rate in areas of Latvia / F. Tilgalis, R. Ziemelnieks // 5th International Conference CIVIL ENGINEERING'15 Proceedings Landscape, environment and land management, 2015. – P. 82–86.
15. Impacts of Climate Change on Rainfall Extremes and Urban Drainage Systems / P. Willems, J. Olsson, K. Arnbjerg-Nielsen [et al.]. – London : IWA Publishing, 2012. – 238 p.
16. Правила расчета гидрологических характеристик : СП 3.04.03-2026. – Минск : Минстройархитектуры, 2026. – 16 с.
17. Логинов, В. Ф. Анализ и моделирование гидрографов дождевых паводков Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, Т. А. Шелест // Водные ресурсы. – 2015. – Т. 42, № 3. – С. 268–278.
18. Георгиевский, Ю. М. Гидрологические прогнозы / Ю. М. Георгиевский, С. В. Шаночкин – СПб. : РГГМУ, 2007. – 436 с.
19. Молоков, М. В. Очистка поверхностного стока с территорий городов и промышленных площадок / М. В. Молоков, В. Н. Шифрин. – М. : Стройиздат, 1977. – 104 с.
20. Молоков, М. В. Дождевая канализация площадок промышленных предприятий / М. В. Молоков. – Л. : Издательство литературы по строительству, 1986. – 184 с.

References

1. Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchetoм izmeneniya klimata / pod obshch. red. A. A. Volcheka, V. N. Korneeva. – Brest : Al'ternativa, 2017. – 228 s.
2. Kanalizaciya. Naruzhnye seti i sooruzheniya : SN 4.01.02-2019. – Minsk : Minstrojarkhitektury, 2024. – 82 s.
3. Stroitel'naya klimatologiya : SP 2.04.04-2026. – Minsk : Minstrojarkhitektury, 2026. – 58 s.
4. Kurganov, A. M. Tablicy parametrov predel'noj intensivnosti dozhdya dlya opredeleniya rashchodov v sistemah vodootvedeniya. Spravochnoe posobie / A. M. Kurganov. – M. : Strojizdat, 1989. – 113 s.
5. Alekseev, M. I. Organizaciya otvedeniya poverhnostnogo (dozhdevogo i talogo) stoka s urbanizirovannyh territorij. Uchebnoe posobie. / M. I. Alekseev, A. M. Kurganov. – M. : ASV; SPb. : Spajsu, 2000. – 352 s.
6. Kanalizaciya. Naruzhnye seti i sooruzheniya : SP 32.13330.2018 : SNiP 2.04.03-85 : utv. prikazom Min-va stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii ot 25 dek. 2018 g. № 860/pr. – M. : Standartinform, 2019. – 76 c.
7. Rekomendacii po raschetu sistem sbora, otvedeniya i oчитki poverhnostnogo stoka s selitebnyh territorij, ploshchadok predpriyatij i opredeleniyu uslovij vypuska ego v vodnye ob'ekty. – M. : NI VODGEO, 2014. – 88 s.
8. Posobie po proektirovaniyu vodootvodnyh i drenaznyh sistem / Federal'nyj centr normirovaniya, standartizacii i tekhnicheskoy ocenki sootvetstviya v stroitel'stve (k SP 121.13330.2019). – M., 2026. – 110 s.
9. Metodicheskie rekomendacii po raschetu intensivnosti dozhdaj pri proektirovanii kanalizacii v usloviyah Belorussii (vremennye). – Minsk : Belorusskij politekhnicheskij institut, 1978. – 31 s.
10. Gatillo, P. D. Raspredelenie periodov odnokratnogo prevysheniya summ osadkov za dozhd' na territorii Belorussii / P. D. Gatillo, A. N. Odinec // Vodnoe hozyajstvo i gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. – Minsk, 1986. – Vyp. 3. – S. 25–34.
11. Bischof, W. Abwassertechnik / W. Bischof. – Stuttgart : Teubner, 1993. – 629 s.
12. Wilk-Jakubowski, J. Measuring Rain Rates Exceeding the Polish Average by 0.01% / J. Wilk-Jakubowski // Polish Journal of Environmental Studies. – 2018. – Vol. 27, № 1. – P. 383–390.
13. Probability Function Estimation for the Maximum Precipitation Model Using Kernel Estimators / M. Karczewski, B. Kaźmierczak, A. Michalski, L. Kuchar // Rocznik Ochrona Środowiska. – 2022. – Vol. 24. – P. 260–275.
14. Tilgalis, F. Calculation of maximum rainstorm flow rate in areas of Latvia / F. Tilgalis, R. Ziemelnieks // 5th International Conference CIVIL ENGINEERING'15 Proceedings Landscape, environment and land management, 2015. – P. 82–86.
15. Impacts of Climate Change on Rainfall Extremes and Urban Drainage Systems / P. Willems, J. Olsson, K. Arnbjerg-Nielsen [et al.]. – London : IWA Publishing, 2012. – 238 p.
16. Pravila rascheta gidrologicheskikh harakteristik : SP 3.04.03-2026. – Minsk : Minstrojarkhitektury, 2026. – 16 s.
17. Loginov, V. F. Analiz i modelirovanie gidrogrfov dozhdevyh pavodkov Belarusi / V. F. Loginov, A. A. Volchek, T. A. Shelest // Vodnye resursy. – 2015. – T. 42, № 3. – S. 268–278.
18. Georgievskij, YU. M. Gidrologicheskie prognozy / YU. M. Georgievskij, S. V. SHanochkin – SPb. : RGGMU, 2007. – 436 s.
19. Molokov, M. V. Oчistka poverhnostnogo stoka s territorij gorodov i promyshlennyh ploshchadok / M. V. Molokov, V. N. SHifrin. – M. : Strojizdat, 1977. – 104 s.
20. Molokov, M. V. Dozhddevaya kanalizaciya ploshchadok promyshlennyh predpriyatij / M. V. Molokov. – L. : Izdatel'stvo literatury po stroitel'stву, 1986. – 184 s.

Материал поступил 26.06.2026, одобрен 14.07.2026,
принят к публикации 14.07.2026

УДК 628.316

ПРИМЕНЕНИЕ ОЗОНИРОВАНИЯ И БЕЗНАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА И МАРГАНЦА ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

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: prof.volchak@yandex.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

Статья посвящена проблеме повышения энергоэффективности и технологической надежности станций обезжелезивания и деманганации подземных вод в условиях Республики Беларусь. Авторами проведен анализ химических форм присутствия железа в природных водах, включая органически связанные и коллоидные формы, которые характеризуются устойчивостью к традиционным методам аэрации.

В работе представлен сравнительный технико-экономический анализ двух технологических схем водоподготовки, таких как традиционная система напорной аэрации с напорными фильтрами с зернистой загрузкой и предлагаемой системы безнапорного озонирования с применением самопромывных фильтров непрерывного действия. Приведена принципиальная технологическая схема безнапорной станции обезжелезивания с детальным описанием основных узлов и гидравлических режимов работы. Выполнены расчеты требуемой дозы озона с учетом стехиометрии окислительных реакций Fe^{2+} и Mn^{2+} , включая корректировочные коэффициенты на конкурирующие процессы окисления органических веществ. Произведен расчет энергозатрат для станции производительностью 10 000 м³/сут, включающий затраты скважинных насосов, систем окисления, фильтрации и промывки для обеих технологий. На основе расчетных данных обосновано преимущество второй технологии, позволяющее снизить удельное энергопотребление с 0,2 до 0,12 кВт·ч/м³, что обеспечивает общую экономию электроэнергии порядка 40 %.

Особое внимание уделено окислительной способности озона в отношении трудноудаляемых форм железа и марганца. В статье подчеркивается необходимость проведения предварительных лабораторных и полевых испытаний исходной воды для разработки надежной и эффективной технологической схемы. Рассмотрены возможности реализации данной технологии с использованием отечественного оборудования производства компаний «Сифания-Экотехника» и «Тор Сурт», что подтверждает возможность импортозамещения и внедрения высокоэффективных решений в практику водоснабжения Республики Беларусь.

Ключевые слова: обезжелезивание, деманганация, озонирование, безнапорная фильтрация, энергоэффективность, органически связанное железо, самопромывные фильтры.

APPLICATION OF OZONATION AND GRAVITY FILTRATION FOR IRON AND MANGANESE REMOVAL FROM GROUNDWATER

A. A. Volchak, G. O. Naumchik, V. S. Belov

Abstract

The article addresses the problem of improving energy efficiency and technological reliability of iron and manganese removal stations for groundwater treatment in the Republic of Belarus. The authors have analyzed the chemical forms of iron present in natural waters, including organically bound and colloidal forms, which are characterized by resistance to traditional aeration methods.

The paper presents a comparative technical and economic analysis of two water treatment technological schemes, such as the traditional pressurized aeration system with pressure filters containing granular media and the proposed gravity ozonation system using continuous self-washing filters. A schematic diagram of a gravity-type iron removal station is provided with a detailed description of the main units and hydraulic operating modes. Calculations of the required ozone dose have been performed taking into account the stoichiometry of Fe^{2+} and Mn^{2+} oxidation reactions, including correction factors for competing oxidation processes of organic substances. Energy consumption calculations have been carried out for a plant with a capacity of 10,000 m³/day, including the costs of well pumps, oxidation systems, filtration and backwashing for both technologies. Based on the calculated data, the advantage of the second technology has been substantiated, allowing for a reduction in specific energy consumption from 0.2 to 0.12 kWh/m³, which provides overall electricity savings of approximately 40 %.

Special attention is given to the oxidizing capacity of ozone with respect to difficult-to-remove forms of iron and manganese. The article emphasizes the necessity of conducting preliminary laboratory and field tests of raw water for the development of a reliable and efficient technological scheme. The possibilities of implementing this technology using domestic equipment manufactured by "Sifania-Ecotechnika" and "Tor Surt" companies are considered, which confirms the potential for import substitution and implementation of highly efficient solutions in the water supply practice of the Republic of Belarus.

Keywords: iron removal, manganese removal, ozonation, gravity filtration, energy efficiency, organically bound iron, self-washing filters.

Введение

В Республике Беларусь подземные воды, являются основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения, как во всех крупных городах, так и в сельской местности. По предварительным данным, объем добычи вод за 2022 год составил 1,42 млрд м³, в том числе подземных 813 млн м³ и поверхностных 614 млн м³. По сравнению с предыдущим периодом, данный показатель вырос на 7 %. В том числе добыча подземных вод увеличилась на 1,7 % за счет роста объема водоснабжения Минска [1].

На территории Республики Беларусь разведано 662 месторождений (участков водозаборов) с эксплуатационными запасами пресных подземных вод в количестве 6,38 млн м³/сут. из них на 658 участках (водозаборах) запасы подземных вод разведаны и утверждены

для хозяйственно-питьевых целей и на четырех участках (водозаборах) – для технических. Использование пресных подземных вод хозяйственно-питьевого назначения с утвержденными запасами осуществляется на 279 участках (водозаборах) для централизованного водоснабжения 229 городов, промышленных центров и объектов. Однако освоение этих запасов происходит недостаточно активно, не эксплуатируется 306 месторождения, что составляет 49,9 % от числа разведанных [2].

Подземные воды, особенно в районах гумидного климата, включая большую часть территории Республики Беларусь, часто содержат избыточные концентрации железа (Fe) и марганца (Mn). Их присутствие обусловлено геохимическими условиями формирования водоносных горизонтов. Основными источниками являются водоносные горизонты кайнозойских и меловых отложений [3].

Распространение вод с повышенным содержанием железа и марганца носит региональный характер. Наиболее проблемными являются Полесский регион (Гомельская, Брестская области), где глубокие меловые и палеоген-неогеновые горизонты часто содержат железистые воды (до 5–10 мг/дм³ Fe и более) с высокой цветностью, связанной с наличием органических веществ таких как гумусовые кислоты. Центральную и северную части страны (Минская, Витебская области) характеризуют повышенные концентрации железа (1–3 мг/дм³) характерные для четвертичных и меловых водоносных комплексов. Содержание марганца часто коррелирует с содержанием железа [4].

В анаэробных условиях в породах и в водоносных горизонтах преобладает растворимая двухвалентная форма железа Fe²⁺ и марганца Mn²⁺. Эти ионы стабильны в бескислородной среде и легко вымываются в грунтовые воды. При контакте с кислородом Fe²⁺ окисляется до Fe³⁺, который образует нерастворимые гидроксиды и выпадает в осадок. Аналогично Mn²⁺ может окисляться до оксидных форм марганца, но для марганца обычно требуются более сильные окислители или более длительная стадия созревания [5].

Помимо типичной растворённой неорганической формы Fe²⁺, подземные воды могут содержать органически связанное железо, а также коллоидные формы железа, стабилизированные природными органическими веществами [6]. Органически связанное железо образуется, когда ионы железа (чаще Fe³⁺, реже Fe²⁺) вступают в химическое взаимодействие с органическими лигандами – главным образом, гуминовыми и фульвокислотами, которые присутствуют в водоносных горизонтах, богатых торфяными включениями или органогенными отложениями. Гуминовые вещества обладают множеством функциональных групп (карбоксильные, фенольные, карбонильные), которые способны хелатировать Fe³⁺. В результате образуются стабильные хелатные комплексы, размер которых варьируется от нескольких нанометров до десятков нанометров. Эти комплексы не склонны к быстрой коагуляции или осаждению, поскольку органическая оболочка препятствует агрегации частиц и снижает их плотность заряда. Коллоидные формы железа даже после частичного окисления Fe²⁺ в водной системе могут образовываться нерастворимые гидроксиды Fe(OH)₃, которые формируют частицы диаметром 10–500 нм. В присутствии природной органики эти частицы покрываются адсорбированными органическими молекулами, а также становятся коллоидно-устойчивыми за счёт двойного электрического слоя и стерической стабилизации. [7] Данные частицы сохраняются в воде в виде опалесцирующей или слегка мутной взвеси, которую сложно удалить обычной фильтрацией. Указанные выше формы загрязнений ведут себя существенно иначе, чем обычное растворённое железо, и требуют более сильных или специализированных методов окисления и фильтрации поскольку имеют малый размер и большую поверхностную энергию. Эффективное удаление такого рода загрязнений требует либо довольно дорогостоящего процесса коагуляции/флокуляции, либо разрушения органической оболочки сильным окислителем типа озона, либо применения специальных фильтров, чувствительных к очень мелким взвесям [8].

В Республике Беларусь в период с 2006 по 2010 год реализовывалась государственная программа «Чистая вода», в рамках которой было запланировано и построено или реконструировано порядка 110 станций обезжелезивания [9]. В период с 2021 по 2025 годы реализовывалась государственная программа «Комфортное жилье и благоприятная среда», в рамках которой было запланировано строительство и реконструкция порядка 800 станций обезжелезивания [10]. К примеру, согласно архивным данным за 2023 год, взятым с сайта goszakupki.by, объявлялось о проведении государственных тендеров на закупку 106 станций обезжелезивания, общей мощностью 1040 м³/ч, на сумму 18 835 272 рублей.

Авторами статьи были изучены технические задания на закупку этих станций обезжелезивания и сделан ряд определенных наблюдений. Первое наблюдение заключается в том, что практически все закупаемые станции являются напорными станциями обезжелезивания, в блочно-модульном исполнении, из чего можно сделать однозначный вывод, что в нашей стране сформировалась устоявшаяся практика применения технологии «напорного» обезжелезивания, в подавляющем большинстве случаев. Второе наблюдение формируется на том, что в некоторой части технических заданиях имеется требование на проведение пробного обезжелезивания непосредственно у места ее монтажа, перед заключением договора поставки, а также в части из них имеются и уточнения о каталитических нагруз-

ках напорных фильтров, но не во всех. Из этого можно сделать вывод, что ряд заказчиков уже сталкивались с тем, что при заказе установок обезжелезивания, ориентируясь только на ее производительность и общее содержание железа в исходной воде, но без учета фактической формы (органическое / неорганическое / коллоидное), получали в конечном счете установки, которые не могут выйти на требуемые показатели очистки. Авторы статьи посетили довольно много таких станций, в которых было установлено качественное и дорогостоящее оборудование, но ни длительная аэрация, ни даже применение каталитических загрузок в фильтрах не позволяло добиться снижения содержания железа в очищаемой воде до 0,3 мг/дм³ [11]. Можно с уверенностью сказать, что имеется определенная практика проектирования, когда технологическая схема оборудования очень часто закладывается без экспериментальных исследований исходной воды. В случае если исходная вода содержит обычное легко окисляемое неорганическое железо, то подбор оборудования, в теории, может быть осуществлен проектировщиком только лишь «за компьютером», но в случае более сложных форм, такой подход неизбежно приводит к ошибке.

Выше была обозначена одна из основных проблем в практике применения напорных станций обезжелезивания, а именно случаи, когда данное оборудование применяется для той воды, в которой имеются «сложные» формы растворенного железа. Вторым важным фактором эксплуатации напорных станций обезжелезивания является то, что для их нормальной работы требуется создавать давление на входе в станцию не менее 4 Бар. По сравнению с безнапорными системами фильтрации это влечет повышенные энергозатраты [12].

Решением обеих этих проблем может являться применение модульных станций обезжелезивания безнапорного типа с применением озона в качестве окислительного агента. Применение озона в системах обезжелезивания и деманганации подземных вод позволяет принципиально изменить как кинетику окислительных процессов, так и требования к гидравлическому режиму очистных сооружений. Озон является одним из наиболее сильных окислителей, с окислительно-восстановительным потенциалом 2,07 В, что существенно превышает аналогичный показатель молекулярного кислорода и гипохлорита [13]. Это обуславливает его способность эффективно окислять не только легкоокисляемые ионы Fe²⁺, но и более устойчивые формы загрязнений, включая органически связанное железо, коллоидные гидроксидные частицы, а также марганец в форме Mn²⁺. В отличие от традиционной аэрации, где скорость окисления железа и марганца определяется растворимостью кислорода, значением pH и временем контакта, озонирование обеспечивает практически мгновенное протекание реакций окисления в широком диапазоне физико-химических параметров воды. При этом происходит не только перевод Fe²⁺ в Fe³⁺, но и частичное разрушение органических лигандов, стабилизирующих хелатные и коллоидные формы железа в результате чего коллоидные частицы теряют устойчивость и укрупняются, что резко повышает их способность к последующему механическому задержанию на фильтрующей загрузке [14].

Использование озонирования в сочетании с безнапорными сампромывными фильтрами непрерывного действия, такими как фильтры типа «DynaSand», позволяет реализовать технологическую схему, в которой исключается необходимость создания высокого давления перед фильтрами и организации циклической обратной промывки [15]. Фильтры типа «DynaSand» работают в непрерывном режиме с постоянной регенерацией загрузки за счёт внутреннего гидравлического перемещения песка и его промывки очищенной водой, что обеспечивает стабильные гидравлические условия и постоянную эффективность фильтрации без остановки процесса очистки [16]. С точки зрения энергетики данная схема обладает рядом принципиальных преимуществ. Во-первых, отсутствие необходимости поддержания давления 4 бар на входе в фильтры позволяет существенно снизить удельные энергозатраты скважинных насосов. Во-вторых, отсутствие необходимости в периодических напорных промывках фильтров устраняет пиковые нагрузки, связанные с работой промывочных насосов и компрессоров [17]. В-третьих, использование озонаторов, рассчитанных на работу при повышенном давлении, позволяет эффективно организовать процесс барботажного озонирования в безнапорных окислительных колоннах без применения эжекторов, что дополнительно снижает энергопотребление системы в целом и повышает стабильность ее работы. Принципиальная схема устройства такой станции обезжелезивания приведена на рисунке 1 [18].

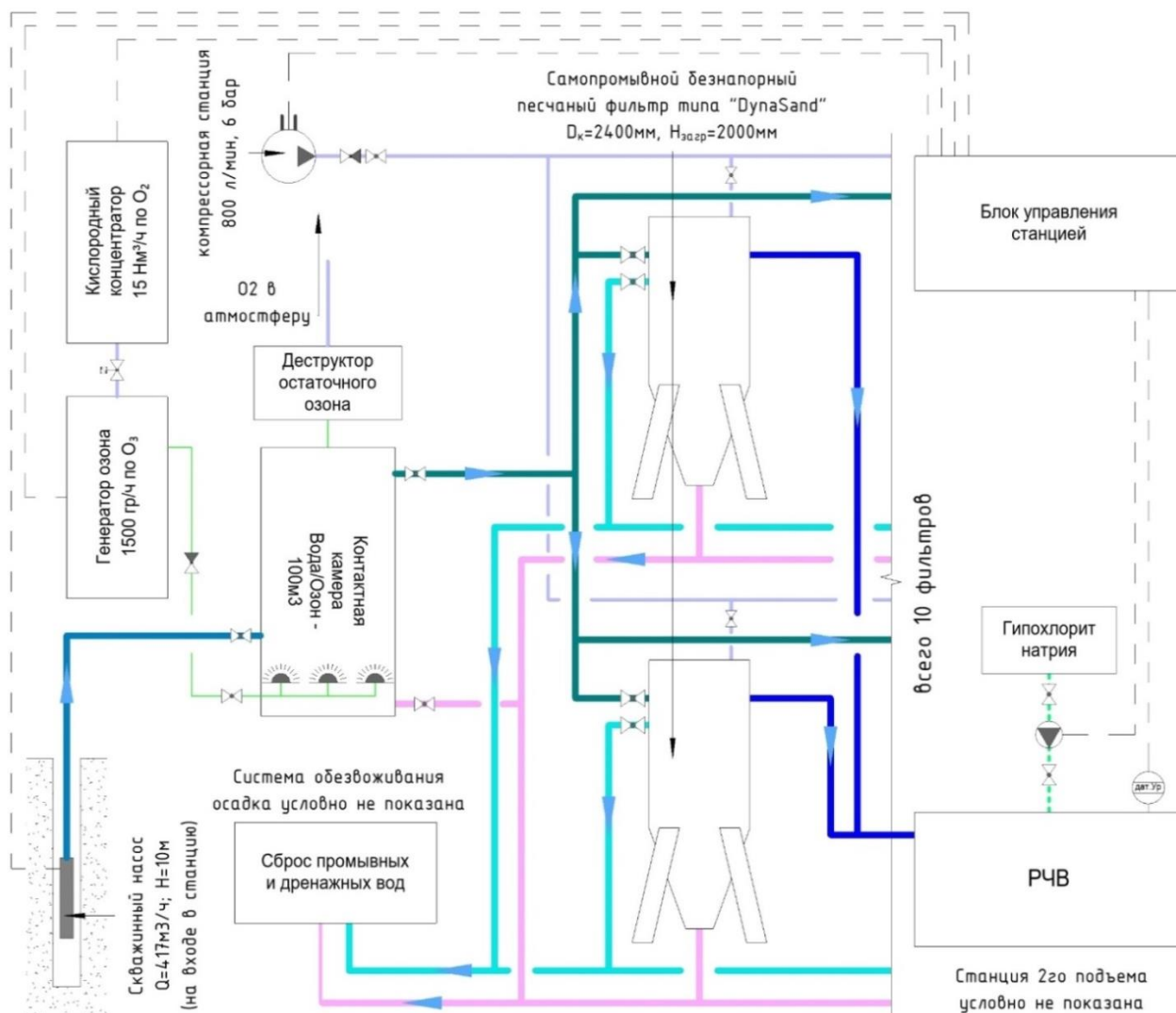


Рисунок 1 – Принципиальная схема безнапорной станции обезжелезивания

Скважинная вода подается в безнапорную герметичную контактную камеру определённого объема, куда дозируется озон при помощи донных барботеров. После окисления вода самотеком поступает в самопромывные безнапорные фильтры. В этих аппаратах процессы очистки воды и промывки фильтрующей загрузки происходят одновременно и непрерывно. Загрязнения удаляются из фильтрующего слоя с помощью встроенного воздушного эрлифта, без остановки основного процесса и без использования внешних промывных насосов. Очищенная вода поступает в РЧВ для дальнейшего использования. Промывная вода собирается в специальном резервуаре накопителе, откуда затем поступает на систему обезвоживания осадка.

Для наглядной демонстрации преимуществ предлагаемой системы обезжелезивания рассчитаем эксплуатационные затраты, в первую очередь энергопотребление, для обеих технологий обезжелезивания на конкретном примере.

Исходные данные для расчета – вода с содержанием $\text{Fe}^{2+} = 2,5 \text{ мг/дм}^3$, $\text{Mn}^{2+} = 1,5 \text{ мг/дм}^3$. Производительность – $10\,000 \text{ м}^3/\text{сутки}$ или $417 \text{ м}^3/\text{час}$. Норматив очистки – $\leq 0,3 \text{ мг/дм}^3$ по Fe и $\leq 0,1 \text{ мг/дм}^3$ по Mn. Непрерывный режим работы – 365 дней в году.

Технология 1 – Напорная аэрация + напорные фильтры

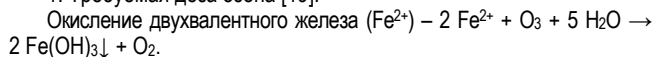
Свободный напор перед станцией не менее 40 м необходим для работы напорной аэрационной колонны и фильтров. Это ключевой момент для корректного расчета энергоэффективности станции в целом, поскольку энергозатраты на первом подъеме из скважины также нужно учитывать, как и энергозатраты на технологическое оборудование внутри станции. Аэрационный компрессор – 15 кВт/ч .

Промывные насосы (усредненная мощность с учетом цикличности работы) – $1,9 \text{ кВт/ч}$.

Технология 2 – Озонирование + самопромывные безнапорные фильтры

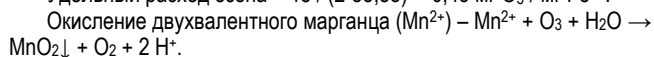
Свободный напор перед станцией 10 м, необходим только для подачи в безнапорную контактную камеру.

1. Требуемая доза озона [19].



Массовое соотношение – $2 \cdot 55,85 \text{ г Fe} : 48 \text{ г O}_3$.

Удельный расход озона – $48 / (2 \cdot 55,85) \approx 0,43 \text{ мг O}_3 / \text{мг Fe}^{2+}$.



Массовое соотношение – $54,94 \text{ г Mn} : 48 \text{ г O}_3$.

Удельный расход озона – $48 / 54,94 \approx 0,87 \text{ мг O}_3 / \text{мг Mn}^{2+}$.

Теоретическая потребность в озоне (на 1 дм^3 воды).

Для железа – $2,5 \text{ мг/дм}^3 \cdot 0,43 \text{ мг/мг} = 1,075 \text{ мг/дм}^3$.

Для марганца – $1,5 \text{ мг/дм}^3 \cdot 0,87 \text{ мг/мг} = 1,305 \text{ мг/дм}^3$.

Суммарная теоретическая доза – $1,075 + 1,305 = 2,38 \text{ мг/дм}^3$.

Теоретической дозы для реальных условий недостаточно и необходимо предусмотреть запас на конкурирующие реакции и неидеальность процесса в размере +20 % – на окисление органического железа и гуминовых кислот, +15 % – на окисление другой сопутствующей органики, +15 % – на "озоновую ненасыщенность" и технологический запас, поскольку часть озона не успевает прореагировать в камере и уходит с отходящими газами [20].

Таким образом, требуемая практическая доза озона составит: $2,38 \text{ мг/дм}^3 \cdot (1 + 0,2 + 0,15 + 0,15) = 3,57 \text{ мг/дм}^3$. Округлим до $3,6 \text{ мг/дм}^3$. Требуемая производительность озонатора – $417 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 3,6 \text{ г/м}^3 \approx 1,5 \text{ кг/ч}$.

Энергозатраты при указанных параметрах системы составят:

- озонатор ($10 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг O}_3$);
- генератор кислорода ($1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/Нм}^3 \text{O}_2$);
- компрессор для работы эрлифтов системы самопромывки фильтров – $2,5 \text{ кВт/ч}$.

Таблица 1 – Сводная ведомость расчетов энергопотребления

Статья затрат	Технология 1 Напорная система с аэрацией	Технология 2 Озонирование + Безнапорные фильтры
1. Скважинные насосы	68,1 кВт/ч	17,5 кВт/ч
2. Окисление / Аэрация	15 кВт/ч	30 кВт/ч
3. Фильтрация и промывка	1,9 кВт/ч	2,5 кВт/ч
ИТОГО СУММАРНАЯ МОЩНОСТЬ:	~85 кВт/ч	~50 кВт/ч
Удельное энергопотребле- ние (кВт·ч/м ³):	0,2 кВт·ч/м ³	0,12 кВт·ч/м ³
Годовое энергопотребление (кВт·ч/год):	~ 744600 кВт·ч	~ 438000 кВт·ч

Данные, представленные в таблице 1, наглядно демонстрируют существенное преимущество технологии озонирования в сочетании с безнапорной фильтрацией по показателям энергопотребления.

Следует особо отметить, что несмотря на более высокие энергозатраты непосредственно на процесс окисления, применение безнапорной схемы фильтрации обеспечивает существенное снижение энергопотребления скважинными насосами. Именно этот фактор определяет итоговую энергоэффективность системы. Возможность работы при свободном напоре всего 10 м. в. с. вместо требуемых 40 м. в. с. для напорной системы позволяет в 3,9 раза снизить затраты энергии на первом подъеме воды, что полностью компенсирует повышенное энергопотребление озонаторного комплекса и генератора кислорода.

Ключевым технологическим преимуществом озонирования является его способность эффективно окислять железо во всех формах его присутствия в природных водах. Особенно важным является способность озона разрушать органические лиганды, стабилизирующие коллоидные формы железа. В результате даже трудноокисляемые формы железа переводятся в легкофильтруемые гидроксидные осадки, которые эффективно задерживаются на песчаной загрузке фильтров. Аналогичная ситуация наблюдается и при удалении марганца. Окисление Mn^{2+} до MnO_2 кислородом воздуха протекает существенно медленнее, чем окисление железа, и часто требует использования каталитических загрузок. Озонирование обеспечивает практически полное окисление марганца без использования каких-либо катализаторов, что упрощает технологическую схему и повышает стабильность процесса очистки.

Таким образом, применение озонирования делает технологию более универсальной и менее зависимой от конкретного химического состава обрабатываемой воды. Это частично снижает критичность отсутствия предварительных экспериментальных исследований при проектировании, хотя авторы статьи категорически не приветствуют такой подход и настаивают на обязательном предварительном изучении качества исходной воды в каждом конкретном случае. Несмотря на универсальность озонирования как метода окисления, авторы считают необходимым подчеркнуть, что какой бы эффективной ни была выбранная технология, проектирование систем водоподготовки без предварительных лабораторных или полевых испытаний исходной воды является неприемлемым подходом. Только детальное изучение физико-химического состава воды, определение форм присутствия железа и марганца, оценка содержания органических веществ и проведение пробного обезжелезивания с различными окислителями позволяют подобрать наиболее рациональную и экономически оправданную технологическую схему для каждого конкретного объекта.

Следует отметить, что оборудование для реализации технологии безнапорного озонирования с самопромывными фильтрами пока не получило широкого распространения в Республике Беларусь, что может создавать определенные барьеры для проектных организаций в силу отсутствия обширной практики его применения на отечественных объектах. Вместе с тем, авторы считают необходимым проинформировать профессиональное сообщество о наличии в стране компетенций и производственных мощностей для комплектации таких систем.

Компания «Сифания-Экотехника», являющаяся резидентом Брестского научно-технологического парка, занимается разработкой и производством безнапорных самопромывных фильтров непрерывного действия. На настоящий момент предприятием изготовлено и поставлено на объекты Российской Федерации более сорока единиц фильтров собственной оригинальной конструкции. Накопленный опыт эксплуатации этого оборудования подтверждает его высокую эффективность и надёжность при работе в системах фильтрации различного назначения.

Конструктивные особенности фильтров «Сифания-Экотехника» обеспечивают непрерывную регенерацию фильтрующей загрузки за счёт гидравлического перемещения песка внутри корпуса и его промывки очищенной водой в специальной зоне. Это исключает необходимость периодической остановки процесса фильтрации для промывки, обеспечивает стабильное качество фильтрата и постоянное гидравлическое сопротивление, что критически важно для безнапорных систем.

Также в г. Бресте имеется компания «Тор Сурт», осуществляющая разработку и производство генераторов озона различной производительности. Ключевой конструктивной особенностью озонаторов данного производителя является возможность генерации озона при повышенном давлении газа (до 2-х бар) на выходе. Эта характеристика имеет ключевое значение для реализации безнапорных схем озонирования с повышенными показателями энергоэффективности. В традиционных озонаторных установках, где генератор работает при атмосферном или близком к нему давлении, для введения озонсодержащего газа в воду, находящуюся под давлением, применяются эжекторы, требующие создания значительного перепада давления и, соответственно, дополнительных энергозатрат на подающие насосы. Озонаторы «Тор Сурт», генерирующие озон под избыточным давлением, позволяют осуществлять прямое барботажное введение газа в безнапорную контактную камеру с гидростатическим давлением воды на уровне 10 м без использования каких-либо инжекционных устройств. Это упрощает технологическую схему, повышает надёжность системы и снижает эксплуатационные затраты. Важно отметить, что удельное энергопотребление озонаторов «Тор Сурт» составляет порядка 10 кВт/ч на килограмм генерируемого озона, что сопоставимо с показателями ведущих мировых производителей озонаторного оборудования, таких как Ozonia и Wedeco. Такая энергоэффективность в сочетании с возможностью работы на повышенном давлении делает данное оборудование оптимальным выбором для комплектации безнапорных систем озонирования.

Компании «Сифания-Экотехника» и «Тор Сурт» осуществляют тесное технологическое сотрудничество в области продвижения комплексных решений по обезжелезиванию и деманганации природных вод на основе безнапорного озонирования с применением самопромывных фильтров непрерывного действия. Специалисты обеих организаций готовы предоставить всю необходимую техническую документацию, консультационную поддержку и данные по результатам пилотных испытаний всем заинтересованным проектным организациям, эксплуатирующим предприятия и потенциальным заказчикам.

Заключение

Авторы статьи призывают проектировщиков и специалистов в области водоподготовки не опасаться внедрения данной технологии в силу её относительной новизны для отечественной практики. Наличие в Республике Беларусь компетентных производителей ключевого оборудования, готовых обеспечить полное техническое сопровождение проектов от стадии предпроектных изысканий и пилотных испытаний до пусконаладочных работ и гарантийного обслуживания создаёт все необходимые предпосылки для успешной реализации таких систем.

При грамотном подходе, включающем обязательное предварительное изучение качества исходной воды и проведение лабораторных или полевых испытаний различных технологических схем, применение безнапорного озонирования с самопромывными фильтрами

позволяет достичь гарантированного качества очистки воды при существенном снижении как капитальных, так и эксплуатационных затрат по сравнению с традиционными напорными системами.

Список цитированных источников

1. Минприроды: объем добычи вод за 2022 год составил 1,42 млрд куб.м // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – URL: <https://minpriroda.gov.by/ru/news-ru/view/minprirody-objem-dobychi-vod-za-2022-god-sostavil-142-mlrd-kubm-4728> (дата обращения: 12.03.2026).
2. Пресные подземные воды // Экологический портал Республики Беларусь. – URL: <https://ecoportal.gov.by/nedra/mineralno-syrevaya-baza/dobyvaemoe-syre/presnye-podzemnye-vody> (дата обращения: 12.03.2026).
3. Голубое золото Беларуси // Газета «Навука». – URL: <https://gazeta-navuka.innosfera.by/novosti/1158-goluboe-zoloto-belarusi> (дата обращения: 24.03.2026).
4. Кудельский, А. В. Подземные воды Беларуси / А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич, М. Г. Ясоевев. – Минск : Институт геологических наук НАН Беларуси, 1998. – 260 с.
5. Stumm, W. Chemistry of the Solid-Water Interface / W. Stumm. – New York : Wiley-Interscience, 1992. – 428 p.
6. Журба, М. Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений / М. Г. Журба, В. П. Капустин, Л. И. Соколов. – М. : АСВ, 2011. – 384 с.
7. Драгинский, В. Л. Коагуляция в технологии очистки природных вод / В. Л. Драгинский, Л. П. Алексеева, С. В. Гетманцев. – М. : Научное издание, 2005. – 576 с.
8. Когановский, А. М. Коагуляция и флокуляция в процессах очистки воды / А. М. Когановский, Н. А. Клименко. – Киев : Наукова думка, 1978. – 260 с.
9. Филонов, В. П. Деятельность, связанная с установлением целевых показателей в Республике Беларусь, достигнутый прогресс и задачи на будущее по вопросам доступа к питьевому водоснабжению = Activities related to setting targets under the Protocol on Water and Health in Belarus: progress achieved and challenges ahead in access to drinking water supply / В. П. Филонов // Семинар по отчетности в рамках Протокола по проблемам воды и здоровья = Workshop on reporting under the Protocol on Water and Health: материалы семинара, Женева, 10–11 февр. 2009 г. – Женева, 2009. – 12 с.
10. 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: 17.05.2026).
11. Канализация. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы и правила : СН 4.01.02-2019 / Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. – Минск : Минстройархитектуры, 2019. – 85 с.
12. Рябчиков, Б. Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования / Б. Е. Рябчиков. – М. : ДеЛи принт, 2004. – 328 с.
13. Кульский, Л. А. Теоретические основы и технология кондиционирования воды: процессы и аппараты / Л. А. Кульский ; Акад. наук УССР, Ин-т коллоид. химии и химии воды им. А. В. Думанского. – 4-е изд., перераб. и доп. – Киев : Наукова думка, 1983. – 528 с.
14. Gottschalk, C. Ozonation of Water and Waste Water / C. Gottschalk, J. A. Libra, A. Saupe. – Weinheim : Wiley-VCH, 2010. – 368 p.
15. Абрамов, Н. Н. Водоснабжение. Учебник для вузов / Н. Н. Абрамов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1974. – 480 с.
16. Wachinski, A. M. Continuous self-cleaning filter : pat. 5582722 USA : IPC B01D 24/46 / A. M. Wachinski, Y. Xia, J. Bengoechea ; applicant Ashbrook-Simon-Hartley Corp. – № 357284 ; filed 13.12.1994 ; publ. 10.12.1996.
17. Непрерывные фильтры: проверенная технология с последними инновациями (DynaSand) / Nordic Water Products AB. – URL: <https://ekoumvelt.ru/upload/iblock/cd0/cd062d246c43d2fb0edcdddb663c2be.pdf> (дата обращения: 03.04.2026).
18. Rakness, K. L. Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation, and Optimization / K. L. Rakness. – Denver : AWWA, 2005. – 480 p.

19. Лунин, В. В. Физическая химия озона / В. В. Лунин, М. П. Попович, С. Н. Ткаченко. – М. : Изд-во МГУ, 1998. – 480 с.
20. Кульский, Л. А. Технология очистки природных вод / Л. А. Кульский, П. П. Строкач. – Киев : Вища школа, 1986. – 352 с.

References

1. Minprirody: ob'em dobychi vod za 2022 god sostavil 1,42 mlrd kub.m // Ministerstvo prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus'. – URL: <https://minpriroda.gov.by/ru/news-ru/view/minprirody-objem-dobychi-vod-za-2022-god-sostavil-142-mlrd-kubm-4728> (data obrashcheniya: 12.03.2026).
2. Presnye podzemnye vody // Ekologicheskij portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://ecoportal.gov.by/nedra/mineralno-syrevaya-baza/dobyvaemoe-syre/presnye-podzemnye-vody> (data obrashcheniya: 12.03.2026).
3. Goluboe zoloto Belarusi // Gazeta «Navuka». – URL: <https://gazeta-navuka.innosfera.by/novosti/1158-goluboe-zoloto-belarusi> (data obrashcheniya: 24.03.2026).
4. Kudel'skij, A. V. Podzemnye vody Belarusi / A. V. Kudel'skij, V. I. Pashkevich, M. G. YAsoveev. – Minsk : Institut geologicheskikh nauk NAN Belarusi, 1998. – 260 s.
5. Stumm, W. Chemistry of the Solid-Water Interface / W. Stumm. – New York : Wiley-Interscience, 1992. – 428 p.
6. ZHurba, M. G. Vodosnabzhenie. Proektirovanie sistem i sooruzhenij / M. G. ZHurba, V. P. Kapustin, L. I. Sokolov. – M. : ASV, 2011. – 384 s.
7. Draginskij, V. L. Koagulyaciya v tekhnologii ochistki prirodnyh vod / V. L. Draginskij, L. P. Alekseeva, S. V. Getmancev. – M. : Nauchnoe izdanie, 2005. – 576 s.
8. Koganovskij, A. M. Koagulyaciya i flokulyaciya v processah ochistki vody / A. M. Koganovskij, N. A. Klimenko. – Kiev : Naukova dumka, 1978. – 260 s.
9. Filonov, V. P. Deyatel'nost', svyazannaya s ustanovleniem celevyh pokazatelej v Respublike Belarus', dostignutyj progress i zadachi na budushchee po voprosam dostupa k pit'evomu vodosnabzheniyu = Activities related to setting targets under the Protocol on Water and Health in Belarus: progress achieved and challenges ahead in access to drinking water supply / V. P. Filonov // Seminar po otchetnosti v ramkah Protokola po problemam vody i zdorov'ya = Workshop on reporting under the Protocol on Water and Health: materialy seminar, ZHeneva, 10–11 fevr. 2009 g. – ZHeneva, 2009. – 12 s.
10. 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: 17.05.2026).
11. Kanalizaciya. Naruzhnye seti i sooruzheniya. Stroitel'nye normy i pravila : SN 4.01.02-2019 / Min-vo arhitektury i stroitel'stva Resp. Belarus'. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2019. – 85 s.
12. Ryabchikov, B. E. Sovremennye metody podgotovki vody dlya promyshlennogo i bytovogo ispol'zovaniya / B. E. Ryabchikov. – M. : DeLi print, 2004. – 328 s.
13. Kul'skij, L. A. Teoreticheskie osnovy i tekhnologiya kondicionirovaniya vody: processy i apparaty / L. A. Kul'skij ; Akad. nauk USSR, In-t kolloid. himii i himii vody im. A. V. Dumanskogo. – 4-e izd., pererab. i dop. – Kiev : Naukova dumka, 1983. – 528 s.
14. Gottschalk, C. Ozonation of Water and Waste Water / C. Gottschalk, J. A. Libra, A. Saupe. – Weinheim : Wiley-VCH, 2010. – 368 p.
15. Abramov, N. N. Vodosnabzhenie. Uchebnik dlya vuzov / N. N. Abramov. – 2-e izd., pererab. i dop. – M. : Strojizdat, 1974. – 480 s.
16. Wachinski, A. M. Continuous self-cleaning filter : pat. 5582722 USA : IPC B01D 24/46 / A. M. Wachinski, Y. Xia, J. Bengoechea ; applicant Ashbrook-Simon-Hartley Corp. – № 357284 ; filed 13.12.1994 ; publ. 10.12.1996.
17. Nepriyvnye fil'try: proverennaya tekhnologiya s poslednimi innovacijami (DynaSand) / Nordic Water Products AB. – URL: <https://ekoumvelt.ru/upload/iblock/cd0/cd062d246c43d2fb0edcdddb663c2be.pdf> (data obrashcheniya: 03.04.2026).
18. Rakness, K. L. Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation, and Optimization / K. L. Rakness. – Denver : AWWA, 2005. – 480 p.
19. Lunin, V. V. Fizicheskaya himiya ozona / V. V. Lunin, M. P. Popovich, S. N. Tkachenko. – M. : Izd-vo MGU, 1998. – 480 s.
20. Kul'skij, L. A. Tekhnologiya ochistki prirodnyh vod / L. A. Kul'skij, P. P. Strokach. – Kiev : Vishcha shkola, 1986. – 352 s.

Материал поступил 22.06.2026, одобрен 07.07.2026, принят к публикации 13.07.2026

УДК 628.316

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕЛКИХ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ С ПОМОЩЬЮ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДИСПЕРГАТОРА

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: prof.volchak@yandex.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 исследован процесс образования мелких газожидкостных дисперсий со средним диаметром газовых пузырьков менее 1 мм, описана конструкция пневмогидравлического диспергатора и описан принцип его работы. Основным элементом его конструкции, позволяющим добиваться получения мелких размеров газовых пузырьков, является пористая трубка из спеченного стеклянного порошка. В данной публикации описана экспериментальная установка для исследования работы пневмогидравлического диспергатора и приведена методика проведения экспериментов. В исследованиях применялся фотографический метод определения среднего размера газовых пузырьков, который подробно описан в методической части.

Представленные в статье результаты экспериментальных исследований доказали возможность получения мелких газовых пузырьков размером менее 1 мм при помощи представленного пневмогидравлического диспергатора. Приведен график, показывающий зависимость среднего диаметра образующихся газовых пузырьков от удельного расхода газа, вводимого в воду, при скорости движения жидкости во внутреннем отверстии пористой трубки пневмогидравлического диспергатора около 8 м/с. Установлено, что при снижении удельного расхода газа, вводимого в воду, при неизменной скорости движения воды внутри пористой трубки пневмогидравлического диспергатора размер газовых пузырьков уменьшается. Это объяснено тем, что при снижении удельного расхода газа снижается скорость выхода газа из пор пористого элемента и в момент отрыва газового пузырька объем газа, находящегося в нем, оказывался меньшим.

Ключевые слова: диспергация, газожидкостная дисперсия, пневмогидравлический диспергатор, газовые пузырьки, введение газа в воду.

DETERMINING THE EFFICIENCY OF PRODUCING SMALL GAS BUBBLES USING A PNEUMO-HYDRAULIC DISPERSER

A. A. Volchak, G. O. Naumchik, V. S. Belov

Abstract

This article examines the formation of fine gas-liquid dispersions with an average gas bubble diameter of less than 1 mm, describes the design of a pneumohydraulic disperser, and describes its operating principle. The key element of its design, which enables the production of fine gas bubbles, is a porous tube made of sintered glass powder. This publication describes an experimental setup for studying the operation of the pneumohydraulic disperser and provides the experimental methodology. The study utilized a photographic method for determining the average gas bubble size, which is described in detail in the methodology section.

The experimental results presented in the article demonstrate the feasibility of producing fine gas bubbles less than 1 mm in size using the presented pneumohydraulic disperser. A graph is provided showing the dependence of the average diameter of the resulting gas bubbles on the specific flow rate of the gas injected into the water at a liquid velocity of approximately 8 m/s in the internal bore of the porous tube of the pneumohydraulic disperser. It was found that, with a decrease in the specific flow rate of gas injected into the water, while maintaining a constant water velocity within the porous tube of the pneumohydraulic disperser, the size of gas bubbles decreases. This is explained by the fact that, with a decrease in the specific gas flow rate, the rate of gas release from the pores of the porous element decreases, and the volume of gas within the bubble decreases at the moment of bubble detachment.

Keywords: dispersion, gas-liquid dispersion, pneumohydraulic disperser, gas bubbles, introduction of gas into water.

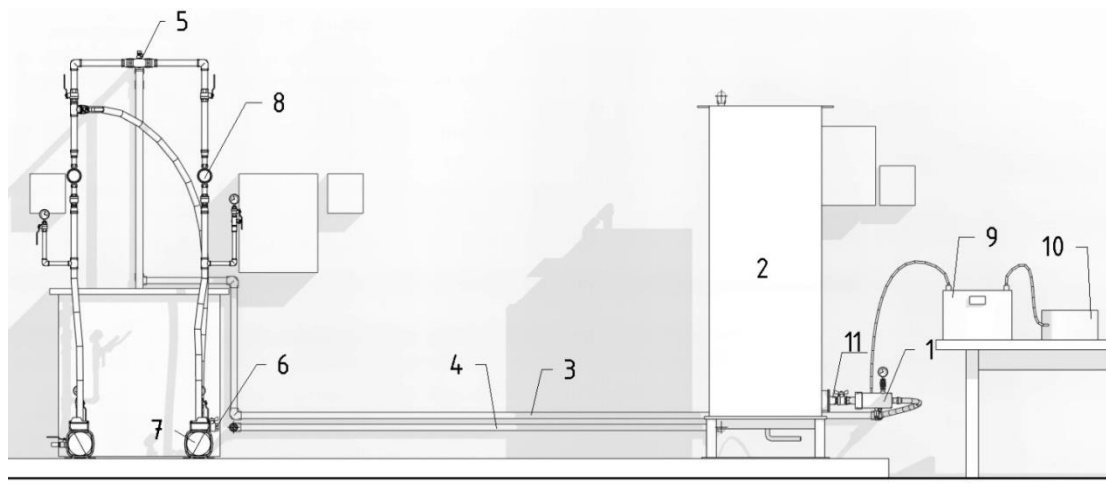
Введение

В различных технологических процессах промышленного производства и сельского хозяйства часто возникает необходимость получать мелкие газожидкостные дисперсии со средним диаметром газовых пузырьков менее 1 мм [1–7]. От размера пузырьков зависит эффективность следующих процессов: растворение газообразного озона в обрабатываемой воде, растворение кислорода в окислителях и в прудах при промышленном рыбоводстве, процесс очистки воды методом флотации, процесс пенной сепарации на горно-обогатительных предприятиях и т. д. [2–9]. В публикациях [1, 2, 8, 9] отмечалось, что при обработке природных и сточных вод часто возникает необходимость вводить озонсодержащий газ в обрабатываемую воду. Эффективность введения озона (дорогостоящего газа) в обрабатываемую воду зависит от размера пузырьков: с уменьшением диаметра пузырьков возрастает межфазная поверхность и, следовательно, увеличивается эффективность растворения вводимого газа в обрабатываемой воде [8, 9]. Анализ многочисленных исследований и разработок в области получения мелких газовых пузырьков [1–3, 5–15] показал, что задача получения мелких газовых дисперсий до настоящего времени решена не полностью, поэтому исследования в данной области оста-

ются актуальными [1, 2, 6–19]. В публикациях [6–9, 13–15] был сделан вывод о том, что наиболее перспективным является пневмогидравлический метод введения газа в обрабатываемую жидкость, так как данный метод требует небольших затрат энергии на диспергирование, имеет высокую надежность (вследствие отсутствия движущихся частей) и позволяет получить газовые пузырьки диаметром менее 1 мм, что обеспечит высокую эффективность растворения сравнительно дорогостоящих газов (кислород, озон и т. д.). Для исследования процесса диспергирования газа и определения размера пузырьков, образующихся при введении газа в обрабатываемую жидкость с помощью пневмогидравлического диспергатора, использовался бак с прозрачной стенкой и применялась специальная методика определения среднего размера пузырьков [13, 15, 20].

Методическая часть

Стенд для испытания диспергатора газа на момент испытаний был расположен в лаборатории кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Учреждения образования «Брестский государственный технический университет». Схема испытательного стенда приведена на рисунке 1.



1 – пневмогидравлический диспергатор; 2 – бак с прозрачной фронтальной стенкой; 3 – напорный трубопровод; 4 – всасывающий трубопровод; 5 – узел подключения напорного трубопровода; 6 – узел подключения всасывающего трубопровода; 7 – насос Wilo MHIЕ403-1/Е/3-2-2G с частотным преобразователем; 8 – водомер; 9 – газовый счетчик; 10 – Компрессор Partner AS09; 11 – Вентиль для подачи газожидкостной смеси

Рисунок 1 – Конструкция стенда для испытания пневмогидравлических диспергаторов газа

Алгоритм работы на данном стенде заключался в следующем: при помощи узла 5 и 6 подключался всасывающий 4 и подающий 3 трубопроводы, к насосу 7, чем обеспечивался режим циркуляции воды в баке 2. Насос 7 имел блок, который позволял регулировать частоту вращения рабочего колеса, что позволяло менять подачу воды без дополнительных манипуляций с запорной арматурой. При помощи водомера 8 фиксировался расход жидкости в системе. Корпус пневмогидравлического диспергатора 1 выполнен в разборном исполнении, что позволяет при необходимости заменять пористые элементы, а также имеет все необходимые резьбовые соединения для подключения к баку 2 и подающему трубопроводу 3. На корпусе диспергатора установлен манометр для измерения давления газа. Газ, в нашем случае воздух, подавался при помощи компрессора 10 ($P_{\max} = 3.5 \text{ bar}$, $Q_{\max} = 135 \text{ дм}^3/\text{мин}$). Газ проходил через газовый счетчик 9 и подавался в корпус пневмогидравлического диспергатора 1 через патрубок подачи газа, с газового счетчика 9 снимались показания по расходу газа. Компрессор 10 оснащен сбросным вентилем, который позволял регулировать подачу газа [13, 15].



Рисунок 2 – Внешний вид бака с прозрачной фронтальной стенкой



Рисунок 3 – Внешний вид насосной установки

Экспериментальные исследования проводились на вышеприведенном испытательном стенде по следующей методике. В корпус диспергатора устанавливался исследуемый пористый элемент, который подвергался испытанию. Затем диспергатор присоединялся к испытательному стенду. После этого включалась подача газа в корпус диспергатора и открывался вентиль 11. При этом подаваемый воздух свободно барботировался в баке. Далее включался насос с заранее установленной частотой вращения рабочего колеса, в результате в баке возникала газожидкостная струя. Сбросным

вентилем на компрессоре устанавливалось заданное давление газа в диспергаторе. После этого производилась фотографическая съемка газожидкостной струи, фиксировался расход воды с помощью водомера 8 и расход газа с помощью счетчика 9. Затем устанавливалось другое давление газа и опыт повторялся [13, 15].

Средний диаметр пузырьков газа, полученных с помощью пневмогидравлического диспергатора, определяли методом цифровой фоторегистрации газожидкостной дисперсии. Истинные размеры пузырьков устанавливали путем калибровки изображения по масштабному реперу (линейке), находящемуся в плоскости съемки.

Данный метод заключается в непосредственном получении изображения газожидкостной дисперсии при помощи цифрового фотоаппарата Nikon Coolpix 120 с разрешением 14 мегапикселей. Столь большое разрешение позволяет с приемлемым качеством произвести цифровое увеличение изображения и произвести непосредственный подсчет элементов размерами до 0,1 мм. Алгоритм определения размеров пузырьков следующий: на прозрачной стенке бака располагается маркер известных размеров, далее производится подача жидкости в диспергатор, в баке образуется газожидкостная дисперсия, которая фотографируется. Далее полученное изображение загружается в программный комплекс Revit, где это изображение масштабируется

в соответствии с известными размерами маркера. Таким образом, мы получаем изображение в масштабе 1:1, которое увеличиваем в 1000 раз. Далее в программном комплексе Revit был создан параметрический элемент, представляющий из себя линию, отстраиваемую пользователем по двум произвольным точкам. Параметризация данного элемента заключается в том, что фактическая длина построенной линии автоматически рассчитывается и фиксируется в «ячейке памяти» программы. Затем необходимо отметить достаточное количество видимых пузырей данными линиями. Большим преимуществом программы Revit является возможность автоматического подсчета количества элементов, расположенных в проекте, а также их сортировка по различным параметрам. В нашем случае этот параметр – 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 1000 раз. В итоге получаем данные о диаметрах всех отмеченных пузырьков, создаваемых пневмогидравлическим диспергатором, что позволяет вычислить их средний диаметр. Количество отмечаемых пузырей на каждом изображении, составляло не менее ста штук [13, 15].

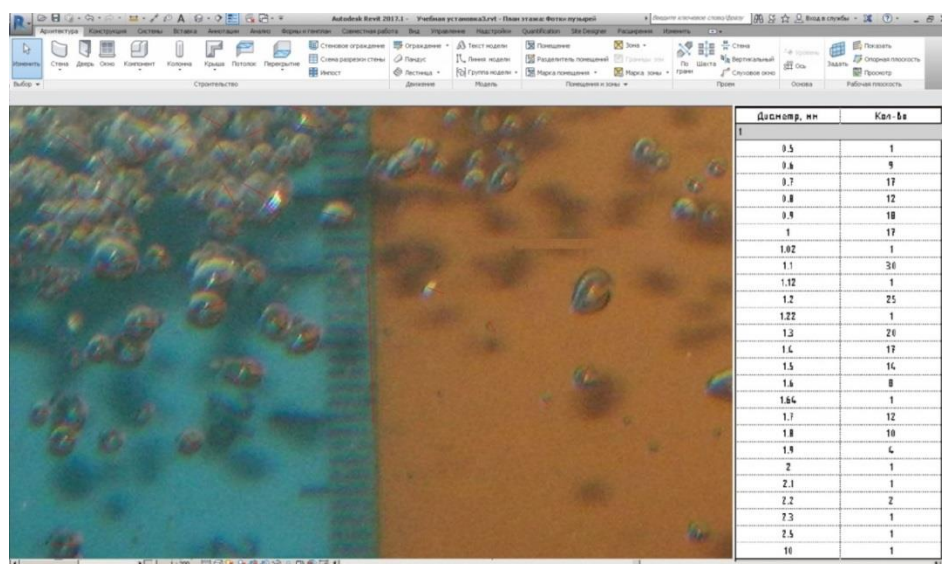


Рисунок 4 – Фрагмент фотоснимка, использованного для определения среднего диаметра пузыря с помощью программного комплекса Revit

Экспериментальная часть

Авторами был предложен пневмогидравлический метод диспергирования газа высокотурбулентным потоком жидкости, протекающей в пористой трубе. Данный метод разрабатывается для получения мелких газожидкостных дисперсий с диаметром газовых пузырьков менее 1 мм, необходимых в процессах флотации, озонирования,

обескислороживания и т. д. В отличие от других методов получения мелких газожидкостных дисперсий, разрабатываемый метод не требует использования громоздкого и сложного оборудования, позволяет диспергировать газы любого состава с высоким удельным расходом, имеет сравнительно невысокую энергетическую затратность [8, 9, 13–15].

Принцип данного метода диспергирования поясняется на рисунке 5.

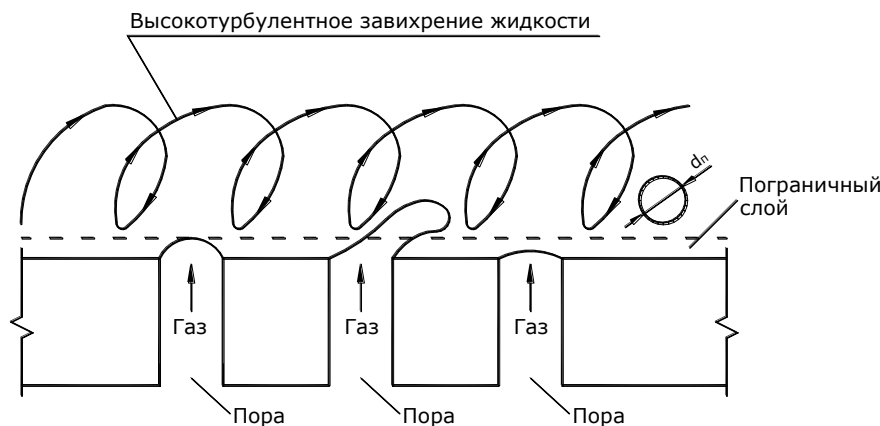
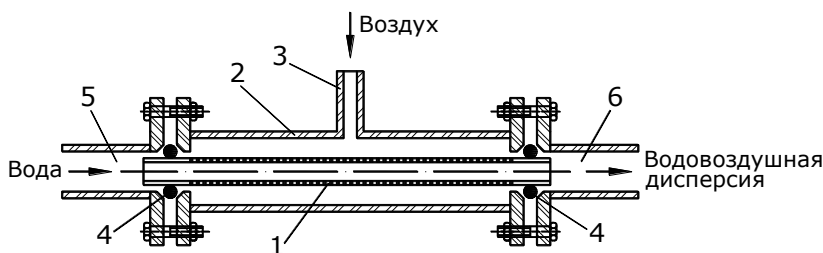


Рисунок 5 – Схема образования пузырька газа при выходе из единичной поры в быстро движущейся жидкости

На условия отрыва пузырька в потоке быстро движущейся жидкости в основном влияет толщина пограничного слоя, определяемая числом Рейнольдса, диаметр пор, структура поверхности пористого материала и

скорость движения газа на выходе из пор. Для оценки влияния данных факторов на процесс диспергирования газа использовалось экспериментальное устройство, конструкция которого приведена на рисунке 6.



1 – пористая трубка; 2 – корпус с фланцами; 3 – патрубок подачи воздуха; 4 – уплотнитель; 5 – патрубок подачи воды; 6 – патрубок отвода водовоздушной дисперсии

Рисунок 6 – Пневмогидравлический диспергатор газа

Пневмогидравлический диспергатор газа представляет собой мелкопористую трубку, расположенную в металлическом корпусе с фланцами. На концах пористой трубки между фланцами корпуса имеется уплотнение, поэтому контакт жидкости и газа осуществляется только через стенку пористой трубки. В пространство между наружной поверхностью пористой трубки и металлическим корпусом подается газ с помощью патрубка подачи газа [8, 9, 13–15].

Исследуемый пористый элемент был изготовлен методом спекания стеклянного порошка фракции от 0,2 до 0,3 миллиметров в форме при высокой температуре. Данный материал обладает высокой химической стойкостью к различным средам, в том числе к озону. Наружный диаметр пористого элемента составлял 45 мм, внутренний диаметр – 12 мм. На рисунке 3 показана фотография исследуемого пористого элемента.



Рисунок 7 – Пористый элемент с порами от 0,2 до 0,3 мм, имеющим наружный диаметр 45 мм и цилиндрическое отверстие диаметром 12 мм по всей длине

Результаты испытаний диспергатора с вышепредставленным пористым элементом приведены в таблице 1. Данный пористый элемент имел поры диаметром от 0,2 до 0,3 мм. Его проницаемость для воздуха была относительно высокой. Были проведены испытания при режиме работы насоса – с частотой вращения рабочего колеса 3500 об/мин.

Таблица 1 – Результаты испытания диспергатора с пористой трубкой, имеющей поры размером от 0,2 до 0,3 мм

№ опыта	Част. вращ. насоса, об/мин	Давление газа, бар	Расход воды, дм ³ /с	Расход газа, дм ³ /с	Средний диаметр пузыря, мм
1	3500	1,95	0,89	0,69	1,09
2	3500	1,8	0,93	0,38	1,06
3	3500	1,7	0,96	0,22	1,02
4	3500	1,6	0,96	0,05	0,83

На рисунках 8–11 приведены фотографии газожидкостных струй, выходящих из пневмогидравлического диспергатора, соответствующих частоте вращения рабочего колеса насоса – 3500 об/мин. При этом скорость воды во внутреннем отверстии пористого элемента составляла около 8 м/с.

Как показывают представленные фотографии, с уменьшением удельного расхода газа, при неизменной частоте вращения рабочего колеса, происходит уменьшение среднего диаметра получаемых пузырьков. Так, согласно результатам определения среднего диаметра пузырька с помощью программного комплекса Revit при максимальном расходе газа составлял 1,09 мм, а при минимальном 0,83 мм.



Рисунок 8 – Газожидкостная струя, полученная в опыте № 1

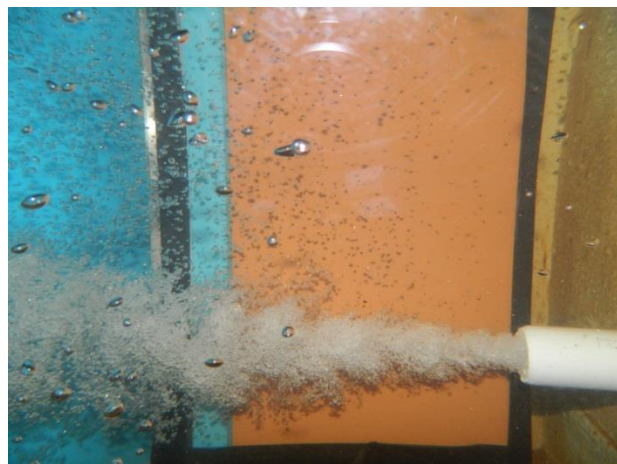


Рисунок 9 – Газожидкостная струя, полученная в опыте № 2

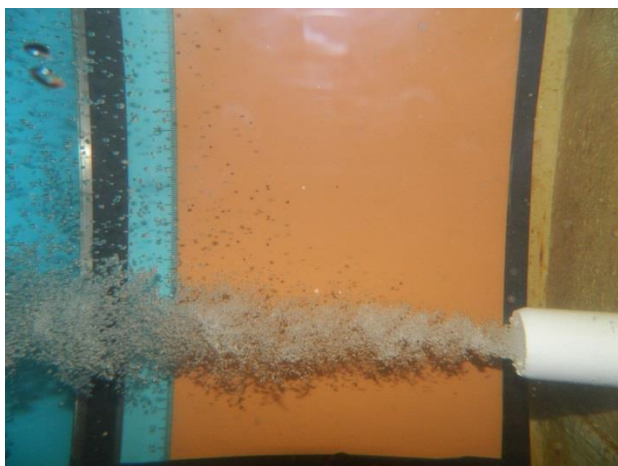


Рисунок 10 – Газожидкостная струя, полученная в опыте № 3

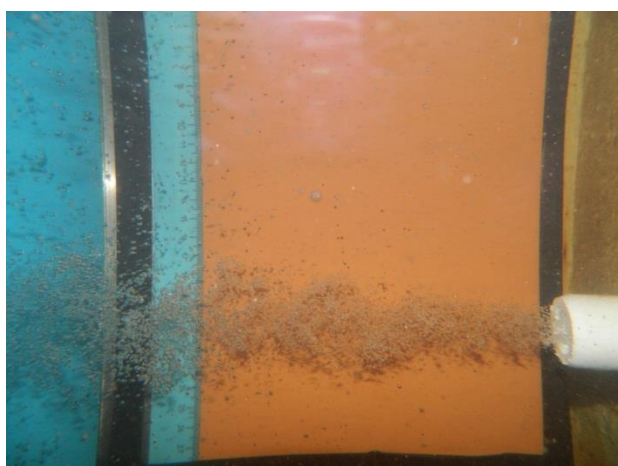


Рисунок 11 – Газожидкостная струя, полученная в опыте № 4

На рисунке 12 показана зависимость среднего диаметра образующихся пузырьков газа от его удельного расхода (отношения расходов газа и жидкости). Кривая построена по результатам испытаний пневмогидравлического диспергатора с пористой трубкой, диаметр пор которой составляет 0,2...0,3 мм, при скорости потока жидкости внутри пористой трубки около 8 м/с.

Кривая, представленная на рисунке 12, показывает, что с увеличением удельного расхода газа (отношения расхода газа к расходу воды) увеличивался средний размер газовых пузырьков. Это можно объяснить тем, что при увеличении удельного расхода газа увеличивался расхода газа, выходящего из пористого элемента, а, следовательно, увеличивалась скорость выхода газа из пор пористого элемента. Поэтому в момент отрыва газового пузырька объем газа в нем оказывается большим. При этом скорость движения жидкости во внутреннем отверстии пористой трубки пневмогидравлического диспергатора в данных опытах была около 8 м/с.

Наименьший средний диаметр образующихся пузырьков составлял 0,83 мм, чего, как правило, не возможно добиться с помощью обычных методов диспергации, таких как барботаж или импеллерные установки. Более мелких пузырьков получить не удалось по причине невозможности достижения больших скоростей движения жидкости в пористом элементе из-за ограниченного напора у применявшегося в исследованиях насоса (порядка 0,4 МПа) и больших потерях напора в соединительных трубопроводах стенда. Также некоторым недостатком при испытании вышеописанного пористого являлось повышенное рабочее давление газа в корпусе пневмогидравлического диспергатора, что не всегда возможно осуществить на практике.

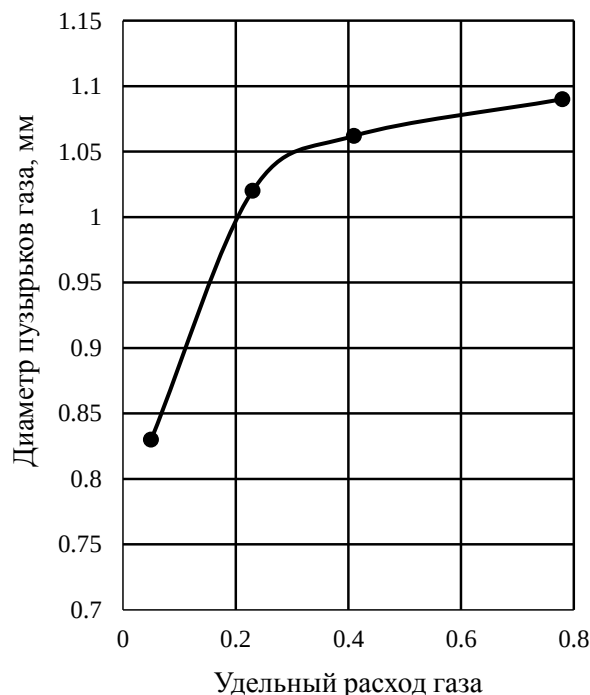


Рисунок 12 – Зависимость среднего диаметра пузырьков газа от удельного расхода (отношения расхода газа к расходу жидкости) при испытании пневмогидравлического диспергатора

Заключение

Проведенные исследования доказали возможность получения мелких газовых пузырьков размером менее 1 мм при помощи пневмогидравлического диспергатора, конструкция которого приведена в данной статье. В результате исследований установлено, что при снижении удельного расхода газа, вводимого в воду, при неизменной скорости движения струи воды внутри пористой трубки пневмогидравлического диспергатора, размер газовых пузырьков уменьшался. Это объясняется тем, что при снижении удельного расхода газа, снижается скорость выхода газа из пор пористого элемента и в момент отрыва газового пузырька объем газа, находящегося в нем, оказывался меньшим. В последующих экспериментах необходимо исследовать работу пневмогидравлического диспергатора в различных режимах для определения зависимостей размера газовых пузырьков от различных факторов и установления оптимальных параметров. Это поможет создать эффективный диспергатор газа в обрабатываемую жидкость, позволяющий получать мелкие пузырьки при невысоких энергозатратах на диспергирование.

Список цитированных источников

1. Пенная сепарация и колонная флотация / Ю. Б. Рубинштейн, В. И. Мелик-Гайказян, Н. В. Матвеев, С. Б. Леонов. – М. : Недра, 1989. – 304 с.
2. Мещеряков, Н. Ф. Флотационные машины и аппараты / Н. Ф. Мещеряков. – М. : Недра, 1982. – 200 с.
3. Жерноклев, А. К. Аэрация и озонирование в процессах очистки воды / А. К. Жерноклев, Л. П. Пилиневич, В. В. Савич. – Минск : Тонлик, 2002. – 129 с.
4. Попкович, Г. С. Системы аэрации сточных вод / Г. С. Попкович, Б. Н. Репин. – М. : Стройиздат, 1986. – 136 с.
5. Воронов, Ю. В. Струйная аэрация / Ю. В. Воронов, В. Д. Казаков, М. Ю. Толстой. – М. : изд-во Ассоц. строительных вузов, 2007. – 215 с.
6. Перепелкин, К. Е. Газовые эмульсии / К. Е. Перепелкин, В. С. Матвеев. – Л. : Химия, 1979. – 164 с.
7. 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.

8. Волчек, А. А. Выбор метода получения газо-жидкостной дисперсии при введении сравнительно дорогостоящих газов / А. А. Волчек, Г. О. Наумчик, В. С. Белов // Строительство – формирование среды жизнедеятельности : сб. статей XXVIII Междунар. науч. конф., Брест, 23–25 апр. 2025 г. / Брест. гос. техн. ун-т, Нац. исслед. Московский гос. строит. ун-т ; редкол.: Н. Н. Шалобита, И. П. Павлова, Н. В. Черноиван [и др.]. – Брест, 2025. – С. 44–52.
9. Волчек, А. А. Обоснование применения усовершенствованного пневмогидравлического диспергатора для получения мелкой газо-жидкостной дисперсии / А. А. Волчек, Г. О. Наумчик, В. С. Белов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2025. – № 8. – С. 55–64.
10. Григорьева, А. Н. Влияние конструкции перемешивающего устройства на эффективность массообмена при пневмомеханической аэрации сточных вод / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 6. – С. 25–32.
11. Григорьева, А. Н. Влияние геометрии перемешивающего устройства на диаметр пузырьков воздуха при перемешивании в системе газ-жидкость / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Химическая промышленность сегодня. – 2019. – № 5. – С. 18–22.
12. Лямаев, Б. Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б. Ф. Лямаев. – Л. : Машиностроение, 1988. – 256 с.
13. 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 Междунар. 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.
14. Пневмогидравлический диспергатор газа : пат. BY 12838 / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик. – Оpubl. 28.02.2022.
15. 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.
16. Сивак, В. М. Аэраторы для очистки природных и сточных вод / В. М. Сивак, Н. Е. Янушевский. – Львов : Вища школа, 1984. – 124 с.
17. Ксенофонов, Б. С. Использование процессов струйной аэрации в процессах флотационной очистки сточных вод / Б. С. Ксенофонов // Сантехника. – 2022. – № 6. – С. 32–37.
18. Ксенофонов, Б. С. Повышение эффективности струйной аэрации в процессах флотационной очистки сточных вод / Б. С. Ксенофонов // Сантехника. – 2020. – № 4. – С. 36–39.
19. Ксенофонов, Б. С. Интенсификация флотационной очистки сточных вод с использованием струйных аэраторов и эжекторов / Б. С. Ксенофонов, Е. С. Стельмах // Водоочистка. – 2018. – № 6. – С. 25–35.
20. Волчек, А. А. Преимущества оптических методов измерения размера и дисперсности газовых пузырьков в воде. / А. А. Волчек, Г. О. Наумчик, В. С. Белов // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2025. – № 2. – С. 94–98.
21. Popkovich, G. S. Sistemy aeracii stochnyh vod / G. S. Popkovich, B. N. Repin. – M. : Strojizdat, 1986. – 136 s.
22. Voronov, YU. V. Strujnaya aeraciya / YU. V. Voronov, V. D. Kazakov, M. YU. Tolstoj. – M. : izd-vo Assoc. stroitel'nyh vuzov, 2007. – 215 s.
23. Perepelkin, K. E. Gazovye emul'sii / K. E. Perepelkin, V. S. Matveev. – L. : Himiya, 1979. – 164 s.
24. Zolotov, A. V. Sposoby polucheniya gazovoj dispersii v ob'eme zhidkosti / A. V. Zolotov, I. S. Bagreeva // Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tehnicheskie dostizheniya i peredovoj opyt. – 2017. – № 1. – С. 18–22.
25. Volchek, A. A. Vybor metoda polucheniya gazo-zhidkostnoj dispersii pri vvedenii sravnitel'no dorogostoyashchih gazov / A. A. Volchek, G. O. Naumchik, V. S. Belov // Stroitel'stvo – formirovanie sredy zhiznedeyatel'nosti : sb. statej XXVIII Mezhdunar. nauch. konf., Brest, 23–25 apr. 2025 g. / Brest. gos. tekhn. un-t, Nac. issled. Moskovskij gos. stroit. un-t ; redkol.: N. N. SHalobita, I. P. Pavlova, N. V. CHernoivan [i dr.]. – Brest, 2025. – С. 44–52.
26. Volchek, A. A. Obosnovanie primeneniya usovershenstvovannogo pnevmogidravlicheskogo dispergatora dlya polucheniya melkoj gazozhidkostnoj dispersii / A. A. Volchek, G. O. Naumchik, V. S. Belov // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – 2025. – № 8. – С. 55–64.
27. Grigor'eva, A. N. Vliyanie konstrukcii peremeshivayushchego ustrojstva na effektivnost' massoobmena pri pnevmomekhanicheskoy aeracii stochnyh vod / A. N. Grigor'eva, R. SH. Abiev // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – 2020. – № 6. – С. 25–32.
28. Grigor'eva, A. N. Vliyanie geometrii peremeshivayushchego ustrojstva na diametr puzyr'kov vozduha pri peremeshivanii v sisteme gaz-zhidkost' / A. N. Grigor'eva, R. SH. Abiev // Himicheskaya promyshlennost' segodnya. – 2019. – № 5. – С. 18–22.
29. Lyamaev, B. F. Gidrostrujnye nasosy i ustanovki / B. F. Lyamaev. – L. : Mashinostroenie, 1988. – 256 s.
30. Belov, S. G. Pnevmo gidravlicheskiy dispergator gaza «Tornado» / S. G. Belov, G. O. Naumchik, E. I. Dmuha jlo // Aktual'nye nauchno-tehnicheskie 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. – С. 7–12.
31. Pnevmo gidravlicheskiy dispergator gaza : pat. BY 12838 / S. G. Belov, G. O. Naumchik. – Opubl. 28.02.2022.
32. Naumchik, G. O. Razrabotka metoda dispergirovaniya gaza s pomoshch'yu turbulentnogo potoka zhidkosti na granice poristoj stenki / G. O. Naumchik, V. S. Belov // Vestn. Brest. gos. tekhn. un-ta. Ser. Vodohoz. str-vo, teploenergetika i geoekologiya. – 2017. – № 2. – С. 102–105.
33. Sivak, V. M. Aeratory dlya ochistki prirodnyh i stochnyh vod / V. M. Sivak, N. E. YAnushevskij. – L'vov : Vishcha shkola, 1984. – 124 s.
34. Ksenofontov, B. S. Ispol'zovanie processov strujnoj aeracii v processah flotacionnoj ochistki stochnyh vod / B. S. Ksenofontov // Santekhnika. – 2022. – № 6. – С. 32–37.
35. Ksenofontov, B. S. Povyshenie effektivnosti strujnoj aeracii v processah flotacionnoj ochistki stochnyh vod / B. S. Ksenofontov // Santekhnika. – 2020. – № 4. – С. 36–39.
36. Ksenofontov, B. S. Intensifikaciya flotacionnoj ochistki stochnyh vod s ispol'zovaniem strujnyh aeratorov i ezhektorov / B. S. Ksenofontov, E. S. Stel'mah // Vodoochistka. – 2018. – № 6. – С. 25–35.
37. Volchek, A. A. Preimushchestva opticheskikh metodov izmereniya razmera i dispersnosti gazovyh puzyr'kov v vode. / A. A. Volchek, G. O. Naumchik, V. S. Belov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2025. – № 2. – С. 94–98.

References

1. Pennaya separaciya i kolonnaya flotaciya / YU. B. Rubinshtejn, V. I. Melik-Gajkazyan, N. V. Matveenko, S. B. Leonov. – M. : Nedra, 1989. – 304 s.
2. Meshcheryakov, N. F. Flotacionnye mashiny i apparaty / N. F. Meshcheryakov. – M. : Nedra, 1982. – 200 s.
3. ZHemoklev, A. K. Aeraciya i ozonirovanie v processah ochistki vody / A. K. ZHemoklev, L. P. Pilinevich, V. V. Savich. – Minsk : Tonpik, 2002. – 129 s.

Материал поступил 22.06.2026, одобрен 20.07.2026, принят к публикации 20.07.2026

УДК 556.16.047

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГРАФА РЕЧНОГО СТОКА**А. А. Волчек¹, С. В. Сидак², С. И. Парфомук³, О. П. Мешик⁴, Ю. П. Коляда⁵,
М. В. Борушко⁶, А. С. Протасевич⁷**¹ Д. г. н. РФ и РБ, профессор, профессор кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: prof.volchak@yandex.by² К. г. н., доцент кафедры математики и информатики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: harchik-sveta@mail.ru³ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой математики и информатики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: parfom@mail.ru⁴ К. т. н., доцент, декан факультета инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: omeshik@mail.ru⁵ Магистр, старший преподаватель кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: juliagirodnuik99@gmail.com⁶ Магистр, старший преподаватель кафедры лингвистических дисциплин и межкультурных коммуникаций, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: borushko.marina@mail.ru⁷ Магистр, зам. декана по идеологической и воспитательной работе факультета инженерных систем и экологии, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: protasevichnastua@gmail.com**Реферат**

В статье рассматриваются актуальные вопросы математического моделирования гидрографа речного стока и разработки автоматизированных методик прогнозирования половодий на территории Республики Беларусь. Исследование обусловлено необходимостью повышения точности гидрологических прогнозов в условиях изменяющегося климата и антропогенного воздействия на речные бассейны. Разработана адаптивная методика определения дат начала и окончания половодий, основанная на анализе ежедневных расходов воды. Методики апробированы на данных 16 гидрологических постов за 40-летний период (1971–2010 гг.). Результаты верификации показали высокую точность определения дат начала половодья (средняя абсолютная ошибка 2–3 дня в 90 % случаев) и удовлетворительную точность для дат окончания половодья (5–6 дней в 90 % случаев). Предложен алгоритм экстраполяции гидрографа для прогнозирования речного стока с заблаговременностью от 1 до 10 суток. Разработанный программный модуль обеспечивает автоматизацию процесса прогнозирования и позволяет учитывать климатические изменения через механизм самообучения. Практическая значимость работы заключается в создании инструментов для эффективного управления водными ресурсами, защиты населения от чрезвычайных ситуаций и рационального использования водных объектов. Предложенные методики применимы как для однопиковых, так и для многопиковых гидрографов, что расширяет возможности их использования в различных гидрологических условиях.

Ключевые слова: гидрограф, дата начала половодья, дата окончания половодья, заблаговременность прогноза, моделирование, половодье, прогноз, речной сток, экстраполяция.

MATHEMATICAL MODELING OF RIVER FLOW HYDROGRAPH**A. A. Volchak, S. V. Sidak, S. I. Parfamuk, O. P. Meshyk, Yu. P. Kaliada, M. V. Barushka, A. S. Pratasevich****Abstract**

The article addresses current issues of mathematical modeling of river flow hydrographs and development of automated methods for predicting floods in the Republic of Belarus. The research is driven by the need to improve the accuracy of hydrological forecasts under changing climate conditions and anthropogenic impact on river basins. An adaptive methodology has been developed to determine the start and end dates of floods, based on the analysis of daily water discharges. The techniques were tested using data from 16 hydrological stations over a 40-year period (1971–2010). Verification results demonstrated high accuracy in determining the start of floods (average absolute error of 2–3 days in 90 % of cases) and satisfactory accuracy for the end dates (5–6 days in 90 % of cases). An extrapolation algorithm for the hydrograph has been proposed to forecast river flow with a lead time of 1 to 10 days. The developed software module automates the forecasting process and incorporates a self-learning mechanism to account for climate changes. The practical significance of the work lies in creating tools for effective water resource management, protecting the population from emergencies, and rational use of water bodies. The proposed techniques are applicable to both single-peak and multi-peak hydrographs, expanding their usability under various hydrological conditions.

Keywords: hydrograph, flood start date, flood end date, forecast lead time, modeling, flood, forecast, river runoff, extrapolation.

Введение

Климатические изменения и растущее антропогенное воздействие на речные бассейны приводят к трансформации условий формирования и режима речного стока [1, 2]. В частности, наблюдаются изменение сезонного распределения стока, увеличение частоты экстремальных гидрологических явлений, модификация взаимосвязи между метеорологическими условиями и реакцией водосборов [3–5]. Такая динамика существенно усложняет прогнозирование гидрологического режима и требует регулярной актуализации параметров прогнозных схем по мере поступления новых гидрометеорологических данных.

Повышение точности и заблаговременности гидрологических прогнозов, а также расширение возможностей их практического применения приобретают на сегодняшний день особую актуальность [6]. Это необходимо для более эффективного управления

водными ресурсами, их рациональной эксплуатации и надёжной охраны, а также для защиты населения и объектов инфраструктуры от участвовавших в последние годы экстремальных явлений. Ключевое значение в системе предупреждения чрезвычайных ситуаций приобретают краткосрочные и среднесрочные прогнозы расходов и уровней воды в речных створах: заблаговременность таких прогнозов должна составлять от 1 до 5 суток для краткосрочных прогнозов и от 6 до 10 суток – для среднесрочных. При этом именно регулярная актуализация параметров прогнозных схем выступает необходимым условием поддержания требуемой точности прогнозов.

Регулярная актуализация параметров невозможна без надёжных алгоритмов расчленения гидрографа и выделения генетических составляющих стока – в первую очередь для корректного учёта вклада половодья и последующего построения прогнозных траекторий. Именно поэтому

моделирование гидрографа стока с детализацией по фазам водного режима становится критически важным этапом гидрологического прогноза. Определяющей фазой водного режима рек Беларуси является весеннее половодье, расчёт характеристик которой сопряжён с рядом трудностей. Особенно затруднительным оказывается выделение периода половодья, поскольку существующие методы и способы определения дат его начала и окончания носят преимущественно описательный характер и не содержат формализованных формул для их вычисления. Ситуация дополнительно осложняется многообразием форм гидрографов: при сильно растянутом из-за похолоданий снеготаянии или при выпадении обильных дождей на реках формируются половодья со сложными очертаниями, состоящие из нескольких самостоятельных волн; в годы же с дружным снеготаянием наблюдаются стройные однопиковые половодья, характеризующиеся большой интенсивностью подъёма и спада.

Несмотря на длительную историю развития методов расчленения гидрографа, в последние десятилетия актуальность этой задачи существенно возросла в связи с трансформацией природных и антропогенных факторов формирования стока. Так, в России вопросами расчленения гидрографов активно занимались Б. И. Куделин, заложивший основы автоматизированных подходов, а также М. Б. Киреева, Е. П. Ред, Н. Л. Фролова и другие исследователи, развивавшие методы выделения генетических составляющих стока и адаптировавшие алгоритмы к условиям российских водосборов – в частности, к выраженным сезонным половодьям и значительной доле снеготалого питания [7–9]. Значимым вкладом в развитие методологии стала работа Хасанова с соавторами, в которой проведена оптимизация параметров ряда методов расчленения гидрографа для повышения точности выделения базисного стока на примере бассейна реки Белая [10]. На основе многолетних данных гидрологических постов и оценки по критериям Нэша–Сатклиффа и Клинга–Гупты выполнен сравнительный анализ методов, в ходе которого подобраны оптимальные параметры для исследуемой речной сети. Установлено, что наилучшие результаты обеспечивают метод Экхардта и метод скользящего интервала; при этом выявлена нецелесообразность применения метода Экхардта с низким значением максимально возможного индекса базисного стока (BFImax) на водосборах со скальными породами. Полученные результаты позволили авторам сформулировать рекомендации по выбору и применению методов расчленения гидрографа для данного бассейна.

За рубежом существенный вклад в решение задачи расчленения гидрографа внесли Г. Экхардт, предложивший фильтрационный метод выделения базисного стока, Дж. У. Кирхнер с концепцией ансамблевого разделения гидрографа, а также Ф. Р. Холл и Р. Лайн, чьи работы легли в основу ряда расчётных схем, широко применяемых в Северной Америке и Европе [11–13].

Однако, несмотря на значительный объём опубликованных работ по расчленению гидрографов и моделированию стока, прямое применение зарубежных и даже общероссийских методик к условиям Республики Беларусь зачастую оказывается недостаточно эффективным. Необходимость подбора индивидуальных схем выделения периода половодья для каждой страны обусловлена разнообразием физико-географических и климатических условий: в одних регионах сток формируется преимущественно за счёт таяния снега и характеризуется чётко выраженным весенним половодьем, в других доминируют дождевые паводки с менее предсказуемой динамикой, а в третьих существенную роль играет ледниковое или подземное питание. Все эти факторы определяют специфику формы гидрографа и требуют настройки параметров расчленения с учётом местных закономерностей формирования стока, чтобы обеспечить достоверность гидрологических оценок и прогнозов.

Также одним из немаловажных факторов в моделировании гидрологических процессов в современных условиях является развитие автоматизированных методов определения характеристик речного стока и его прогнозирования [14–16]. Особую значимость приобретают автоматизированные подходы к определению характеристик половодья. Возможность автоматизации гидрологических расчётов напрямую определяется наличием алгоритмизируемых методов: в частности, алгоритм выделения периода половодья задаёт чёткие правила идентификации этой фазы во временном ряду. Его отсутствие означает, что этап обработки данных остаётся субъективным и ручным, что блокирует сквозную автоматизацию процесса и снижает оперативность подготовки прогнозов.

Цель исследования – адаптация методов моделирования гидрографа стока применительно к специфике водосборов Беларуси с целью их использования в автоматизированных расчётах.

Задачи исследования:

- разработка методики автоматического определения дат начала и окончания половодий;
- адаптация алгоритма экстраполяции гидрографа;
- верификация предложенных методик на репрезентативной выборке;
- автоматизация процесса моделирования гидрографа стока;
- оценка точности и надёжности разработанных подходов.

Материалы и методы исследования

Выделение периода половодья

Начиная с 1981 г. в справочнике «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод» данные о сроках прохождения половодья не публикуются, а предоставляются Государственным учреждением «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» по запросу потребителей.

Согласно ТКП 17-10.25-2010, выборка дат начала и окончания половодья выполняется по гидрографам стока с учетом хода метеорологических элементов: «... За дату начала половодья принимается первая дата с заметным увеличением расхода воды, предшествующая, как правило, дате с резким повышением уровня и расхода воды. За дату окончания принимается дата на спаде половодья, после прохождения основного объема талых вод, когда интенсивность спада резко снизилась, и отчетливо обозначился переход к летней межени, или дата, соответствующая переломной точке на гидрографе, отделяющей фазу спада от наступившего вслед за ней дождевого паводка» [17].

Для решения задачи выделения периода половодья использована методика Е. В. Шевниной, которая в рамках данного исследования была адаптирована к условиям рек Беларуси [18]. В работе Е. В. Шевниной «Методика расчета характеристик весеннего половодья по данным ежедневных расходов воды» предложены числовые критерии для определения дат начала и окончания половодья, на основе которых рассчитаны ретроспективные характеристики весеннего половодья, и проведена оценка предложенной методики расчета slopes стока на примере данных средних рек Российской Арктики за период с начала наблюдений до 1980 г. [18]. Для определения по предложенной методике дат начала и окончания половодья требуются величины α_n (пороговое значение относительного изменения расхода воды за временной шаг) и β_n (продолжительность периода, в течение которого эта величина превышена), при вычислении которых использованы опубликованные в ежегодных изданиях государственного водного кадастра данные о сроках начала половодья, оптимизированные для каждого водосбора [18]. При отсутствии таких данных расчет периода половодья по предложенной методике не представляется возможным.

В настоящей работе предложен адаптированный для территории Беларуси подход для расчета дат начала и окончания половодья на основе данных о ежедневных расходах воды речного стока.

Пусть $Q(t)$ – ежедневный расход воды в t -й день года, м³/с; $t = \overline{1, n}$, n – количество дней в году. Порядок определения дат начала половодья:

1) получим ряд значений $D(t)$ темпа роста ежедневных расходов воды, показывающий, насколько изменилось значение $Q(t)$ по сравнению с предыдущим значением $Q(t-1)$ в относительных величинах:

$$D(t) = \frac{Q(t) - Q(t-1)}{Q(t-1)}, \quad t = \overline{2, n}; \quad (1)$$

2) для обеспечения более стабильного представления ряда $D(t)$ и устранения единичных выбросов применим к нему метод скользящего среднего с длиной интервала сглаживания $h=11$, в результате чего получим ряд $\tilde{D}(t)$:

$$\tilde{D}(t) = \frac{\sum_{i=t-5}^{t+5} D(i)}{h}, \quad t = \overline{7, n-5}; \quad (2)$$

3) найдем значение t в пределах от 40 до 110, при котором наблюдается максимальное значение $\tilde{D}(t)$. Обозначим эту точку $\tilde{t}_{max}$;

4) итеративно просматриваем ряд $\tilde{D}(t)$ с точки $\tilde{t}_{max}$ в направлении уменьшения t , пока выполняется условие $\tilde{D}(t) > 0,02$. Первую точку, в которой нарушается данное условие, обозначим $\tilde{t}_b$. За начало половодья примем точку t_b , определяемую по формуле

$$t_b = \tilde{t}_b + (h-1)/2. \quad (3)$$

Определение даты окончания весеннего половодья представляется собой более сложную задачу по сравнению с определением даты его начала, что обусловлено рядом факторов. В отличие от резкого подъема расхода воды во время начала половодья, спад расходов воды зачастую происходит более постепенно и растянут во времени. Спад половодья может быть не плавным, а характеризоваться серией кратковременных увеличений расходов воды, обусловленных дополнительными осадками или таянием снега, что требует использования более сложной схемы расчета даты окончания половодья.

Введем некоторые дополнительные обозначения. Разность между наибольшим (Q_{max}) и наименьшим (Q_{min}) расходами речного стока за определенный временной интервал определяет размах (амплитуду) колебаний. Так как в научной литературе по гидрологии нет специального устоявшегося названия отношению Q_{max} к Q_{min} , введем в рассмотрение величину $A_{fl} = \frac{Q_{max_fl}}{Q_{min_fl}}$, где Q_{max_fl} – максимальный расход воды за период весеннего половодья, Q_{min_fl} – минимальный расход воды весеннего половодья. Величину A_{fl} назовем относительным коэффициентом зарегулированности половодья.

Тогда относительным коэффициентом зарегулированности за период времени от t_1 до t_2 назовем величину $A_{fl}|_{t_1}^{t_2}$, вычисляемую по формуле

$$A_{fl}|_{t_1}^{t_2} = \frac{Q_{max_fl}|_{t_1}^{t_2}}{Q_{min_fl}|_{t_1}^{t_2}}, \quad (4)$$

где $Q_{min}|_{t_1}^{t_2}$ – минимальный расход воды за период времени от t_1 до t_2 , м³/с.

Для определения даты окончания половодья предлагается следующий алгоритм:

- 1) определяем значение максимального расхода воды Q_{max_fl} как максимальный из ежедневных расходов воды с середины февраля по конец апреля с учетом того, что реки Беларуси относятся к рекам восточно-европейского типа со стоком во все сезоны года, но с преобладанием весеннего стока. За t_{max} примем день, в который наблюдается пик половодья;
- 2) вычисляем средний ($\bar{Q}|_{t_{max}}^{180}$) и минимальный ($Q_{min}|_{t_{max}}^{180}$) расходы воды за период от t_{max} до конца июня;
- 3) определяем относительный коэффициент зарегулированности стока за период от t_{max} до конца июня:

$$k = A_{fl}|_{t_{max}}^{180} = \frac{Q_{max_fl}}{Q_{min}|_{t_{max}}^{180}}. \quad (5)$$

Обозначим через

$$l = Q_{min}|_{t_{max}}^{180} \cdot (1 + 0,35 \cdot k); \quad (6)$$

- 4) для определения даты окончания половодья (t_e) «спускаем вправо» по гидрографу от точки с координатами (t_{max} , Q_{max}) до тех пор, пока выполняется одно из двух условий:

$$Q(t) \geq \min(\bar{Q}|_{t_{max}}^{180}, l), \quad D(t) < -0,01, \quad (7)$$

где $D(t)$ – относительное изменение расхода воды за сутки, определяемое по формуле (1).

Первая точка (t_e), в которой нарушаются оба условия (7), будем считать датой окончания весеннего половодья.

Дополнительные параметры в критериях определения дат начала и окончания половодья ($\bar{D}(t) > 0,02$, $D(t) < -0,01$, $h=11$, коэффициент 0,35 в формуле (6)) выбраны на основании минимизации средней абсолютной ошибки (в днях) определения дат начала и окончания половодья.

Экстраполяция гидрографа

На сегодняшний день разработан широкий спектр методов краткосрочного и среднесрочного прогнозирования речного стока. Они в той или иной степени учитывают закономерности формирования стока на водосборе и перемещения водных масс в русловой сети. Такие методы реализуются в форме физико-математических моделей, концептуальных гидрологических моделей, статистических зависимостей, связывающих прогнозируемые величины с известными на момент составления прогноза гидрологическими и метеорологическими характеристиками. При создании автоматизированной системы подготовки и выпуска гидрологических прогнозов особенно важно использовать метод, который отличается простотой и универ-

сальностью, обеспечивает устойчивые результаты с достаточной точностью, позволяет ежедневно формировать прогнозы среднесуточных расходов и уровней воды на протяжении всего года.

В связи с этим для исследования характеристик стока рек Беларуси адаптирован и реализован метод экстраполяции гидрографа, позволяющий ежедневно в течение всего года прогнозировать характеристики стока рек с заблаговременностью от 1 до 10 суток [19, 20].

Суть метода экстраполяции гидрографа заключается в том, что прогноз расхода воды $\bar{Q}(t + \Delta t)$ на период заблаговременности Δt представляется в виде линейной комбинации текущего расхода воды $Q(t)$, соответствующего дате составления прогноза, и k предшествующих значений расхода $Q(t-1), \dots, Q(t-k)$. Математически это выражается формулой

$$\bar{Q}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^{k-1} \alpha_i(\Delta t) \cdot Q(t-i) + b(\Delta t), \quad (8)$$

где $\alpha_0(\Delta t), \alpha_1(\Delta t), \dots, \alpha_{k-1}(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ – параметры линейной модели. Они зависят от заблаговременности прогноза (Δt) и определяются путём оценки по данным гидрологических наблюдений

Предлагаемый метод пригоден как для краткосрочного, так и для среднесрочного прогнозирования речного стока – как в рамках отдельной фазы водного режима, так и на протяжении всего гидрологического года. При этом метод не сводится к формальной экстраполяции: параметры расходов воды за k суток, фигурирующие в формуле (8), косвенно отражают ключевые процессы формирования стока. К ним относятся: поступление талых и дождевых вод, динамика почвенной влаги и запасов подземных вод, изменение объёмов воды в русле и на пойме, а также трансформация волны половодья или паводка за предшествующий период.

Для оценки качества прогноза, полученного с использованием модельного уравнения (8) использованы следующие показатели: *среднеквадратическая ошибка прогноза* (RMSE, м³/с), *средняя абсолютная ошибка* в процентах (MAPE, %) и *коэффициент детерминации* (R^2), определяемые по формулам:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)^2}{N}}, \quad (9)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Q_i - \bar{Q}_i|}{Q_i} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Q}_i - \bar{Q})(Q_i - \bar{Q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\bar{Q}_i - \bar{Q})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2}} \right]^2, \quad (11)$$

где N – объем выборки;

Q_i – фактические значения расходов воды, м³/с;

$\bar{Q}_i$ – прогнозные значения расхода воды, м³/с;

i – номер наблюдения в выборке;

$\bar{Q}$ – среднее значение фактических расходов воды, м³/с;

$\bar{Q}$ – среднее значение спрогнозированных расходов воды, м³/с.

Для автоматизации процесса прогнозирования и оценки качества прогнозов применительно к произвольному набору речных створов и связанных с ними гидрологических постов разработан специализированный программный модуль на базе Excel + VBA. Модуль обеспечивает считывание и обработку данных из одного или нескольких файлов; расчёт параметров прогнозной схемы для каждого речного створа; оценку показателей качества формируемых прогнозов; генерацию сводной таблицы с итоговыми результатами прогнозирования.

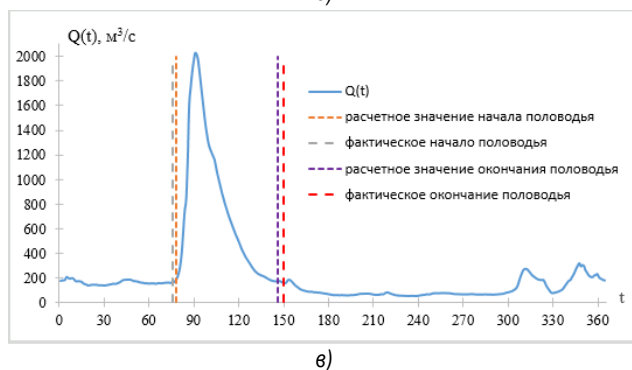
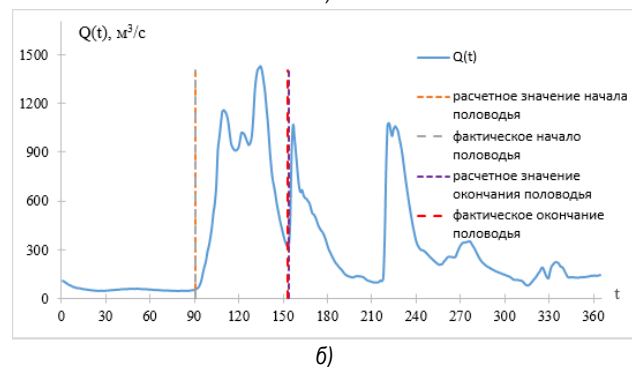
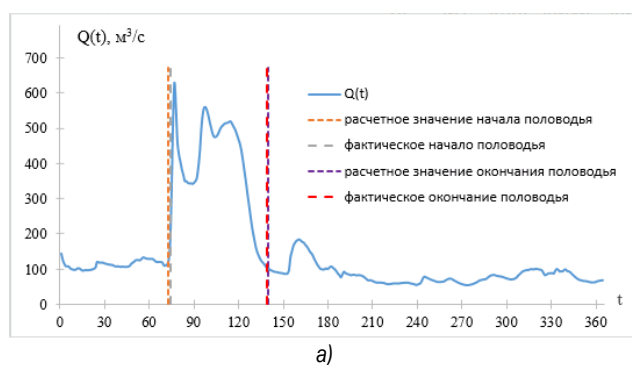
Результаты исследования и их обсуждение

Верификация модели выделения периода половодья выполнена на основании данных о ежедневных расходах воды на равномерно расположенных по территории Беларуси 16 гидрологических постах (перечень постов представлен в таблице 1) за 40-летний период 1971–2010 гг.

В среднем по 16 рассматриваемым створам предложенный алгоритм выделения сроков прохождения половодья позволяет определять даты начала половодья со средней абсолютной ошибкой два-три дня в 90 % случаев, даты окончания половодья со средней абсолютной ошибкой пять-шесть дней в 90 % случаев. Стоит отметить, что предложенная модель выделения дат начала и окончания половодья показала хорошие результаты как при работе с однопиковыми гидрографами, так и с многопиковыми (рисунок 1).

Таблица 1 – Средняя абсолютная ошибка (в днях) определения дат начала и окончания половодья

Река – Створ	Дата начала половодья		Дата окончания половодья	
	ошибка по всей выборке	ошибка в 90 % случаев	ошибка по всей выборке	ошибка в 90 % случаев
р. Западная Двина – г. Витебск	3–4	1–2	10–11	5–6
р. Западная Двина – г. Полоцк	3–4	1–2	11–12	6–7
р. Оболь – г. Оболь	4–5	1–2	10–11	5–6
р. Неман – г. Мосты	6–7	2–3	12–12	6–7
р. Неман – г. Гродно	6–7	2–3	11–12	7–8
р. Щара – г. Слоним	7–8	3–4	13–14	9–10
р. Днепр – г. Могилев	3–4	2–3	6–7	4–5
р. Березина – г. Борисов	5–6	1–2	10–11	6–7
р. Сушанка – д. Суша	4–5	1–2	8–9	2–3
р. Сож – г. Славгород	5–6	1–2	9–10	5–6
р. Сож – г. Гомель	6–7	2–3	7–8	4–5
р. Проня – д. Леляги	5–6	1–2	7–8	4–5
р. Припять – г. Мозырь	6–7	3–4	10–11	8–9
р. Ясельда – д. Сенин	6–7	4–5	10–11	7–8
р. Цна – д. Дятловичи	6–7	3–4	8–9	5–6
р. Уборть – д. Краснобережье	7–8	3–4	8–9	4–5
среднее	5–6	2–3	9–10	5–6



а) р. Днепр – г. Могилев (2001 г.); б) р. Западная Двина – г. Витебск (1987 г.); в) р. Западная Двина – г. Витебск (2004 г.)

Рисунок 1 – Гидрографы с фактическими и смоделированными датами начала и окончания половодья для разных типов гидрографов

Смоделированные числовые критерии выделения периода половодья для рек Беларуси могут быть использованы для массовых расчетов доли половодья в годовом стоке, выделения поверхностной и грунтовой составляющей с приемлемой точностью, а также для автоматизации расчленения гидрографа стока.

Рассмотрим пример работы реализованного метода экстраполяции гидрографа на примере ежедневных гидрологических наблюдений за расходами воды в створе Припять – г. Мозырь.

При заданной заблаговременности прогноза $\Delta t = 1, \dots, 10$ параметрами $\alpha_0(\Delta t), \alpha_1(\Delta t), \dots, \alpha_{k-1}(\Delta t)$ и $b(\Delta t)$ формулы (8) оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за исследуемый период.

В таблице 2 приведены параметры формулы (8) получения прогноза за ежедневных расходов воды в створе р. Припять – г. Мозырь.

Таблица 2 – Параметры формулы (8) получения прогноза ежедневных расходов воды в створе р. Припять – г. Мозырь с заблаговременностью Δt

Δt	α_4	α_3	α_2	α_1	α_0	b	R^2
1	-0,064	0,078	-0,135	-0,555	1,673	0,941	0,999
2	-0,185	0,197	-0,190	-1,071	2,243	2,579	0,997
3	-0,274	0,207	-0,176	-1,447	2,679	4,797	0,994
4	-0,319	0,180	-0,233	-1,677	3,031	7,426	0,989
5	-0,336	0,154	-0,305	-1,928	3,390	10,378	0,982
6	-0,399	0,232	-0,401	-2,203	3,738	13,700	0,974
7	-0,488	0,308	-0,407	-2,500	4,045	17,399	0,965
8	-0,560	0,331	-0,402	-2,681	4,260	21,444	0,953
9	-0,600	0,320	-0,423	-2,797	4,438	25,716	0,941
10	-0,636	0,335	-0,473	-2,918	4,618	30,167	0,927

На рисунке 2 (а) для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных на основании модели (8) и коэффициентов, представленных в таблице 2, с заблаговременностью $\Delta t = 1$ сутки расходов воды в 2018 году, на рисунке 2 (б) – с заблаговременностью $\Delta t = 5$ суток, на рисунке 2 (в) – с заблаговременностью $\Delta t = 10$ суток.

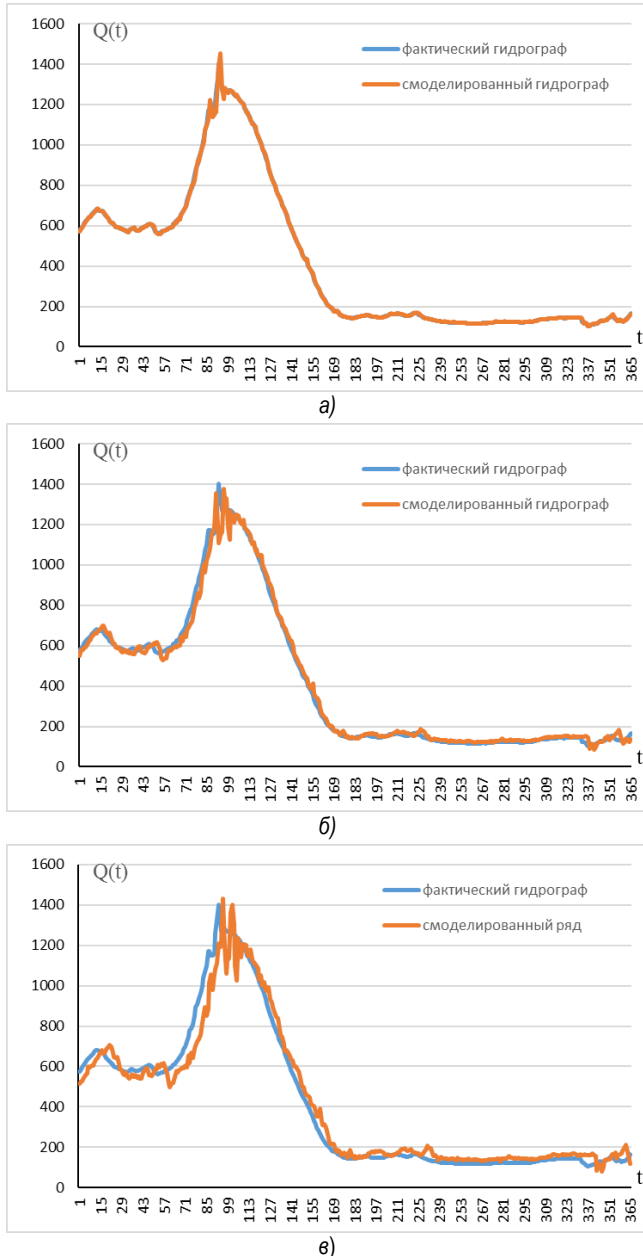


Рисунок 2 – Фактические и спрогнозированные с заблаговременностью $\Delta t = 1$ суток (а), $\Delta t = 5$ суток (б), $\Delta t = 10$ суток (в) гидрографы в створе р. Припять – г. Мозырь в 2018 г.

Значения показателя RMSE составляет 10,75, 33,08, 63,12 м³/с, соответственно для $\Delta t = 1$, $\Delta t = 5$, $\Delta t = 10$ суткам. Значения показателя MAPE составляет 1 %, 6 %, 12 %, соответственно для $\Delta t = 1$, $\Delta t = 5$, $\Delta t = 10$ суткам.

Созданный программный модуль для получения гидрологических прогнозов обладает функцией самообучения. Эта функция реализуется за счёт регулярного обновления параметров прогностических формул на основе вновь поступающих данных гидрологических наблюдений. Такой механизм позволяет адекватно учитывать климатические изменения и антропогенное воздействие, влияющие на условия формирования и режим речного стока.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана и апробирована адаптивная методика определения дат начала и окончания периода половодья на реках Беларуси. Разработаны числовые критерии выделения периода половодья с учетом специфики речно-

го стока Беларуси. Создан автоматизированный алгоритм расчета дат начала и окончания половодья по данным ежедневных расходов воды, в основу которого положены разработанные критерии. Проведена верификация методики на данных 16 гидрологических постов за 40-летний период (1971–2010 гг.). Методика показала следующие результаты точности определения: даты начала половодья – средняя абсолютная ошибка два-три дня в 90 % случаев, даты окончания половодья – средняя абсолютная ошибка пять-шесть дней в 90 % случаев. Практическая значимость данной разработки заключается в следующем: методика успешно апробирована на реках всей территории Беларуси, обеспечивает достоверное определение дат половодья как для однопиковых, так и для многопиковых гидрографов, позволяет проводить массовые расчеты характеристик половодья, автоматизирует процесс расчленения гидрографа.

Реализованный метод экстраполяции гидрографа обеспечивает возможность круглогодичного прогнозирования ежедневных расходов воды с заблаговременностью от 1 до 10 суток. Прогноз строится на основе простой расчётной формулы, параметры которой калибруются по данным ежедневных гидрологических наблюдений за выбранный пользователем период. Для автоматизации процесса получения прогнозов и оценки их качества разработан специализированный компьютерный модуль. Он позволяет оперативно пересчитывать все параметры и характеристики при изменении состава речных створов или поступлении новых гидрологических данных. Результаты верификации подтвердили, что метод экстраполяции гидрографа в сочетании с автоматизированным модулем даёт удовлетворительные прогнозы расходов для рек, характеризующихся плавным изменением гидрологических показателей.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант № X25KI-036).

Список цитированных источников

1. State of the Global Climate 2025 // World Meteorological Organization. – URL: <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate/state-of-global-climate-2025> (date of access: 01.06.2026).
2. Волчек, А. А. Многолетняя изменчивость стока рек Беларуси в условиях изменения климата и антропогенных воздействий / А. А. Волчек, С. В. Сидак, С. И. Парфомук // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Брест. гос. техн. ун-та и 50-летию ф-та инженерных систем и экологии, Брест, 7–8 окт. 2021 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: А. А. Волчек [и др.]. – Брест, 2021. – С. 101–113.
3. Волчек, А. А. Оценка современных изменений максимального стока рек Беларуси / А. А. Волчек, Ан. А. Волчек, С. В. Сидак // География. – 2020. – Т. 4. – С. 26–32.
4. Volchak, A. Intra-annual runoff distribution in the Pripyat River basin / A. Volchak, S. Parfomuk, S. Sidak // ICBTE 2020, E3S Web of Conferences. – 2020. – Т. 212. – P. 01016. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021201016.
5. Волчек, А. А. Динамика изменения водных ресурсов Беларуси в современных условиях / А. А. Волчек, С. В. Сидак, С. И. Парфомук // Инновации: от теории к практике : сб. науч. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 21–22 окт. 2021 г. / Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: В. В. Зазерская [и др.]. – Брест, 2021. – С. 81–89.
6. Investigating Impacts of Climate Change on Runoff from the Qinhui River by Using the SWAT Model and CMIP6 Scenarios / J. Sun, H. Yan, Z. Bao, G. Wang // Water. – 2022. – Vol. 14, № 11. – P. 1778. – DOI: 10.3390/w14111778.
7. Алгоритм автоматизированного расчленения гидрографа по методу БИ Куделина GrWat: проблемы и перспективы / Е. П. Рец, М. Б. Киреева, Т. Е. Самсонов [и др.] // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49, № 1. – С. 27–42. – DOI: 10.31857/S032105962201014X.
8. Куделин, Б. И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод / Б. И. Куделин. – М.: МГУ, 1960. – 343 с.
9. Чижова, Ю. Н. Двухкомпонентное расчленение гидрографа р. Протвы / Ю. Н. Чижова, Е. П. Рец, Н. А. Тебенькова [и др.] // Вестн. МГУ. Сер. География. – 2021. – № 6. – С. 48–56.

10. Оптимизация параметров методов расчленения гидрографа для повышения их эффективности на примере бассейна реки Белой / И. А. Хасанов, А. Н. Елизарьев, Д. А. Тараканов, Дм. А. Тараканов // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2025. – Т. 6, № 2. – С. 125–137. – DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.125.
11. Eckhardt, K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods / K. Eckhardt // Journal of Hydrology. – 2008. – Vol. 352 (1–2). – P. 168–173.
12. Lyne, V. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling / V. Lyne, M. Hollick // Institute of engineers Australia national conference. Barton, Australia: Institute of Engineers Australia. – 1979. – Т. 79, Vol. 10. – P. 89–93.
13. Kirchner, J. W. Quantifying new water fractions and transit time distributions using ensemble hydrograph separation: theory and benchmark tests / J. W. Kirchner // Hydrology and Earth System Sciences. – 2019. – Vol. 23, № 1. – P. 303–349.
14. Ensemble machine learning for global hydrological prediction / C. Liu, D. Liu, L. Mu, J. Zhang // Water Resources Research. – 2022. – Vol. 58, № 12. – Art. e2021WR030993.
15. Berhail, S. The use of the recession index as indicator for components of flow / S. Berhail, L. Ouerdachi, H. Boutaghane // Energy Procedia. – 2012. – № 18. – P. 741–750.
16. Framework for ensemble hydrograph prediction using machine learning and hydrological models / G. I. Brunner, N. Addor, M. Zappa, F. Comola // Hydrology and Earth System Sciences. – 2021. – Vol. 25, No. 3. – P. 1423–1441.
17. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорологическая деятельность. Государственный водный кадастр. Правила составления справочника «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод»: ТКП 17-10.25-2010 (02120). – Введ. 01.03.11. – Минск: Минприроды, 2011. – 59 с.
18. Шевнина, Е. В. Методика расчета характеристик весеннего половодья по данным ежедневных расходов воды / Е. В. Шевнина // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2013. – № 1 (95). – С. 44–50.
19. Экстраполяция гидрографов как метод краткосрочного прогнозирования речного стока / С. В. Борщ, Ю. А. Симонов, А. В. Христофоров [и др.] // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2018. – № 3 (369). – С. 74–86.
20. Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа / С. В. Борщ, В. М. Колий, Н. К. Семенова [и др.] // Вестник МГУ. Сер. География. – 2021. – № 2 (380). – С. 77–94. – DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-77-94.
5. Volchek, A. A. Dinamika izmeneniya vodnyh resursov Belarusi v sovremennykh usloviyakh / A. A. Volchek, S. V. Sidak, S. I. Parfomuk // Innovacii: ot teorii k praktike : sb. nauch. st. VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 21–22 okt. 2021 g. / Brest. gos. tekhn. un-t; redkol.: V. V. Zazerskaya [i dr.]. – Brest, 2021. – S. 81–89.
6. Investigating Impacts of Climate Change on Runoff from the Qinhuai River by Using the SWAT Model and CMIP6 Scenarios / J. Sun, H. Yan, Z. Bao, G. Wang // Water. – 2022. – Vol. 14, № 11. – P. 1778. – DOI: 10.3390/w14111778.
7. Algoritm avtomatizirovannogo raschleneniya gidrografa po metodu BI Kudelina GrWat: problemy i perspektivy / E. P. Rec, M. B. Kireeva, T. E. Samsonov [i dr.] // Vodnye resursy. – 2022. – Т. 49, № 1. – S. 27–42. – DOI: 10.31857/S032105962201014X.
8. Kudelin, B. I. Principy regional'noj ochenki estestvennykh resursov podzemnykh vod / B. I. Kudelin. – M.: MGU, 1960. – 343 s.
9. CHizhova, YU. N. Dvuhkomponentnoe raschlenenie gidrografa r. Protvy / YU. N. CHizhova, E. P. Rec, N. A. Teben'kova [i dr.] // Vestn. MGU. Ser. Geografiya. – 2021. – № 6. – S. 48–56.
10. Optimizaciya parametrov metodov raschleneniya gidrografa dlya povysheniya ih effektivnosti na primere basseina reki Beloi / I. A. Hasanov, A. N. Elizar'ev, D. A. Tarakanov, Dm. A. Tarakanov // Gidrosfera. Opasnye processy i yavleniya. – 2025. – Т. 6, № 2. – S. 125–137. – DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.125.
11. Eckhardt, K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods / K. Eckhardt // Journal of Hydrology. – 2008. – Vol. 352 (1–2). – P. 168–173.
12. Lyne, V. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling / V. Lyne, M. Hollick // Institute of engineers Australia national conference. Barton, Australia: Institute of Engineers Australia. – 1979. – Т. 79, Vol. 10. – P. 89–93.
13. Kirchner, J. W. Quantifying new water fractions and transit time distributions using ensemble hydrograph separation: theory and benchmark tests / J. W. Kirchner // Hydrology and Earth System Sciences. – 2019. – Vol. 23, № 1. – P. 303–349.
14. Ensemble machine learning for global hydrological prediction / C. Liu, D. Liu, L. Mu, J. Zhang // Water Resources Research. – 2022. – Vol. 58, № 12. – Art. e2021WR030993.
15. Berhail, S. The use of the recession index as indicator for components of flow / S. Berhail, L. Ouerdachi, H. Boutaghane // Energy Procedia. – 2012. – № 18. – P. 741–750.
16. Framework for ensemble hydrograph prediction using machine learning and hydrological models / G. I. Brunner, N. Addor, M. Zappa, F. Comola // Hydrology and Earth System Sciences. – 2021. – Vol. 25, No. 3. – P. 1423–1441.
17. Ohrana okruzhayushchei sredy i prirodoopol'zovanie. Gidrometeorologicheskaya devatel'nost'. Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Pravila sostavleniya spravochnika «Mnogoletnie dannye o rezhime i resursah poverhnostnykh vod»: TKP 17-10.25-2010 (02120). – Vved. 01.03.11. – Minsk: Minprirody, 2011. – 59 s.
18. SHEvnina, E. V. Metodika rascheta harakteristik vesennego polovod'ya po dannym ezhednevnykh raskhodov vody / E. V. SHEvnina // Problemy Arktiki i Antarkтики. – 2013. – № 1 (95). – S. 44–50.
19. Ekstrapolyaciya qidrografov kak metod kratkosrochnogo prognozirovaniya rechnogo stoka / S. V. Borshch, YU. A. Simonov, A. V. Hristoforov [i dr.] // Gidrologicheskie issledovaniya i prognozy. – 2018. – № 3 (369). – S. 74–86.
20. Prognozirovanie stoka rek Rossii metodom ekstrapolyacii gidrografa / S. V. Borshch, V. M. Kolij, N. K. Semenova [i dr.] // Vestnik MGU. Ser. Geografiya. – 2021. – № 2 (380). – S. 77–94. – DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-77-94.

References

Материал поступил 30.06.2026, одобрен 02.07.2026, принят к публикации 02.07.2026

УДК 528.94

ИНТЕРАКТИВНАЯ КАРТА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ БЕЛАРУСИ: КОНЦЕПЦИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ

А. А. Волчек¹, Н. В. Усс²

¹ Д. г. н. РФ и РБ, профессор, профессор кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: prof.volchak@yandex.by

² Магистр, аспирант кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: natallyanovosad@mail.ru

Реферат

В статье рассмотрены функциональные возможности программного обеспечения, необходимые для создания интерактивной карты водных объектов Беларуси. В результате исследования определено, что наиболее подходящей для выполнения поставленной задачи по своим характеристикам и набору функций является геоинформационная система ArcGIS. Карта разрабатывается на основе авторской базы данных водных объектов Беларуси, созданной в программе Microsoft Excel, которая включает в себя характеристики и параметры, присущие каждому виду объектов (реки, озера, водохранилища) и его описание. В описание включаются данные по ключевым режимам водного объекта (водному, термическому и ледовому), его гидрохимическим характеристикам, показателям биологического разнообразия и перечню экосистемных услуг, получаемых человеком от водоема (питьевая вода, рыболовство, рекреационная деятельность и др.). Описан процесс создания интерактивной карты на базе геоинформационной системы ArcGIS Online Map Viewer Classic. В рамках алгоритма рассмотрены следующие этапы: выбор базовой карты, работа со слоями, формирование и редактирование полигонов водных объектов, настройка отображения объекта на карте, наполнение атрибутивной информацией и настройка параметров визуализации данных. Дополнительно рассмотрены способы визуализации водного объекта, при которой оптимальным вариантом отображения на интерактивной карте признано прикрепление к его описанию фотоснимков. При нажатии на фотографию доступны полезные ссылки на 3D-панораму или видео объекта в интернете. В рамках исследования создается собственная база фото- и видеоматериалов, которая систематизирует визуальные данные о реках и водоемах Беларуси для последующего анализа и визуализации объекта на интерактивной карте.

Ключевые слова: водные объекты, интерактивная карта рек и водоемов Беларуси, геоданные, геоинформационная система ArcGIS, облачная платформа ArcGIS Online, информационное окно, визуализация.

INTERACTIVE MAP OF WATER BODIES IN BELARUS: CONCEPT AND IMPLEMENTATION

A. A. Volchak, N. V. Us

Abstract

The article discusses the functionality of the software required to create an interactive map of water bodies in Belarus. The study has determined that the most suitable software for this task is the ArcGIS geoinformation system. The map is based on the author's database of water bodies in Belarus, created in Microsoft Excel, which includes the characteristics and parameters of each type of water body (rivers, lakes, and reservoirs) and their descriptions. The description includes data on the key modes of a water body (water, thermal, and ice), its hydrochemical characteristics, indicators of biological diversity, and a list of ecosystem services provided by the water body to humans (drinking water, fishing, recreational activities, etc.). The process of creating an interactive map based on the ArcGIS Online Map Viewer Classic geoinformation system is described. The following steps are covered with in the algorithm: selecting a base map, working with layers, creating and editing water body polygons, configuring the display of the object on the map, filling in attribute information, and configuring data visualization parameters. In addition, the methods of visualizing a water object are considered, where the optimal option for displaying it on an interactive map is to attach photographs to its description. When you click on a photograph, you will be provided with useful links to a 3D-panorama or video of the object on the internet. As part of the research, a database of photos and videos is being created, which organizes visual data about the rivers and reservoirs of Belarus for subsequent analysis and visualization of the object on an interactive map.

Keywords: water bodies, interactive map of rivers and reservoirs of Belarus, geodata, the ArcGIS geoinformation system, the ArcGIS Online cloud platform, information window, visualization.

Введение

Проблемы водных ресурсов весьма разнообразны и требуют объективной оценки. В связи с тем, что на территории нашей страны расположено более 20 000 рек и более 10 000 озер, встает вопрос о создании единой информационной пространственной системы водных объектов. Эта система может быть представлена в виде интерактивной геоинформационной карты, которая, в отличие от бумажных карт, содержит большой объем информации об объекте и позволяет оперативно вносить изменения в соответствии с меняющимися обстоятельствами.

На сегодняшний день существует большое количество картографических сервисов, которые позволяют пользователям просматривать, исследовать и анализировать географическую информацию, а также создавать и редактировать карты. Они предоставляют доступ к различным источникам данных, таким как OpenStreetMap, GIS-данные и спутниковые снимки, а также позволяют настраивать отображение карт, добавлять свои метки и комментарии. Наиболее популярными сервисами в мире являются Google Maps, а в странах СНГ – Яндекс Карты [1].

Современные геосервисы предлагают широкий спектр информации о различных территориях по всему миру, однако не все географические объекты представлены на них достаточно подробно. Во многих случаях информация является неполной или не соответствует действительности. Поэтому для получения актуальной и детальной информации об объекте часто приходится обращаться к сторонним источникам.

Анализ существующих интерактивных карт показал, что в настоящее время отечественных аналогов карты, которая в полном объеме раскрывает информацию о водных объектах Беларуси, не существует.

В связи с этим целью нашего исследования является разработка и актуальное информационное наполнение интерактивной карты рек и водоемов Беларуси на основе базы данных водных объектов.

Результаты исследований и их обсуждение

В основе создания интерактивных карт лежит уникальная технология геоинформационных систем (ГИС), которая в настоящее время весьма перспективна и востребована. Если изначально интерактивные карты отображали исключительно картографическую информацию, то сегодня они имеют инструменты доступа к различного

рода базам данных. В интерактивных картах существует возможность масштабирования мелких участков территории, а также вывода интересующей информации об объекте. В отличие от простых статических карт у каждого условного знака на интерактивной карте есть не только его обычная информационная составляющая, но и скрытая, выводимая по мере необходимости. Такой подход позволяет не перегружать карту условными знаками и маркерами, делает ее более понятной и простой в использовании [2, 3].

В настоящее время уже существуют специализированное ГИС программное обеспечение, в котором уже реализован механизм создания электронной интерактивной карты [4].

Функциональные возможности программного обеспечения для создания интерактивной карты водных объектов Беларуси должны включать [5–7]:

- 1) возможность визуализации большого количества географических объектов (рек, озер, водохранилищ и т. д.);
- 2) наличие инструментов для редактирования и настройки отображения географических объектов (например, построение полигонов, изменение масштаба, добавление подписей и описаний);
- 3) поддержку различных форматов данных (например, CSV и др.);
- 4) интеграцию с популярными картографическими сервисами (например, OpenStreetMap);
- 5) возможность создания интерактивных элементов (например, всплывающих окон с информацией о реках и водоемах);
- 6) поддержку различных языков программирования и возможность интеграции с другими программными продуктами;
- 7) возможность создания тематических слоёв, таких как гидрология, экология, туризм;
- 8) поддержку различных типов данных, включая векторные, растровые и табличные данные;
- 9) интеграцию с геоинформационными системами (ГИС) и базами данных для обеспечения целостности и актуальности информации [8];
- 10) возможность экспорта карты в различные форматы (PNG, JPEG, SVG, PDF) для публикации на веб-сайте или использования в других проектах;
- 11) наличие инструментов для создания и редактирования атрибутивной информации о географических объектах, такой как названия, описания, координаты и другой информации;

12) возможность настройки параметров отображения карты, таких как прозрачность и других визуальных эффектов;

13) работу с линейными и полигональными геообъектами;

14) применение оверлейных операций (наложение двух или более слоев карт друг на друга для сравнения, анализа или комбинирования данных. Это позволяет работать с различными слоями картографической информации одновременно, что может быть полезно для различных географических исследований);

15) возможность настроить общий доступ для других пользователей, а также возможность поделиться ссылкой на созданную карту;

16) возможность оперативно редактировать карту в связи с изменяющейся обстановкой [9, 10].

Таким образом, при анализе необходимых для создания геоинформационной интерактивной карты водных объектов Беларуси функции специализированного программного обеспечения было выявлено, что наиболее подходящей для выполнения поставленной задачи по своим характеристикам и функциональным возможностям является геоинформационная система ArcGIS [11].

Для создания интерактивной карты водных объектов Беларуси разрабатывается собственная база данных водных объектов на основе программы Microsoft Excel. Для загрузки базы данных в ArcGIS файл Microsoft Excel необходимо сохранить с расширением *.csv [17, 19].

На данный момент разработанная база данных насчитывает 2 280 объектов, из которых: рек – 1645, водохранилищ – 43, озер – 479, мелиоративных каналов – 113. При этом продолжается работа по ее расширению и дополнению.

Для каждого вида объектов создается отдельная таблица в Microsoft Excel, где задаются присущие ему характеристики и параметры.

1. Для озер: название, координаты центра озера, бассейн реки, площадь зеркальной поверхности, длина и ширина (средняя и наибольшая), глубина (средняя и наибольшая), длина береговой линии, объем воды, описание.

2. Для рек: название, длина, площадь водосбора, среднегодовой расход воды в устье, средний уклон поверхности, координаты истока, координаты устья, водная система, правые притоки, левые притоки, наибольшая глубина/ширина, описание (рисунок 1).

Название	Длина, км	Площадь водосбора, км²	Среднегодовой расход воды в устье, м³/с	Средний уклон поверхности, ‰	Координаты истока	Координаты устья	Водная система	Правые притоки	Левые притоки	Наибольшая глубина/ширина	Описание
Абасица	4				55°44'34" с. ш. 27°14'06" в. д.	55°43'15" с. ш. 27°12'25" в. д.	Дружина - Западная Двина - Балтийское море				Абасица — река в Брестской области, левый приток реки Дружина (бассейн Западной Двины). Вытекает из озера Абасица, впадает в реку Дружина. Река течет на юго-запад, каналы канализованы.
Абасица	89	809	5	0,9	54°34'01" с. ш. 29°48'03" в. д.	54°55'18,60" ш. ш. 30°12'04" в. д.	Луньса - Западная Двина - Балтийское море	Нерасица, Чудинка, Тонкая Луньса	Субота, Камынка		Абасица — река в Гродненской области, левый приток реки Луньса (бассейн Западной Двины). Пачинаецца на поўдні ад вёскі Давілава ў Талачанскім раёне на Ашмянскай вуліцы, цячэ па Чашчанскай раёне ў Сенненскім раёне, утварае плыню ў Віцебскім раёне на Луцкай нязі. Даўжыня тэрытарыяльная, шырыня 0,6–0,8 км, у ніжняй плыні да 2 км. Аб'ёмнае дрэннае, шырыня 0,2–0,3 км, вышэй вёскі Дубіжы каля 0,5 км. Рэчніца з'явілася, шырыня 5–10 м. Рэка вынастаўляецца ў якасці водарэчча мелиоративных сістэм.

Рисунок 1 – Фрагмент созданной в Microsoft Excel базы данных рек Республики Беларусь для интерактивной карты

3. Для водохранилищ: название, координаты центра водохранилища, площадь водного зеркала, длина и ширина, максимальная глубина, протяженность береговой линии, объем воды полный, описание [18].

Описание представляет собой отличительные особенности водного объекта, его уникальные характеристики, которые для каждого вида объектов выбираются и прописываются отдельно. Например, для рек в данный раздел дополнительно вносится информация о наличии гидрологических постов; описание долины, поймы, русла, берегов; канализование; по каким охраняемым территориям протекает и др.

В описании также включаются характеристики водного режима (уровень воды, скорость течения); характеристики термического режима (средняя температура воды в водном объекте в течение определенного периода времени); характеристики ледового режима

(даты начала и конца ледовых явлений по данным постов, наибольшая толщина льда за год); гидрохимические характеристики (мутность и химический состав воды, ее прозрачность, соленость, кислотность) и др.

Важным показателем при описании водного объекта является его биологическое разнообразие: наличие различных видов растений, животных и микроорганизмов. Биоразнообразие водных объектов играет ключевую роль в поддержании здоровой и стабильной экосистемы, выполняя такие функции, как фильтрация воды, регуляция климата и поддержание баланса питательных веществ. Наличие в воде вредных веществ или микроорганизмов, которые могут представлять опасность для здоровья людей или экосистемы, необходимо также отобразить в описании.

Экосистемные услуги, которые люди получают от водных объектов, такие как питьевая вода, рыболовство, рекреационная деятельность

и т. д., являются еще одним отличительным показателем водного объекта и могут быть представлены на карте [16]. Однако при работе в ArcGIS Online для ввода информации об объекте в текстовое диалоговое окно нам необходима база данных в программе Microsoft Word. Поэтому для каждого объекта создается отдельный файл и таким образом формируется база данных, которая имеет следующую структуру: название объекта, его географическое расположение, описание, фото, а также дополнительно указываются источники информации.

ArcGIS Online – это облачное программное обеспечение для веб-картографии и геопространственного анализа, которое предоставляется как сервис SaaS (Software as a Service – это разновидность облачных вычислений, основанная на модели обслуживания, где пользователям предоставляется готовое прикладное программное обеспечение, полностью обслуживаемое провайдером. В этой модели пользователи платят за аренду программного обеспечения, а не за его покупку, и получают доступ к функциям через мобильное приложение или веб-браузер. Главное преимущество SaaS для пользователей заключается в отсутствии затрат на установку, обновление и поддержку работоспособности оборудования и программного обеспечения.).

Данный онлайн-сервис является полноценной облачной геоинформационной системой, в которой можно хранить и публиковать свои пространственные данные, карты, приложения и сервисы, а также обмениваться и управлять ими. Более того, ArcGIS Online уже содержит готовые базовые карты, данные и пакеты сервисов, а также полезные инструменты, которые могут сразу использоваться в работе.

Таким образом, можно загружать в «облако» свои данные (шейп-файлы, табличные базы данных, пакеты карт и слоев, веб-карты), а также давать ссылки на готовые веб-карты, сервисы, приложения. Доступ к данным, хранящимся на ArcGIS Online, осуществляется через Интернет из любого продукта ArcGIS или с помощью веб-браузера, что позволяет пользователям работать с географической информацией в режиме реального времени, независимо от их местоположения. Даже работая в обычном веб-браузере, с помощью простых операций можно быстро создавать веб-карты и приложения без установки на компьютер специализированного программного обеспечения. ArcGIS Online позволяет настраивать права доступа для различных групп пользователей [4].

Портал дает широкие возможности по использованию опубликованного контента: его можно загружать для дальнейшей обработки специализированным программным обеспечением, можно создавать презентации, интегрировать контент в личный блог, веб-сайт или социальные сети, разрабатывать веб-приложения.

ArcGIS Online является открытой платформой, полностью построенной на мировых отраслевых стандартах и поддерживающей различные типы данных и сервисов: WMS, KML, GPX, CSV, SHP и др. ArcGIS Online интегрируется с другими продуктами и сервисами Esri, такими

как ArcGIS Pro и ArcGIS Enterprise, что позволяет пользователям создавать комплексные решения с использованием различных инструментов. Функциональность взаимодействия с ArcGIS Online встроена во все продукты линейки ArcGIS 10.1. и выше [12–15, 20].

Рассмотрим алгоритм создания интерактивной карты водных объектов Беларуси в геоинформационной системе ArcGIS Online Map Viewer Classic на примере озера Белое (Березовский район, Брестская область).

1. Для работы в программе необходимо пройти авторизацию. На сайте <https://www.arcgis.com/index.html> выполняем вход в учетную запись. Для этого вводим «Имя пользователя» и «Пароль», если учетная запись отсутствует, то необходимо нажать на «Создание учетной записи» (рисунок 2) и продолжить регистрацию согласно приведенной инструкции.

Рисунок 2 – Вход в учетную запись ArcGIS Online

2. При успешной авторизации автоматически попадаем на главную страницу личного кабинета (рисунок 3).

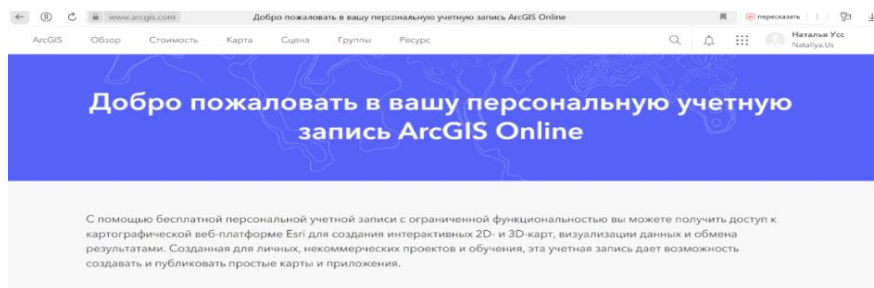


Рисунок 3 – Главная страница личного кабинета в ArcGIS Online

3. Для создания интерактивной карты переходим на панели навигации во вкладку «Карта» и нажимаем команды «Новая карта – Создать новую карту» (рисунок 4).

4. Для создания удобной интерактивной карты необходимо выбрать базовую карту (нередатируемый слой, используемый в качестве подложки и предоставляющий справочную информацию

на карте). Базовая карта обеспечивает визуальную основу для остальных слоев, чтобы пользователю было проще ориентироваться на карте и упрощают процесс создания и редактирования данных. В ArcGIS Online предложено 26 вариантов базовых карт. Наиболее подходящей для нашей работы является OpenStreetMap, так как на ней детально изображены реки и водоемы. Ее и загружаем (рисунок 5).

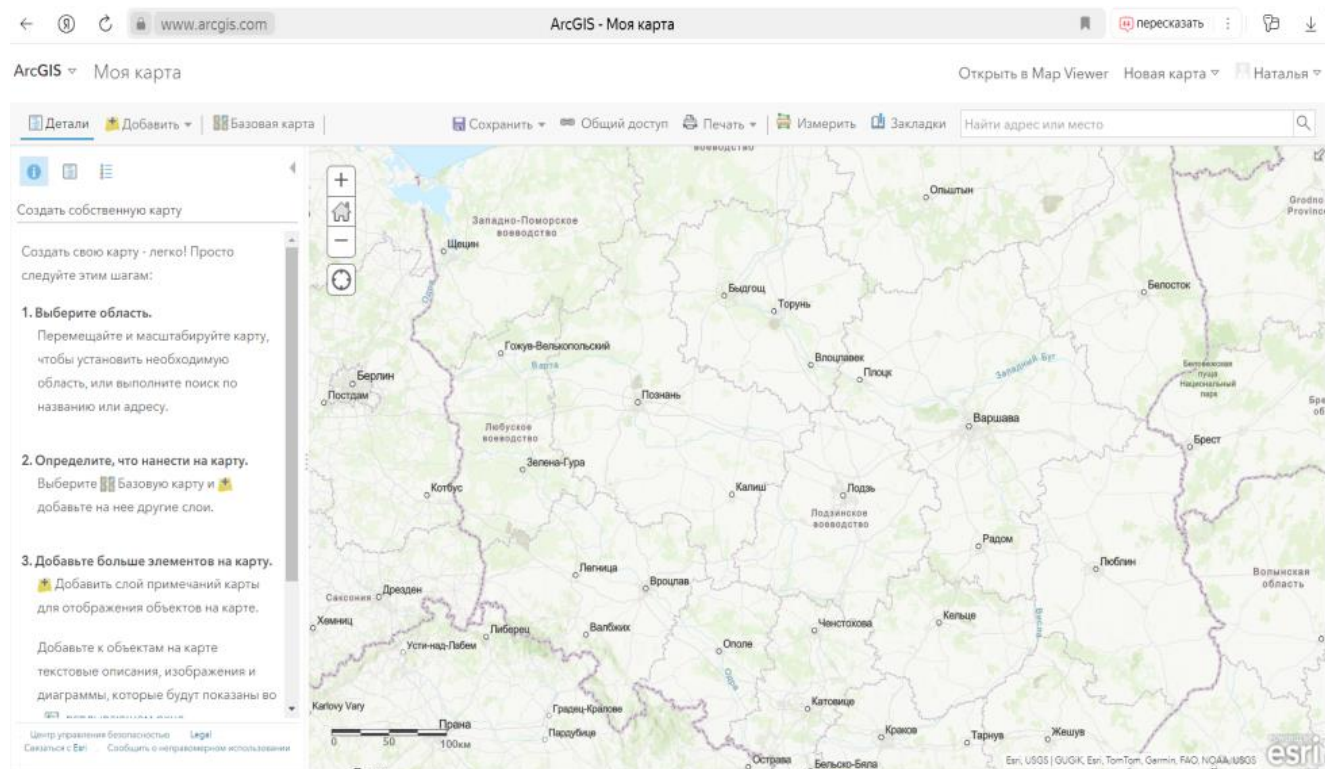


Рисунок 4 – Создание новой карты

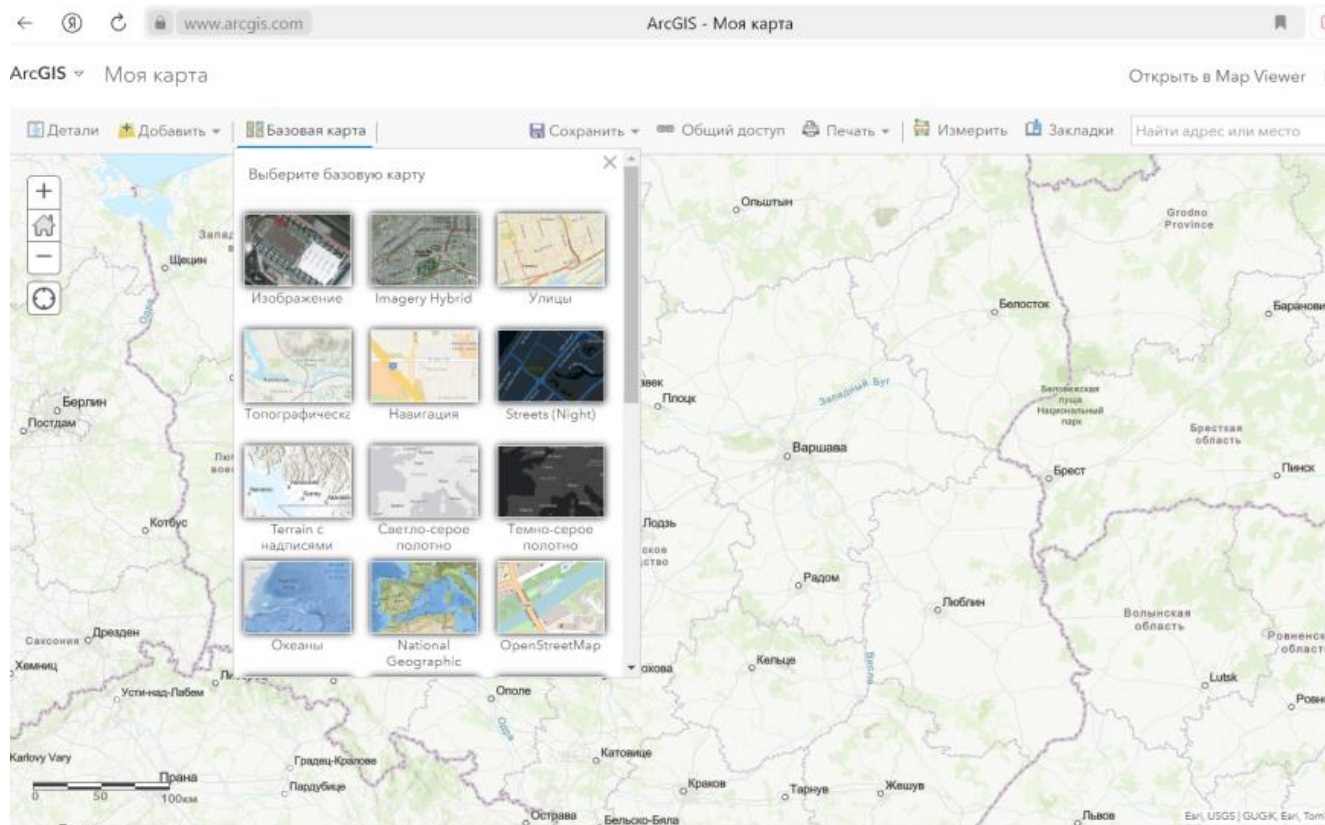


Рисунок 5 – Выбор базовой карты OpenStreetMap

5. Добавляем слой примечаний для отображения объектов на карте. Нажимаем вкладку «Добавить» и, так как мы не импортируем существующий файл с данными, то далее нажимаем

кнопку «Добавить слой примечаний карты», задаем «Имя слоя» и нажимаем на кнопку «Создание» (рисунок 6).

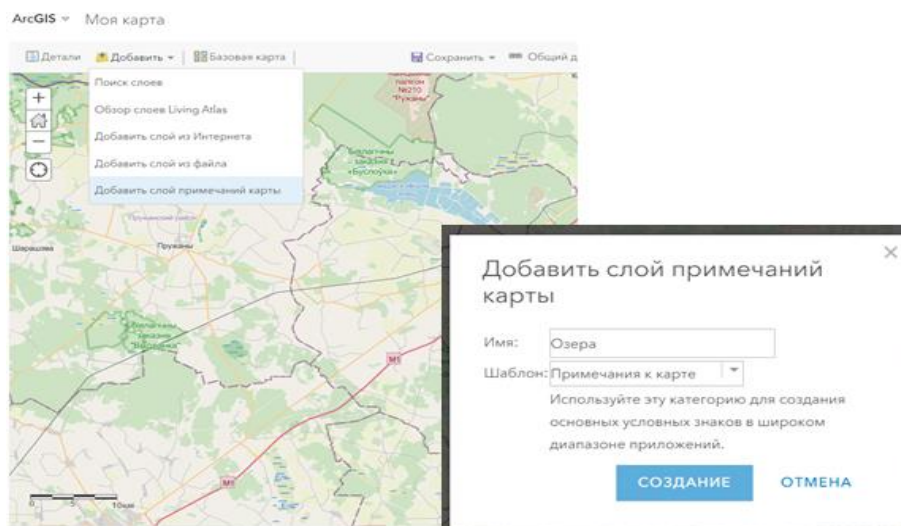


Рисунок 6 – Создание слоя карты

6. На боковой панели «Добавить объекты» во вкладке «Areas» (область) нажимаем на кнопку «Freehand Area» (область от руки) и максимально приближено к контуру обводим наш

объект (рисунок 7), создавая при этом его полигон. При нажатии на объект по контуру фигуры появляются точки, двигая которые можно редактировать зону обводки (рисунок 8).

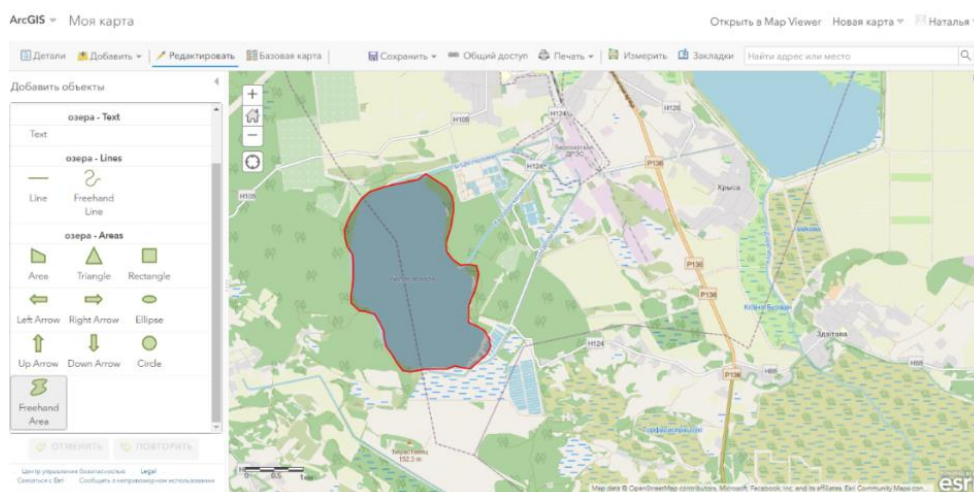


Рисунок 7 – Создание объекта

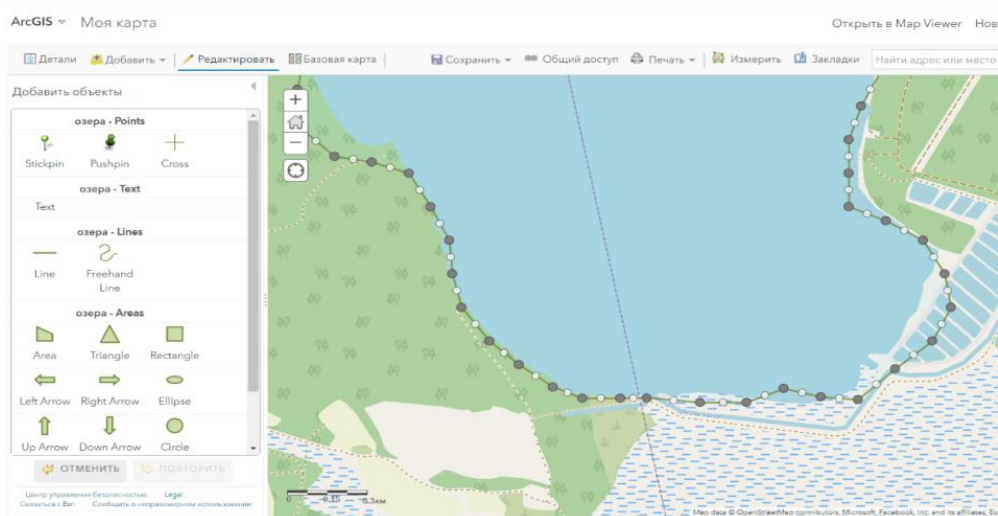


Рисунок 8 – Редактирование зоны обводки объекта

7. При нажатии на выделенный объект открывается тестовое диалоговое окно (рисунок 9), в котором необходимо разместить информацию об объекте: задаем название, размещаем описание и указываем полезные ссылки на фото- и видеоматериалы, связанные

с изучаемым водным объектом. При нажатии на кнопку «Изменить символ» меняем отображение объекта на карте: цвет, прозрачность и ширину линии заливки и контура (рисунок 10).

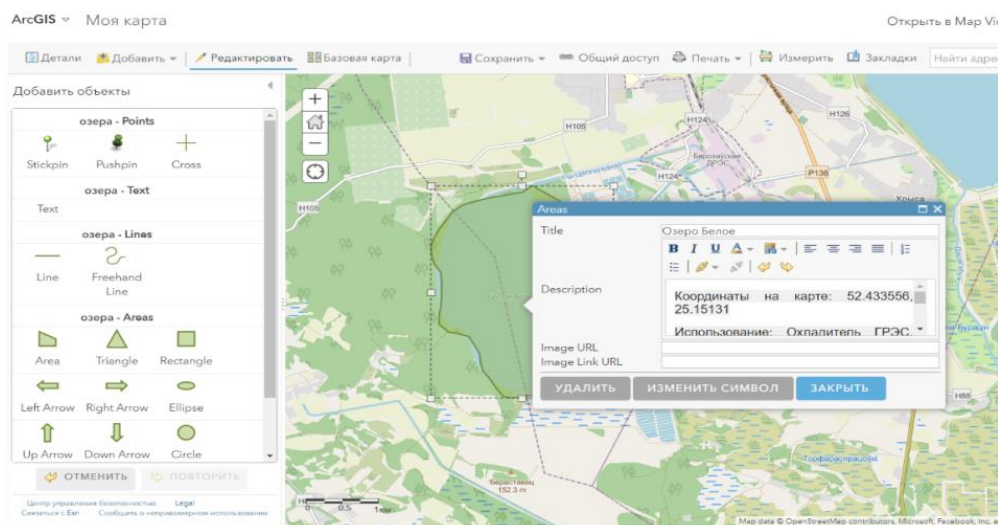


Рисунок 9 – Диалоговое окно для ввода текстовой информации

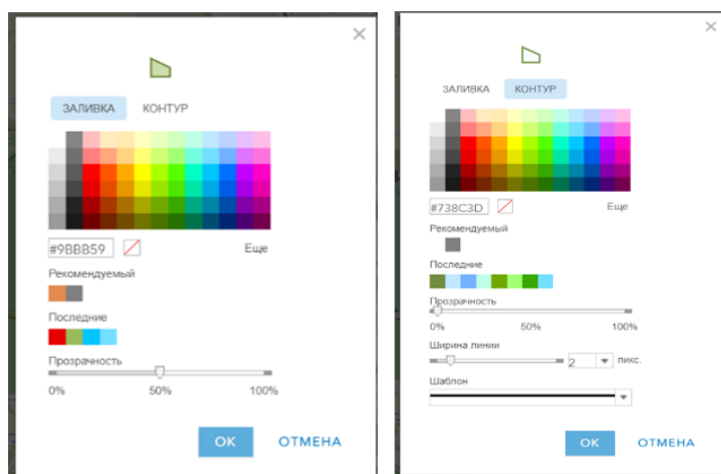


Рисунок 10 – Редактирование заливки и контура объекта на карте

8. После ввода и необходимых корректировок всех данных сохраняем созданную карту: нажимаем кнопку «Сохранить»

рисунок 11), задаем название карты, теги, описание и папку, в которой будет сохранена карта и нажимаем кнопку «Сохранить карту».

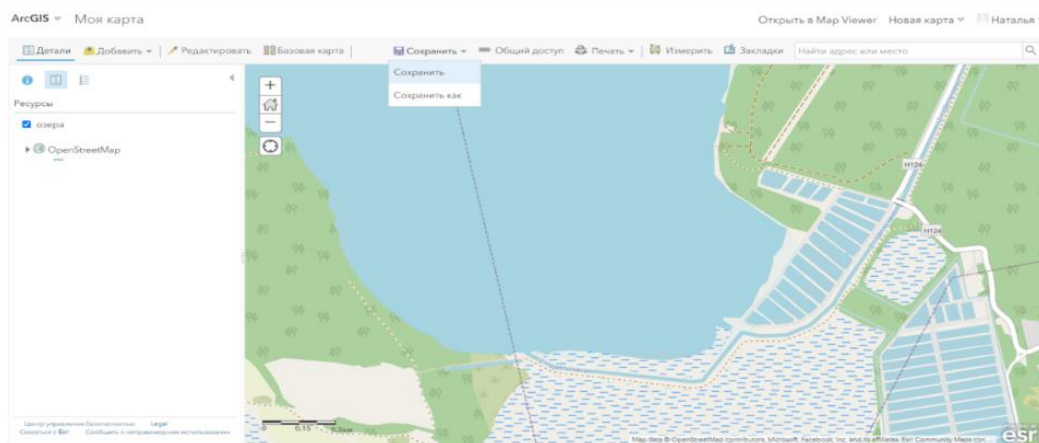


Рисунок 11 – Сохранение карты

Таким образом, всплывающее информационное окно при нажатии на любую область в пределах границ созданного объекта, при условии правильного и последовательного ввода текстовой информации в соответствии с алгоритмом, будет иметь следующий вид (рисунок 12): название, описание и фотография (при нажатии

на фотографию доступны полезные ссылки на интернет-ресурсы, связанные с изучаемым водным объектом).

Преимуществом работы в ArcGIS Online является возможность настроить общий доступ для других пользователей, а также возможность поделиться ссылкой на созданную карту.

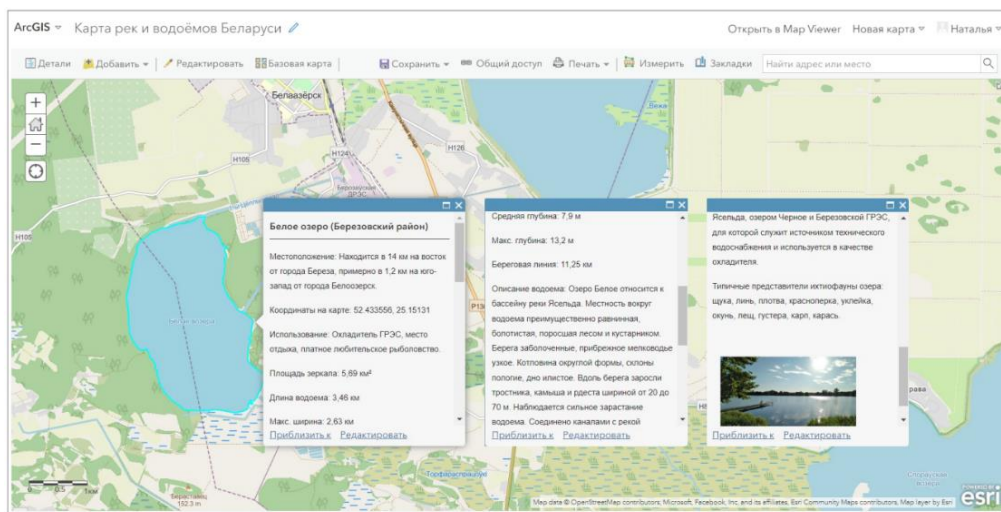


Рисунок 12 – Пример описания объекта на разработанной интерактивной карте в ArcGIS Online

Визуализация объекта при создании интерактивной карты рек и водоемов Беларуси в ArcGIS Online, осуществляется посредством прикрепления к описанию фотоснимков. В ArcGIS Online в графе Image URL диалогового окна указывается путь, по которому расположена фотография объекта в Интернете (рисунок 13). Добавление фотографии обязательно. В графе Image Link URL указывается путь, по которому расположена 3D-панорама или видео объекта в Интернете. Данное видео или 3D-панорама открывается на интерактивной карте при нажатии на фотографию объекта, которая находится после его описания.

Для хранения и систематизации фотографий и видеоматериала водных объектов, облегчения доступа к ним и обеспечения их безопасности, создана собственная база фото- и видеоматериала в виде закрытого сообщества «Водные объекты Беларуси» в социальной сети VK (рисунок 14). Ссылка на сообщество: <https://vk.com/club225746624>.

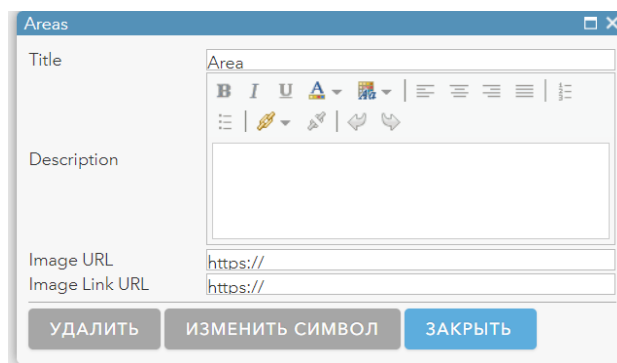


Рисунок 13 – Диалоговое окно в ArcGIS Online для ввода текстовой информации об объекте

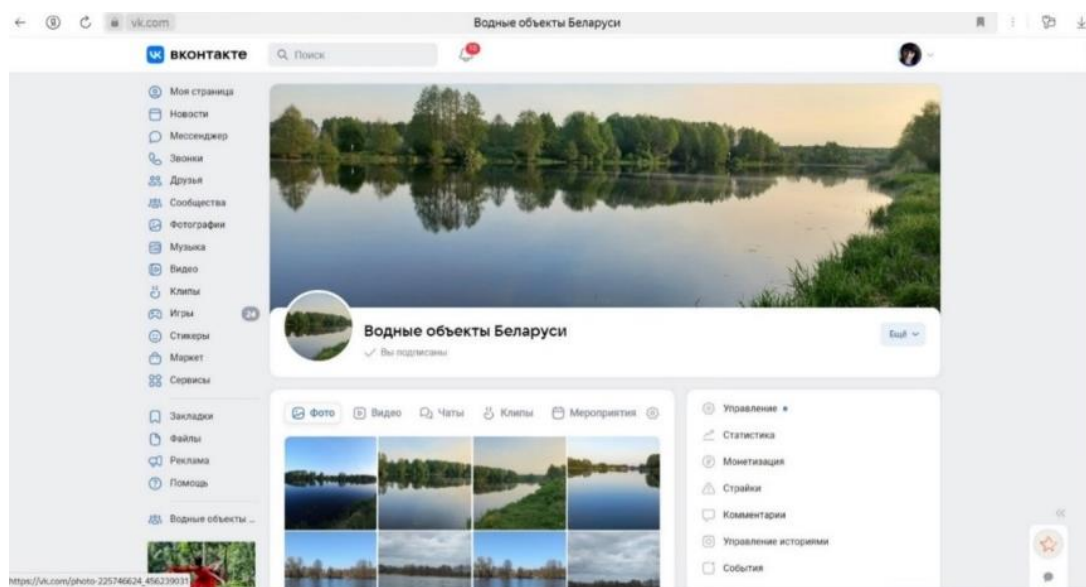


Рисунок 14 – Страница сообщества «Водные объекты Беларуси» в социальной сети VK

Материалы разделены на две категории: фото и видео. В каждой категории создаются отдельные альбомы по каждому географическому объекту с указанием его названия, местоположения. На данный момент все фотографии, 3D-панорамы и видеозаписи были сделаны нами самостоятельно, но они могут быть получены и от других пользователей и организаций, с обязательным указанием авторов материала.

База может применяться для личного пользования, образовательных целей, презентаций, а также для публикации в социальных сетях и на веб-сайте. В дальнейшем база будет регулярно обновляться новыми актуальными материалами по водным объектам и улучшаться с помощью современных технологий и программного обеспечения.

Практическое применение полученных результатов

Результаты, полученные в ходе выполнения научной работы, могут стать основой для создания компьютерного программного обеспечения, мобильного приложения или веб-сайта, представляющих собой интерактивную карту водных объектов Республики Беларусь с подробной информацией об объектах.

Основными направлениями, где возможно применение интерактивной карты водных объектов Беларуси, являются следующие.

1. Изучение географии, гидрологии и экологии страны. Карта предоставляет информацию о расположении различных водных объектов, таких как реки, озера, водохранилища и др., а также об их основных характеристиках. Это позволяет исследовать режимы рек и озер, а также отслеживать состояние водных ресурсов.

2. Разработка инфраструктуры и градостроительства. Возможно применение карты при планировании строительства мостов, плотин и других объектов, связанных с водой, а также для выбора подходящих мест для размещения промышленных предприятий, жилых комплексов и инфраструктуры, учитывая близость к рекам и водоемам.

3. Планирование путешествий и отдыха. Применение карты возможно для разработки туристических маршрутов путешествий по воде.

4. Образование и научные исследования. Интерактивная карта рек и водоемов Беларуси может быть использована для изучения и преподавания географии, гидрологии и экологии в учебных заведениях, а также проведения научных исследований в этих областях.

5. Рыболовство и рыбководство. Карта помогает определить лучшие места для рыболовства, разведения рыбы и других видов аквакультуры.

6. Сельское хозяйство. Возможно применение интерактивной карты для определения оптимальных зон выращивания определенных видов растений.

7. Энергетика. Карта может применяться для изучения возможностей использования водных ресурсов рек и водоемов в производстве электроэнергии, а также для разработки стратегий по снижению негативного воздействия гидроэлектростанций на окружающую среду.

Заключение

1. При выборе специализированного программного обеспечения для создания интерактивной геоинформационной карты водных объектов Беларуси учитывался ряд необходимых функций и параметров ПО. Среди специализированных ГИС наиболее подходящей для выполнения поставленной задачи по своим характеристикам и функциональным возможностям является геоинформационная система ArcGIS.

2. На основе программы Microsoft Excel создана авторская база данных водных объектов Республики Беларусь, включающая 2 280 объекта, а также графическую и текстовую информацию о них (работа по расширению базы данных продолжается). Для ввода информации об объекте в текстовое диалоговое окно ArcGIS Online также создается база данных в программе Microsoft Word.

3. Разработана методика создания интерактивной карты водных объектов Беларуси с помощью геоинформационной системы ArcGIS на основе облачной геоинформационной системы ArcGIS Online Map Viewer Classic.

4. Рассмотрена визуализация географической информации. Оптимальным вариантом визуализации водного объекта на интерак-

тивной карте является прикрепление к его описанию фотоснимков, 3D-панорам и видеоматериалов.

5. Создана собственная база фото- и видеоматериалов рек и водоемов Беларуси, которая размещена в закрытом сообществе «Водные объекты Беларуси» в социальной сети VK (<https://vk.com/club225746624>).

Список цитированных источников

- Надыров, И. О. Описание концепции интерактивной карты / И. О. Надыров // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. – 2011. – № 1 (14). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opisanie-kontseptsii-interaktivnoy-karty-1> (дата обращения: 06.05.2026).
- Касьянова, Е. Л. Интерактивные карты – современный метод представления информации / Е. Л. Касьянова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2008. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/interaktivnye-karty-sovremennyy-metod-predstavleniya-informatsii> (дата обращения: 15.05.2026).
- Вагизов, М. Р. Разработка интерактивного картографического сервиса для определения лесотаксационных показателей насаждений программно-техническим методом : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.35 / Вагизов Марсель Равильевич ; Российский гос. гидрометеорологич. ун-т. – СПб., 2016. – 145 л.
- Николаева, О. Г. Геоинформационные системы (ГИС) : учебно-методическое пособие / О. Г. Николаева. – Иркутск : ИГУ, 2011. – 127 с.
- Ципилева, Т. А. Геоинформационные системы : учебное пособие / Т. А. Ципилева. – Томск : Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2004. – 162 с.
- Ананьев, Ю. С. Геоинформационные системы : учебное пособие / Ю. С. Ананьев. – Томск : ТПУ, 2003. – 70 с.
- Дубровский, А. В. Геоинформационные системы: автоматизированное картографирование : учебно-методическое пособие / А. В. Дубровский, О. И. Малыгина. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 94 с.
- Гурьянова, Л. В. Введение в ГИС : учебное пособие / Л. В. Гурьянова. – Минск : БГУ, 2008. – 135 с.
- Середович, В. А. Геоинформационные системы (назначение, функции, классификация) : монография / В. А. Середович, В. Н. Ключниченко, Н. В. Тимофеева. – Новосибирск : СГГА, 2008. – 192 с.
- Красовская, И. А. ГИС-технологии : курс лекций / И. А. Красовская, Д. М. Курлович, А. Н. Галкин. – Витебск, 2015. – 52 с.
- Вагизов, М. Р. Web-Картография : учебное пособие / М. Р. Вагизов. – СПб. : Своё издательство, 2020. – 73 с.
- Быков, А. В. Web-картографирование : учебное пособие / А. В. Быков, С. В. Пьянков. – Пермь, 2015. – 110 с.
- Гурьянова, Л. В. Аппаратно-программные средства ГИС : курс лекций / Л. В. Гурьянова. – Минск : БГУ, 2003. – 140 с.
- Неретин, А. А. Геоинформационные системы в транспортном строительстве : учебное пособие / А. А. Неретин, И. И. Позняк. – М. : МАДИ, 2021. – 132 с.
- Калугин, Д. Н. Геоинформационные системы в картографо-геодезическом производстве : дис. ... магистра техн. наук : 1-51-80-01 / Калугин Дмитрий Николаевич ; УО «Полоцкий государственный университет». – Новополоцк, 2020. – 106 л.
- Волчек, А. А. Интерактивное картографирование водных объектов Беларуси / А. А. Волчек, Н. В. Усс // Тенденции и проблемы развития наук о Земле в современном мире : сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 25 апреля 2024 года : в 2 ч. / Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины ; редкол.: А. П. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2024. – Вып. 2, Ч. 2. – С. 9–12.
- Лисицкая, А. А. Геоинформационная система: интерактивная карта рек и озер Беларуси / А. А. Лисицкая, Е. В. Горбачук // Сборник конкурсных научных работ студентов и магистрантов : в 2 ч. / редкол.: Н. Н. Шалобита (гл. ред.) [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2022. – Ч. 1. – С. 144–148.

18. Волчек, А. А. К вопросу разработки интерактивной карты водных объектов Беларуси / А. А. Волчек, Н. В. Усс // Новые горизонты географической науки : 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. / редкол.: Е. Г. Кольмакова (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2024. – Ч. 1. – С. 81–85.
 19. Интерактивная карта рек и озёр Республики Беларусь / О. А. Акулова, И. Н. Розумец, А. А. Лисицкая, Е. В. Горбачук // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания. ICEP 2022 : сборник трудов V Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию кафедры природообустройства, Брест, 26–28 октября 2022 г. : в 2 ч. / редкол.: А. А. Волчек [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2022. – Ч. 2. – С. 245–251.
 20. Усс, Н. В. Интерактивная карта водных объектов Беларуси на базе облачной ГИС: ArcGIS Online / Н. В. Усс // Инженерно-экологические аспекты и перспективы развития систем водоснабжения и водоотведения : сб. науч. статей Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 28 марта 2024 г. / редкол.: А. А. Волчек [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2024. – С. 207–209.
- References**
1. Nadyrov, I. O. Opisanie koncepcii interaktivnoy karty / I. O. Nadyrov // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii. – 2011. – № 1 (14). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opisanie-kontseptsii-interaktivnoy-karty-1> (data obrashcheniya: 06.05.2026).
 2. Kas'yanova, E. L. Interaktivnye karty – sovremennyy metod predstavleniya informatsii / E. L. Kas'yanova // Interesko Geo-Sibir'. – 2008. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/interaktivnye-karty-sovremennyy-metod-predstavleniya-informatsii> (data obrashcheniya: 15.05.2026).
 3. Vagizov, M. R. Razrabotka interaktivnogo kartograficheskogo servisa dlya opredeleniya lesotaksatsionnykh pokazatelej nasazhdenij programmno tekhnicheskimi metodami : dis. ... kand. tekhn. nauk : 25.00.35 / Vagizov Marsel' Ravil'evich ; Rossijskij gos. gidrometeorologich. un-t. – SPb., 2016. – 145 l.
 4. Nikolaeva, O. G. Geoinformacionnye sistemy (GIS) : uchebno-metodicheskoe posobie / O. G. Nikolaeva. – Irkutsk : IGU, 2011. – 127 s.
 5. Cipileva, T. A. Geoinformacionnye sistemy : uchebnoe posobie / T. A. Cipileva. – Tomsk : Tomskij mezhvuzovskij centr distancionnogo obrazovaniya, 2004. – 162 s.
 6. Anan'ev, YU. S. Geoinformacionnye sistemy : uchebnoe posobie / YU. S. Anan'ev. – Tomsk : TPU, 2003. – 70 s.
 7. Dubrovskij, A. V. Geoinformacionnye sistemy: avtomatizirovannoe kartografirovanie : uchebno-metodicheskoe posobie / A. V. Dubrovskij, O. I. Malygina. – Novosibirsk : SGUGIT, 2016. – 94 s.
 8. Gur'yanova, L. V. Vvedenie v GIS : uchebnoe posobie / L. V. Gur'yanova. – Minsk : BGU, 2008. – 135 s.
 9. Seredovich, V. A. Geoinformacionnye sistemy (naznachenie, funkcii, klassifikatsiya) : monografiya / V. A. Seredovich, V. N. Klyushnichenko, N. V. Timofeeva. – Novosibirsk : SGGA, 2008. – 192 s.
 10. Krasovskaya, I. A. GIS tekhnologii : kurs lekcij / I. A. Krasovskaya, D. M. Kurlovich, A. N. Galkin. – Vitebsk, 2015. – 52 s.
 11. Vagizov, M. R. Web Kartografiya : uchebnoe posobie / M. R. Vagizov. – SPb. : Svoyo izdatel'stvo, 2020. – 73 s.
 12. Bykov, A. V. Web kartografirovanie : uchebnoe posobie / A. V. Bykov, S. V. P'yankov. – Perm', 2015. – 110 s.
 13. Gur'yanova, L. V. Apparatno-programmnye sredstva GIS : kurs lekcij / L. V. Gur'yanova. – Minsk : BGU, 2003. – 140 s.
 14. Neretin, A. A. Geoinformacionnye sistemy v transportnom stroitel'stve : uchebnoe posobie / A. A. Neretin, I. I. Poznyak. – M. : MADI, 2021. – 132 s.
 15. Kalugin, D. N. Geoinformacionnye sistemy v kartografo geodezicheskom proizvodstve : dis. ... magistra tekhn. nauk : 1518001 / Kalugin Dmitrij Nikolaevich ; UO «Polockij gosudarstvennyj universitet». – Novopolock, 2020. – 106 l.
 16. Volchek, A. A. Interaktivnoe kartografirovanie vodnykh ob'ektov Belarusi / A. A. Volchek, N. V. Uss // Tendencii i problemy razvitiya nauk o Zemle v sovremennom mire : sb. materialov II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Gomel', 25 aprelya 2024 goda : v 2 ch. / Gomel'skij gosudarstvennyj universitet im. F. Skoriny ; redkol.: A. P. Gusev (gl. red.) [i dr.]. – Gomel' : GGU im. F. Skoriny, 2024. – Vyp. 2, CH. 2. – S. 9–12.
 17. Lisickaya, A. A. Geoinformacionnaya sistema: interaktivnaya karta rek i ozyor Belarusi / A. A. Lisickaya, E. V. Gorbachuk // Sbornik konkursnykh nauchnykh rabot studentov i magistrantov : v 2 ch. / redkol.: N. N. SHalobyta (gl. red.) [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2022. – CH. 1. – S. 144–148.
 18. Volchek, A. A. K voprosu razrabotki interaktivnoy karty vodnykh ob'ektov Belarusi / A. A. Volchek, N. V. Uss // Novye gorizonty geograficheskoy nauki : 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. / redkol.: E. G. Kol'makova (gl. red.) [i dr.]. – Minsk : BGU, 2024. – CH. 1. – S. 81–85.
 19. Interaktivnaya karta rek i ozyor Respubliki Belarus' / O. A. Akulova, I. N. Rozumec, A. A. Lisickaya, E. V. Gorbachuk // Aktual'nye nauchno tekhnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya. ICEP 2022 : sbornik trudov V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 50 letiyu kafedry prirodobustroystva, Brest, 26–28 oktyabrya 2022 g. : v 2 ch. / redkol.: A. A. Volchek [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2022. – CH. 2. – S. 245–251.
 20. Uss, N. V. Interaktivnaya karta vodnykh ob'ektov Belarusi na baze oblachnoy GIS: ArcGIS Online / N. V. Uss // Inzhenerno ekologicheskie aspekty i perspektivy razvitiya sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya : sb. nauch. statej Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 28 marta 2024 g. / redkol.: A. A. Volchek [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2024. – S. 207–209.

Материал поступил 19.05.2026, одобрен 14.06.2026, принят к публикации 15.06.2026

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ПО СНИЖЕНИЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Г. И. Морзак¹, К. А. Сырникова², А. Н. Людчик³

¹ К. т. н., доцент кафедры инженерной экологии, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: gmorzak@bntu.by

² Аспирант кафедры инженерной экологии, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: ecology@bntu.by

³ Магистрант кафедры инженерной экологии, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: ecology@bntu.by

Реферат

Все виды хозяйственно-экономической деятельности, включая промышленное производство сопровождаются воздействиями на компоненты окружающей среды. В значительном объеме в атмосферу попадают различные загрязняющие вещества от производственной деятельности населения, которые влияют как на качество, так и на свойства воздуха. Приоритетное значение для природоохранной деятельности предприятий по минимизации воздействий на окружающую среду имеет совершенствование применяемых производственных природоохранных технологий.

Экологизация производственной сферы базируется на последовательном внедрении технических, технологических, организационных мероприятий, которые повышают эффективность потребления и использования природных ресурсов, снижая при этом загрязнение природной среды выбросами, стоками, отходами.

В статье приведены основные методики количественного и качественного определения загрязняющих веществ гальванического производства. Рассмотрено техническое решение по минимизации воздействия на компоненты окружающей среды для предприятий, применяющих технологии нанесения гальванического покрытия. Для минимизации выбросов Cr (VI) на участке нанесения гальванического покрытия предусмотрено укрытие зеркала ванн хромирования полыми химически стойкими полимерными шариками. Такое инженерное решение позволит снизить до 75 % теплоотдачу и уменьшить до 90 % испарения с поверхности жидкой среды.

В статье приведен сравнительный анализ альтернативных мероприятий по сокращению выбросов хрома (VI) на гальваническом участке. Наилучший результат достигается при комбинировании нескольких мероприятий. Такая многоступенчатая стратегия позволит достичь нормативного сокращения выбросов Cr (VI). Показано, что модернизация системы улавливания выбросов загрязняющих веществ от растворов гальванических ванн позволит снизить воздействия от производственной деятельности на атмосферный воздух, при этом будет способствовать улучшению процесса хромирования.

Ключевые слова: выбросы загрязняющих веществ, гальваническое производство, природоохранная деятельность, модернизация систем очистки.

DIRECTION FOR REDUCING THE IMPACT OF GALVANIC PRODUCTION ON ATMOSPHERIC AIR

G. I. Morzak, K. A. Syrnikova, A. N. Lyudchik

Abstract

All types of economic and business activities, including industrial production, have an impact on the environment. Various pollutants from the population's production activities enter the atmosphere, affecting both the quality and properties of the air. Improving the environmental protection technologies used in production is crucial for minimizing environmental impacts.

The environmentalization of the production sector is based on the consistent implementation of technical, technological, and organizational measures that increase the efficiency of consumption and use of natural resources, while reducing the pollution of the natural environment through emissions, runoff, and waste.

The article provides the main methods for quantifying and qualitatively determining the pollutants in the electroplating industry. It also discusses a technical solution for minimizing the impact on environmental components for enterprises that use electroplating technologies. To minimize Cr (VI) emissions in the galvanizing process, the chrome baths are covered with hollow, chemically resistant polymer balls. This engineering solution reduces heat transfer by up to 75 % and evaporation from the liquid medium by up to 90 %.

The article provides a comparative analysis of alternative measures to reduce chromium (VI) emissions at the galvanizing site. The best results are achieved by combining several measures. This multi-step strategy will allow for a regulatory reduction in Cr (VI) emissions. It is shown that upgrading the system for capturing pollutants from galvanizing bath solutions will reduce the impact of production activities on atmospheric air, while also improving the chromium plating process.

Keywords: pollutant emissions, electroplating production, environmental protection, modernization of purification systems.

Введение

В Республике Беларусь ведется учет выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) от стационарных и мобильных источников выбросов. Выбросы ЗВ от стационарных источников выбросов учитываются на основе отчетов, представляемых в территориальные структуры Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды по установленной форме отчетности [1–3]. Эти отчеты составляются на основании данных проектов нормативов допустимых выбросов

ЗВ в атмосферный воздух, разрешений, актов инвентаризации выбросов ЗВ в атмосферный воздух, учета в области охраны атмосферного воздуха.

Одним из основных направлений государственной политики является экологизация экономики. Для снижения нагрузки на компоненты окружающей среды предусмотрено требование для субъектов природопользования об получения комплексного природоохранного разрешения, а также внедрения наилучших доступных технических

методов [4, 5]. Это достигается путем модернизации используемых природоохранных технологий, внедрения инновационных технологий эффективного использования природных ресурсов.

Мероприятия по охране атмосферного воздуха включают комплекс правовых, организационных, экономических и технических мер и действий, направленных на предотвращение и снижение его загрязнения. Они направлены на нормирование и мониторинг состояния компонентов окружающей среды, нормативное регулирование воздействия, технические и организационные решения для минимизации воздействия.

Для снижения антропогенной нагрузки на атмосферный воздух предприятиям рекомендуется [6–8]:

- создание, поддержание и сохранение структуры озеленения территории производственной застройки, озеленение санитарно-защитных зон источников выбросов ЗВ в атмосферный воздух;
- проведение исследований по улучшению качества атмосферного воздуха с учетом фактических условий в местах повышенного воздействия на окружающую среду;
- замена устаревшего оборудования на более экологичное;
- внедрение новых и модернизация действующих систем очистки отходящих газов;
- контроль соблюдения проектной эффективности работы газоочистных установок.

Благодаря соблюдению предприятиями экологических норм и требований на территории Беларуси наблюдается тенденция к сокращению валовых выбросов ЗВ в атмосферный воздух от стационарных и мобильных источников выбросов [9–11].

Экологические проблемы всегда относятся к наиболее актуальным, особенно проблемы экологии производства, потребление природных ресурсов.

Совершенствование экологизации производственной сферы

В современном мире существует множество путей решения экологических проблем, связанных с производством. Для улучшения экологической обстановки в регионах экономическая деятельность должна базироваться на экологизации производственной сферы. Некоторые пути экологизации приведены на рисунке 1.

Основные показатели, определяющие уровень экологизации природопользования, представлена на рисунке 2.

Внедрение инновационных технологий является неотъемлемой частью совершенствования экологизации производственной сферы, способствует улучшению экологической ситуации за счет минимизации выбросов, сбросов, отходов, так и вторичного их использования.

Реализация способов снижения нагрузки на окружающую среду от производственной деятельности предусматривает разработку и внедрение мероприятий (рисунок 3).

Снижение выброса ЗВ в атмосферу является обязательным условием для каждого предприятия. Законодательство Республики Беларусь в области охраны окружающей среды регламентируют показатели ПДВ и ПДК для каждого вредного вещества или химического соединения, которые предприятие обязано соблюдать. Для каждого промышленного предприятия комплекс мер по снижению выбросов ЗВ в атмосферу подбирается индивидуально, в зависимости от следующих факторов:

- вид и особенности технологического процесса;
- концентрация, физические и химические свойства вредных веществ в выбросах;
- технические характеристики применяемого природоохранного оборудования;
- финансовые возможности предприятия.



Рисунок 1 – Направления совершенствования экологизации производственной сферы

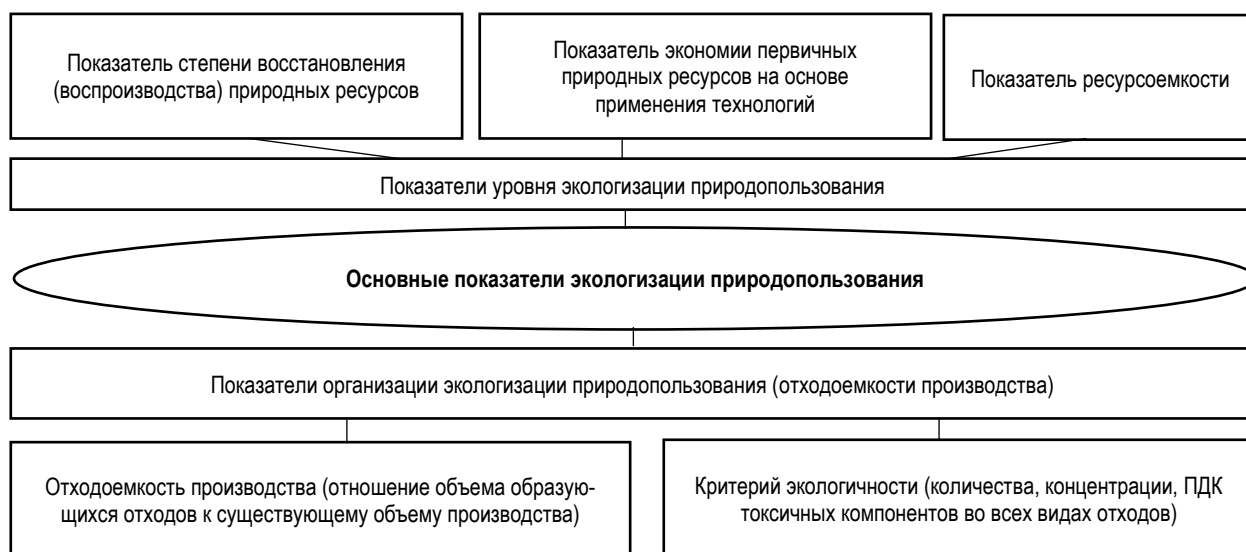


Рисунок 2 – Основные показатели экологизации природопользования

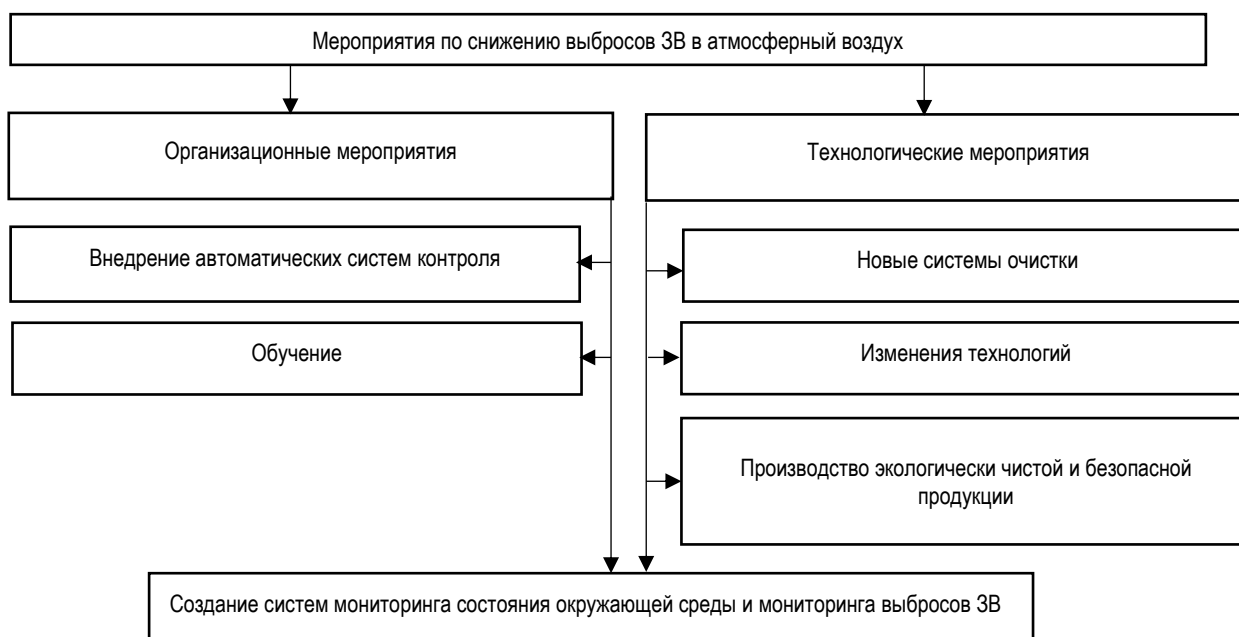


Рисунок 3 – Основные мероприятия по снижению воздействий производственной деятельности предприятий

Основные методики определения объема и состава выбросов ЗВ от гальванического производства

Гальваническое производство позволяет наносить на металлические и неметаллические детали различные защитные, защитно-декоративные и функциональные покрытия:

- цинкование (с радужной, бесцветной и черной пассивацией);
- никелирование (полублестящее и матовое);
- электрополирование нержавеющей стали;
- анодирование алюминиевых сплавов с наполнением в воде, в бихромате калия, окрашиванием в красителях;
- химическое оксидирование стали и алюминиевых сплавов;
- обработка металлических поверхностей стеклянными шариками (сатинирование поверхности деталей до нанесения гальванохимических покрытий);
- нанесение лакокрасочных покрытий;
- нанесение порошковых полимерных покрытий.

Основным направлением по контролю и снижению воздействия на окружающую среду на предприятии является программа аналитического (лабораторного) контроля ЗВ в атмосферном воздухе на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ).

К основным ЗВ, подлежащих лабораторному контролю на границе СЗЗ относятся:

- 1) ЗВ, выбросы которых составляют более 15 % от валового выброса предприятия;
- 2) ЗВ и группы суммаций, расчетные максимальные концентрации которых, определенные на основании расчета их рассеивания в атмосферном воздухе (без учета фоновых концентраций ЗВ), на границе СЗЗ и/или в жилой зоне составляют 0,5 и более долей ПДК м. р./ОБУВ;
- 3) Физические факторы воздействия, подлежащие лабораторному контролю.

Характеристика основных выбросов ЗВ в атмосферный воздух от гальванического производства представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика выбросов ЗВ в атмосферный воздух от гальванического производства

Наименование производства, цеха	Источники выделения загрязняющих веществ	Загрязняющее вещество
Участок гальваники (линия никель-хром)	Ванна хромирования	Хром (VI)
Гальванический цех, участок крупногабаритной окраски	Окрасочная камера	Ацетон
Гальванический цех, участок окраски	Сушильные шкафы	Ксилол
Участок гальваники (линия никель-хром)	Ванна никель-хром	Хром (VI)
Гальванический цех, участок шпатлевки	Сушильный шкаф	Спирт бутиловый
Гальванический цех, участок анодного оксидирования	Ванна оксидирования	Натрий гидроксид
Гальванический цех, участок тампопечати	Окрасочная	Спирт бутиловый

Определение объемов выбросов ЗВ в атмосферу осуществляется в соответствии с методиками, утвержденными в Республике Беларусь. Некоторые из этих методов основываются на удельных показателях, связывающих количество выбросов с единицей сырья или продукции. Другие отличаются более сложными алгоритмами расчетов и требуют использования обширной нормативно-справочной базы. Так, для установления хрома (VI) используется методика выполнения измерений фотометрическим методом МВИ.МН 5830-2017, для гидроксида натрия методика выполнения измерений визуально-колориметрическим и фотометрическим методом МВИ.МН 5866-2017 разработанными в соответствии с требованиями ГОСТ 8.010-2013 Государственная система обеспечения единства измерений, ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002, СТБ ISO 5725-3-2025, СТБ ISO 5725-4-2022, ГОСТ Р 2.105-2019 [12].

Метод измерения концентрации гидроксида натрия основан на реакции гидроксид-иона со смешанным кислотнo-основным индикатором с последующим визуальным колориметрированием или фотометрированием окрашенного раствора. Процедура определения концентрации едких щелочей в атмосферном воздухе представлена в виде схемы на рисунке 4.

Измерение массовой концентрации хрома (VI) в атмосферном воздухе осуществляется фотометрическим методом. В его основе лежит реакция взаимодействия Cr (VI) с дифенилкарбазидом в кислой среде, приводящая к образованию красно-фиолетового окрашенного комплекса, интенсивность окраски которого измеряется. Процедура определения массовой концентрации оксидов хрома шестивалентного приведена на рисунке 5.

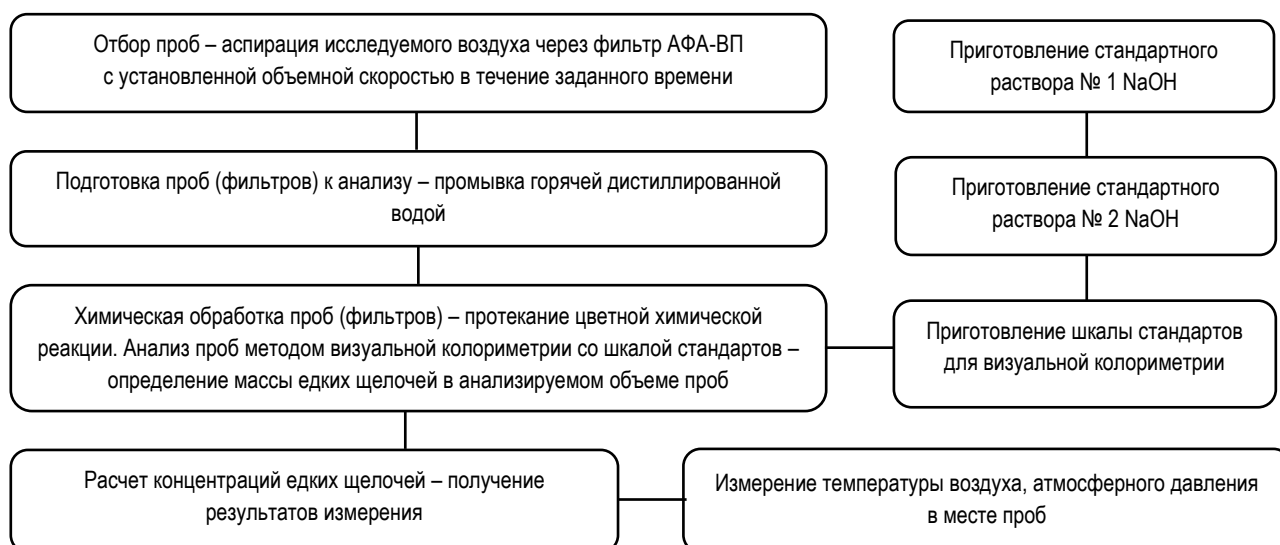


Рисунок 4 – Блок-схема определения массовой концентрации едких щелочей

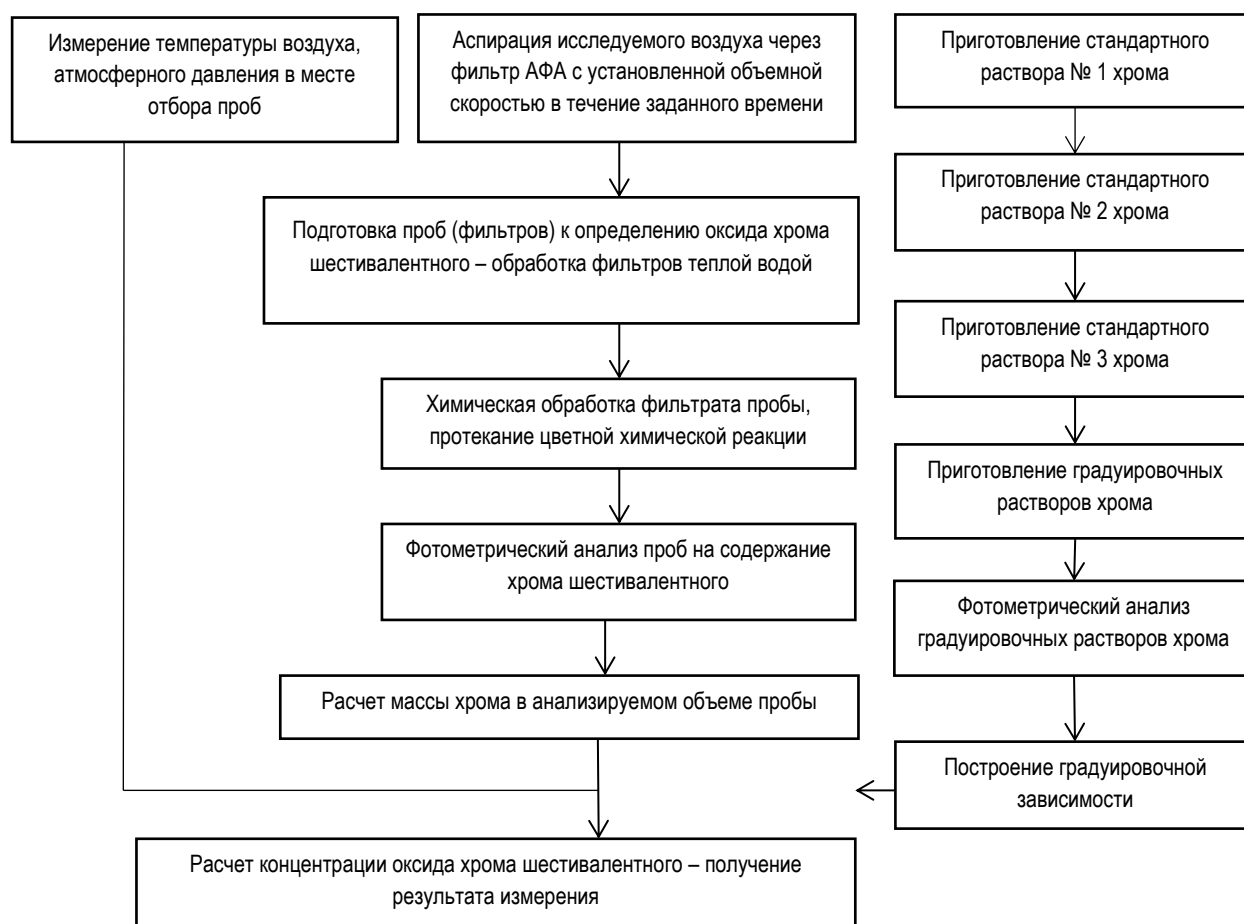


Рисунок 5 – Блок-схема определения концентрации оксида хрома (VI)

Для установления ксилола, ацетона, бутилового спирта используется метод измерения концентрации вредных веществ индикаторными трубками ГОСТ 12.1.014–84. Суть метода основана на изменении цвета индикаторного порошка при его взаимодействии с целевым вредным веществом, содержащимся в пробе воздуха, прокачиваемой через трубку. Концентрация загрязнителя определяется либо по длине окрашенного слоя, либо по интенсивности его окраски [13].

При отсутствии метрологически аттестованных методик измерений или если выполнение требований нормативных правовых актов

по отбору проб невозможно на практике, допускается определение величины выбросов загрязняющих веществ расчетным или инструментально-расчетным способом. Последний основан на использовании хотя бы одного измеренного параметра выброса.

Для определения характеристик выбросов ЗВ применяется комбинация методов:

– инструментальные методы – с помощью аналитических приборов и пробоотборного оборудования проводят прямые измерения концентрации ЗВ и параметров газопылевого потока (скорость,

расход, температура) на источнике. Эти методы являются приоритетными для организованных источников выбросов. Для некоторых объектов (относящихся к I и II категориям) с 2024 года требуется установка автоматизированных систем контроля (АСК), которые передают данные в государственную информационную систему (РИСАМОС);

– расчетные методы – используются для неорганизованных источников, при проектировании новых объектов, когда инструментальные измерения невозможны или не требуются. Расчеты выполняются по утвержденным методикам. При их отсутствии используются технологические нормативы, руководящие документы в рамках международных конвенций или утвержденных методик в других государствах;

– лабораторные методы анализа – исследование отобранных проб воздуха в аккредитованных лабораториях с помощью физико-химических методов (газовая хроматография, спектрометрия, гравиметрия и др.). Эти методы являются частью инструментальных замеров и применяются для уточнения состава ЗВ, ведения производственных экологических наблюдений, подтверждения расчетных данных.

Техническое решение по минимизации воздействия на атмосферный воздух гальванического производства

Наиболее проблемной зоной в гальваническом производстве по выделению ЗВ относятся зеркала ванн. Для снижения выбросов ЗВ необходимо предусмотреть техническое мероприятие, которое позволит снизить выбросы хрома (VI). Такое техническое мероприятие по сокращению выбросов ЗВ на гальваническом участке заключается в укрытии зеркала ванн хромирования полыми химически стойкими шариками. Полые химически стойкие шарiki представляют собой специальные микросферы, изготавливаемые из термо- и химически стойких полимеров, таких как полиэтилен (PE), полипропилен (PP), армированный полипропилен (RPP), поливинилхлорид (PVC), хлорированный ПВХ (CPVC) и поливинилиденфторид (PVDF). Благодаря уникальным свойствам – высокому свободному объему, низкому перепаду давления, минимальной высоте единицы переноса массы, высокой точке захлебывания, равномерному контакту фаз, малому удельному весу и высокой эффективности массопередачи – они нашли широкое применение. Эти элементы используются в насадочных колоннах в температурном диапазоне от 60 до 150 °C в различных отраслях: нефтепереработке, химической, хлор щелочной, углекислотной промышленности и в системах охраны окружающей среды [14, 15].

Основная роль полых химически стойких шариков в ваннах хромирования – поддержание химического равновесия электролита и достижение однородности металлического слоя. Эти шарiki размещаются непосредственно в рабочем растворе, состоящем из реагентов и электролита для хромирования [16, 17]. Технические характеристики полых химически стойких шариков представлены в таблице 2.

Общая задача шариков – обеспечение равномерности и качества хромирования изделий, создание и поддержание оптимальные и стабильные условия, необходимые для получения качественного хромированного покрытия [18, 19]. Эти шарiki могут служить препятствием для выбрасываемых частиц хрома, задерживая их на поверхности или поглощая их. Это позволяет снизить скорость выброса хрома (VI) в окружающую среду и уменьшить его негативное воздействие.

Исследования проводились для гальванических ванн с внутренними размерами 0,6×0,5×0,6 (Д, Ш, В). Расчеты проводились в соответствии с требованиями ТКП 17.08-05-2007 (02120) [20]. Экспериментальные исследования показали, что среднее значение выброса хрома (VI) до укрытия полыми химически стойкими шариками составлял 0,0057 г/с, после – 0,0006 г/с. Фактическая степень очистки – 89,5 %, что практически позволяет достичь проектного показателя (таблица 2).

Технология хромирования с применением полых химически стойких шариков включает несколько последовательных этапов.

1. Подготовка поверхности – для обеспечения высокого качества покрытия изделие тщательно очищается от загрязнений, жира и окислов.

2. Нанесение активирующего слоя – для улучшения адгезии хрома поверхность предварительно обрабатывают специальным химическим раствором.

3. Введение функциональных шариков – в гальванической ванне полые шарiki, выполняют роль фильтра или абсорбента для ЗВ (например, хроматов).

4. Электролитическое осаждение – процесс хромирования осуществляется методом электролиза – под действием электрического тока ионы хрома из раствора осаждаются на катоде (изделии).

5. Финишная обработка – для удаления остатков химикатов и выравнивания слоя хрома после нанесения покрытия изделие промывают и подвергают травлению.

Укрытие зеркала ванн хромирования полыми химически стойкими шариками позволяет снизить до 75 % теплоотдачу и уменьшить до 90 % испарения с поверхности жидкой среды, не требует затрат на сырье и материалы, также электроэнергию не потребляют.

Использование полых химически стойких шариков в гальванических ваннах комплексно улучшает процесс хромирования.

1. Поддержание химического равновесия ванны (регулировка pH и концентрации) для равномерного осаждения хрома.

2. Устранение пузырьков газа, возникающих при электролизе.

3. Защита поверхности изделий от повреждений за счет амортизации.

4. Повышение производительности за счет лучшего распределения электролита.

5. Снижение теплотер, испарения, экономия энергии, уменьшение выбросов ЗВ.

Таблица 2 – Техническая характеристика полых химически стойких шариков

Характеристика	Значение
Температура применения в средах	от 60 до 150 °C
Состав	термостойкая и химически коррозионностойкая пластмасса: полиэтилен (PE), полипропилен (PP), армированный полипропилен (RPP), поливинилхлорид (PVC), хлорированный поливинилхлорид (CPVC) и поливинилиденфторид (PVDF)
Степень очистки, %	90
Габаритные размеры, мм	Ø40
Объем, м³	44

В таблице 3 представлен сравнительный обзор основных мероприятий по сокращению выбросов хрома на гальваническом участке [21–23].

Заключение

Наилучший результат достигается комбинированием нескольких подходов. Например, плавающие шарiki могут в 5–6 раз снизить концентрацию Cr (VI) над ванной, а оставшиеся 10–25 % тумана будут улавливаться вентиляцией и фильтрами до уровней, безопасных для выпуска. Химические добавки способны практически полностью подавить туман на источнике, но из-за экологических ограничений их приходится сочетать с другими мерами. В целом многоступенчатая стратегия – снижение генерации тумана (поплавки, добавки, режимы процесса) плюс эффективное сбор и очистка остатка (вентиляция, фильтры) – позволяет достичь нормативного сокращения выбросов Cr (VI).

Таким образом, интеграция полых шариков в технологический цикл позволяет повысить качество покрытия, снизить вредное воздействие на окружающую среду и увеличить общую эффективность производства. Для сокращения выбросов от ванн хромирования на гальваническом участке, помимо укрытия зеркала ванн шариками, существует комплекс технологических и организационных мероприятий. Эти подходы можно систематизировать по принципу действия: локализация, улавливание, очистка, замена технологии и оптимизация процесса.

Таблица 3 – Альтернативные мероприятия по сокращению выбросов хрома (VI)

Направление	Мероприятия	Принцип действия	Преимущества	Недостатки
Локализация выбросов	Специальные бортовые отсосы (щелевые, зонтичные) с регулируемыми заслонками	Создание воздушного потока, улавливающего испарения / брызги непосредственно над поверхностью ванны	Высокая эффективность (до 95–98 %). Обязательное требование по ТНПА. Экономия энергии	Требуется точного расчета и монтажа. Заслонки могут мешать погружению деталей
	Подвижные укрытия, крышки-слайдеры	Механическое закрытие ванны	Резко снижает выбросы в нерабочие периоды	Требуется автоматизации
Улавливание и очистка	Установка локальных фильтров-скрубберов	Промывка загрязненного воздуха из бортовых отсосов раствором-поглотителем	Позволяет утилизировать хром. Прямое снижение нагрузки на атмосферу	Требуется места, химреагентов, утилизации шлама. Капитальные и эксплуатационные затраты
	Установка высокоэффективных фильтров (туманоуловителей, фильтров с сетками)	Физическая конденсация и улавливание капельной фазы (брызг, аэрозолей)	Защита вентилятора и воздухопроводов. Дополнительное снижение выбросов	Эффективны против аэрозолей, менее – против испарений
Изменение технологии	Переход на хром (III) вместо хром (VI)	Использование менее токсичного и летучего электролита	Снижение опасности. Хром (III) менее токсичен и не канцерогенен. Проще очистка стоков	Другой цвет покрытия, может потребовать изменения технологии подготовки
	Использование триоксида хрома с ингибиторами испарения	Добавка специальных ПАВ в электролит для снижения поверхностного натяжения и летучести	Простое внедрение, снижение выбросов на 30–50 %	Зависит от состава ванны, требует подбора и контроля
Организационные и прочие	Автоматизация контроля параметров (температуры, плотности, тока, pH)	Оптимизация режима для минимизации побочных процессов	Снижение выбросов в источнике. Стабильность качества.	Инвестиции в систему автоматики и датчики
	Регулярное техобслуживание (очистка контактов, анодов, фильтрация электролита)	Поддержание оптимального режима работы, снижение необходимости в повышенных напряжениях / температурах	Снижение энергопотребления и связанных с ними выбросов. Профилактика аварийных выбросов	Требуется регламента работ и контроля

Список цитированных источников

- Об охране атмосферного воздуха : Закон Республики Беларусь от 16 дек. 2008 г. № 2–3 (с изм. и доп. от 17.07.2023 № 295-3) // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H10800002> (дата обращения: 12.06.2026).
- О ведомственной отчетности на 2025 год : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 29 нояб. 2024 г. № 14-Т // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22442635p> (дата обращения: 12.06.2026).
- О деятельности, связанной с выбросами загрязняющих веществ в атмосферный воздух : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 27 дек. 2023 г., № 33 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22441147> (дата обращения: 12.06.2026).
- Об охране окружающей среды : Закон Респ. Беларусь от 29 нояб. 1992 г. № 272-3 // Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=V19201982> (дата обращения: 12.06.2026).
- О комплексных природоохранных разрешениях : Указ Президента Респ. Беларусь от 17 нояб. 2011 г. № 528 (с изм. и доп. от 22 января 2024 г. № 23) // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P31100528> (дата обращения: 12.06.2026).
- О Национальной стратегии развития экономики замкнутого цикла (циркулярной экономики) Республики Беларусь на период до 2035 года : постан. Совета Министров Респ. Беларусь от 29 мая 2024 г. № 393 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22400393> (дата обращения: 12.06.2026).
- Стратегия в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2035 года : приказ Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 24 дек. 2021 г. № 370-ОД // Минприроды : [сайт]. – URL: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/strategija-okr.sredy-do-2035g.pdf> (дата обращения: 12.06.2026).
- Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь до 2040 года : Министерство экономики Респ. Беларусь // Цели устойчивого развития Беларуси : [сайт]. – URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR/natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-razvitiyarespubliki-belarus-na-period-do-2040-goda.pdf> (дата обращения: 12.06.2026).
- Республика Беларусь: Статистический ежегодник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь ; И. В. Медведева (отв. ред.). – Минск, 2025. – 305 с.
- Состояние природной среды Беларуси: экологический бюллетень / Е. И. Громадская, Д. В. Цубленок, М. В. Водейко [и др.] ; под общ. ред. Д. В. Цубленок. – Минск : ЦНИИКИВР, 2025. – 198 с.
- Охрана окружающей среды : статистический буклет / Национальный статистический комитет Республики Беларусь ; И. В. Медведева (отв. ред.). – Минск, 2025. – 36 с.
- Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. Основные положения : ГОСТ 8.010–2013. – Введ. 01.04.2015. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2015. – 11 с.
- Система стандартов безопасности труда. Воздух рабочей зоны. Метод измерения концентраций вредных веществ индикаторными трубками : ГОСТ 12.1.014–84 – Введ. 01.01.1986. – Постановление Государственного комитета СССР по стандартам от 14 дек. 1984 г. № 4362, 1986. – 6 с.
- Термоизоляционные шарики (поплавки). – URL: <https://uralactiv.ru/ventilyatsiya-polipropilenovaya/nasadki-kislotosoykie/shary-poplavki-iz-polipropilena> (дата обращения: 08.02.2026).
- Термоизоляционные шарики (поплавки). – URL: https://impgold.ru/electroplating/insulating_floats (дата обращения: 08.06.2026).

16. Вспененные пластмассовые изделия. – URL: <https://vallkiria.spb.ru/vspenennye-plastmassovye-izdeliya> (дата обращения: 08.06.2026).
 17. Hard Chrome Fume Suppressants and Control Technologies : Capsule Report / B. J. Riordan, R. T. Karamchandani, L. J. Zitko, G. C. Cushnie Jr ; U.S. Environmental Protection Agency. – Описание образования хромового тумана при электролизе и меры его подавления, включая эффективность плавающих пластиковых сфер. – Washington : U.S. EPA, 1998. – 43 p. – (EPA/625/R-98/002).
 18. Capsule report hard chrome fume suppressants and control technologies // U.S. Environmental Protection Agency. – URL: <https://www.buscalibre.ec/libro-capsule-report-hard-chrome-fume-suppressants-and-control-technologies/9781249394389/p/22356989> (дата обращения: 08.02.2026).
 19. DTIC ADA631324 : Использование смачивающих агентов / подавляющих пар для минимизации атмосферных выбросов из ванн с твёрдым хромом // ESTCP. – URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA631324/mode/2up (дата обращения: 08.02.2026).
 20. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов при производстве металлопокрытий гальваническим способом = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Атмасфера. Выкіды забруджвальных рэчываў у атмасфернае паветра. Правілы разліку выкідаў пры вырабе металапакрыццяў гальванічным спосабам : ТКП 17.08-05-2007(02120). – Введ. 21.09.2007. – Минск : Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – 52 с.
 21. Виноградов, С. С. Экологически безопасное гальваническое производство / С. С. Виноградов. – М. : Глобус, 2002. – 352 с.
 22. Виноградов, С. С. Разработка принципов создания экологически безопасного гальванического производства: автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.17.03, 03.00.16 / Виноградов Сергей Станиславович ; Рос. хим.-технол. ун-т им. Д. И. Менделеева. – М., 2004. – 352 с.
 23. Васильева, И. А. Снижение негативного воздействия на окружающую среду от гальванического производства / И. А. Васильева // Молодой ученый. – 2024. – № 46 (545). – С. 467–469.
- References**
1. Ob ohrane atmosfernogo vozduha : Zakon Respubliki Belarus' ot 16 dek. 2008 g. № 2–Z (s izm. i dop. ot 17.07.2023 № 295-Z) // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H10800002> (data obrashcheniya: 12.06.2026).
 2. O vedomstvennoj otchetnosti na 2025 god : postanovlenie Ministerstva prirodnih resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus', 29 noyab. 2024 g. № 14-T // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22442635p> (data obrashcheniya: 12.06.2026).
 3. O deyatel'nosti, svyazannoj s vybrosami zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfernyj vozduh : postanovlenie Ministerstva prirodnih resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus' ot 27 dek. 2023 g., № 33 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22441147> (data obrashcheniya: 12.06.2026).
 4. Ob ohrane okruzhayushchej sredy : Zakon Resp. Belarus' ot 29 noyab. 1992 g. № 272-Z // Nacional'nyj centr pravovoj informacii Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=V19201982> (data obrashcheniya: 12.06.2026).
 5. O kompleksnyh prirodohrannyh razresheniyah : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus' ot 17 noyab. 2011 g. № 528 (s izm. i dop. ot 22 yanvarya 2024 g. № 23) // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P31100528> (data obrashcheniya: 12.06.2026).
 6. O Nacional'noj strategii razvitiya ekonomiki zamknutogo cikla (cirkulyarnoj ekonomiki) Respubliki Belarus' na period do 2035 goda : postan. Soveta Ministrov Resp. Belarus' ot 29 maya 2024 g. № 393 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22400393> (data obrashcheniya: 12.06.2026).
 7. Strategiya v oblasti ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus' na period do 2035 goda : prikaz Ministerstva prirodnih resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus' ot 24 dek. 2021 g. № 370-OD // Minprirody : [sait]. – URL: <https://minpriroda.gov.by/uploads/files/strategiya-oxr.okr.sredy-do-2035g.pdf> (data obrashcheniya: 12.06.2026).
 8. Nacional'naya strategiya ustojchivogo razvitiya Respubliki Belarus' do 2040 goda : Ministerstvo ekonomiki Resp. Belarus' // Celi ustojchivogo razvitiya Belarusi : [sait]. – URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR/natsionalnaya-strategiya-ustojchivogo-razvitiyarespubliki-belarus-na-period-do-2040-goda.pdf> (data obrashcheniya: 12.06.2026).
 9. Respublika Belarus': Statisticheskij ezhegodnik / Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus' ; I. V. Medvedeva (otv. red.). – Minsk, 2025. – 305 s.
 10. Sostoyanie prirodnoj sredy Belarusi: ekologicheskij byulleten' / E. I. Gromadskaya, D. V. Cublenok, M. V. Vodejko [i dr.] ; pod obshch. red. D. V. Cublenok. – Minsk : CNIIKIVR, 2025. – 198 s.
 11. Ohrana okruzhayushchej sredy : statisticheskij buklet / Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus' ; I. V. Medvedeva (otv. red.). – Minsk, 2025. – 36 s.
 12. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. Metodiki vypolneniya izmerenij. Osnovnye polozheniya : GOST 8.010–2013. – Vved. 01.04.2015. – Minsk : Mezghos. sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii: Belorus. gos. in-t standartizacii i sertifikacii, 2015. – 11 s.
 13. Sistema standartov bezopasnosti truda. Vozduh rabochej zony. Metod izmereniya koncentracij vrednyh veshchestv indikatornymi trubkami : GOST 12.1.014–84 – Vved. 01.01.1986. – Postanovlenie Gosudarstvennogo komiteta SSSR po standartam ot 14 dek. 1984 g. № 4362, 1986. – 6 s.
 14. Termoizolyacionnye shariki (poplavki). – URL: <https://uralactiv.ru/ventilyatsiya-polipropilenovaya/nasadki-kislotosoykie/shary-poplavki-iz-polipropilena> (data obrashcheniya: 08.02.2026).
 15. Termoizolyacionnye shariki (poplavki). – URL: https://impgold.ru/electroplating/insulating_floats (data obrashcheniya: 08.06.2026).
 16. Vspenennye plastmassovye izdeliya. – URL: <https://vallkiria.spb.ru/vspenennye-plastmassovye-izdeliya> (data obrashcheniya: 08.06.2026).
 17. Hard Chrome Fume Suppressants and Control Technologies : Capsule Report / B. J. Riordan, R. T. Karamchandani, L. J. Zitko, G. C. Cushnie Jr ; U.S. Environmental Protection Agency. – Opisaniye obrazovaniya hromovogo tumana pri elektrolize i mery ego podavleniya, vlyuchaya effektivnost' plavayushchih plastikovyh sfer. – Washington : U.S. EPA, 1998. – 43 p. – (EPA/625/R-98/002).
 18. Capsule report hard chrome fume suppressants and control technologies // U.S. Environmental Protection Agency. – URL: <https://www.buscalibre.ec/libro-capsule-report-hard-chrome-fume-suppressants-and-control-technologies/9781249394389/p/22356989> (data obrashcheniya: 08.02.2026).
 19. DTIC ADA631324 : Ispol'zovanie smachivayushchih agentov / podavlyayushchih par dlya minimizacii atmosferynyh vybrosov iz vann s tvorydym hromom // ESTCP. – URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA631324/mode/2up (data obrashcheniya: 08.02.2026).
 20. Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodoopol'zovanie. Atmosfera. Vybrosy zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfernyj vozduh. Pravila rascheta vybrosov pri proizvodstve metallopokrytij gal'vanicheskim sposobom = Ahova navakol'naga asyaroddzya i pryrodakarystanne. Atmasfera. Vykydy zabrudzhval'nyh rechyvay u atmasfernae pavetra. Pravily razliuku vykyday pry vyrabe metalapakryccyay gal'vanichnym sposabom : ТКП 17.08-05-2007(02120). – Введ. 21.09.2007. – Минск : Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – 52 с.
 21. Vinogradov, S. S. Ekologicheski bezopasnoe gal'vanicheskoe proizvodstvo / S. S. Vinogradov. – M. : Globus, 2002. – 352 s.
 22. Vinogradov, S. S. Razrabotka principov sozdaniya ekologicheskogo bezopasnogo gal'vanicheskogo proizvodstva: avtoreferat dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk : 05.17.03, 03.00.16 / Vinogradov Sergej Stanislavovich ; Ros. him.-tekhnol. un-t im. D. I. Mendeleeva. – M., 2004. – 352 s.
 23. Vasil'eva, I. A. Snizhenie negativnogo vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu ot gal'vanicheskogo proizvodstva / I. A. Vasil'eva // Molodoy uchenyj. – 2024. – № 46 (545). – S. 467–469.

Материал поступил 09.07.2026, одобрен 14.07.2026, принят к публикации 14.07.2026

УДК 621.311.001

КОНЦЕПЦИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССАМИ ВОДООЧИСТКИ МОЛОКОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**В. Н. Штепа¹, В. В. Таберко², О. Н. Прокопеня³, В. И. Бакаленко⁴, С. В. Степанов⁵,
Д. В. Шункевич⁶**

¹ Д. т. н., доцент, заведующий кафедрой промышленной экологии УО «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь, e-mail: tproless@gmail.com

² Директор по автоматизации производства ОАО «Савушкин продукт», Брест, Беларусь, e-mail: savushkin@savmilk.ru

³ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: olegprokopenya@mail.ru

⁴ К. т. н., доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники УО «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь, e-mail: bakalenko@belstu.by

⁵ Д. т. н., профессор, профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Академия строительства и архитектуры, Самарский государственный технический университет, Самара, Россия, e-mail: stepanovsv3@yandex.ru

⁶ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой интеллектуальных информационных технологий УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь, e-mail: shunkevich@bsuir.by

Реферат

Выявлены негативные факторы воздействия загрязнений в сточных водах молокоперерабатывающих предприятий: недопустимое снижение концентрации кислорода в воде, эвтрофикация, нарушение штатного функционирования биологических коммунальных очистных сооружений. Выполнен анализ традиционной структуры локальных очистных сооружений молокоперерабатывающих предприятий, который указал на существенные недостатки в управлении их технологическими процессами. Установлено, что на большинстве производств применяются только системы диспетчеризации типа SCADA, что значительно снижает эффективность процессов принятия оперативных управленческих решений. На основе нотаций UML созданы диаграммы управления локальными очистными сооружениями и мойки оборудования цеха сухих молочных продуктов. Выявлено, что в такой процедурной схеме принятия решений основная когнитивная нагрузка остается на специалистах, что делает целесообразным применение для мониторинга водопотребления и управления очисткой сточных вод мультиагентных систем, которые позволяют создавать интегральную информационную экосреду с максимизацией интероперабельности. На основе методологии AOSE (Agent-Oriented Software Engineering) разработано архитектурное и алгоритмическое обеспечение многоагентного мониторинга очистки сточных вод и водопотребления молокоперерабатывающих предприятий. Обоснованы структура и задачи агента «Диспетчер верхнего уровня»; в рамках водопотребления и очистки сточных вод молокоперерабатывающего производства – это координация потоков, ресурсов и экологических рисков между цехами и локальными очистными сооружениями. Приведены потенциальные эффекты от внедрения такой системы в части улучшения OPEX (денежные затраты на электроэнергию, реагенты, утилизацию/хранение/переработку осадка сточных вод, фонд оплаты труда) и CAPEX (денежные затраты на избыточные инвестиции в модернизацию процессов водного цикла и оборудование); указаны позитивные ESG-метрики (уменьшения избыточных денежных затрат на аварийные сбросы и экологические нарушения).

Ключевые слова: молокопереработка, мультиагентная система, мониторинг процессов водопользования, локальные очистные сооружения.

CONCEPT OF MULTI-AGENT APPROACH TO MANAGEMENT OF WATER TREATMENT PROCESSES OF MILK PROCESSING ENTERPRISES

V. N. Shtepa, V. V. Taberko, O. N. Prokopenya, V. I. Bakalenko, S. V. Stepanov, D. V. Shunkevich

Abstract

Negative factors of the impact of pollution in the wastewater of milk processing enterprises were revealed: an unacceptable decrease in the concentration of oxygen in the water, eutrophication, violation of the normal functioning of biological municipal treatment facilities. Analysis of the traditional structure of local treatment facilities of milk processing enterprises was carried out, which indicated significant shortcomings in the management of their technological processes. It has been established that at most production facilities only SCADA dispatching systems are used, which significantly reduces the efficiency of operational management decision-making processes. Based on UML notations, diagrams have been created for managing local treatment facilities and washing equipment of the dry dairy products workshop. It was revealed that in such a procedural decision-making scheme, the main cognitive burden remains on specialists, which makes it expedient to use multi-agent systems for monitoring water consumption and managing wastewater treatment, which allow creating an integral information environment with maximizing interoperability. Based on the AOSE (Agent-Oriented Software Engineering) methodology, architectural and algorithmic support for multi-agent monitoring of wastewater treatment and water consumption of milk processing enterprises has been developed. The structure and tasks of the "Top Level Manager" agent are justified; in the framework of water consumption and wastewater treatment of milk processing production – this is the coordination of flows, resources and environmental risks between workshops and local treatment facilities. The potential effects of implementing such a system in terms of improving OPEX (cash costs for electricity, reagents, disposal/storage/processing of sewage sludge, payroll) and CAPEX (cash costs for excessive investments in modernization of water cycle processes and equipment) are given; positive ESG metrics are indicated (reducing excess cash costs for emergency discharges and environmental violations).

Keywords: milk processing, multi-agent system, monitoring of water use processes, local treatment facilities.

Введение

Сточные воды молокоперерабатывающих предприятий обладают высокой концентрацией органических загрязнителей и при попадании в окружающую среду могут вызывать гибель представителей флоры и фауны из-за дефицита кислорода, эвтрофикацию (цветение) водоемов. В результате их негативного воздействия может иметь место нарушение штатной работы коммунальных очистных сооружений (КОС) [1].

Целесообразно выделить следующие отрицательные эффекты такого антропогенного воздействия:

- недопустимое снижение концентрации кислорода в воде (высокое соотношение значений биологического потребления кислорода (БПК) и химического потребления кислорода (ХПК), поскольку отходы молокопереработки содержат значительные объёмы лактозы и жиров) [2];

- эвтрофикация (высокое содержание азота и фосфора провоцирует цветение водорослей и размножение сине-зелёных бактерий, что снижает светопрозрачность, инициирует гибель гидробионтов, также при отмирании водорослей выделяются токсичные газы) [2];

- нарушение штатного режима работы биологических КОС (залповые выбросы загрязнителей в сточные воды молокоперерабатывающих производств перегружают городские станции очистки, к примеру, лактоза способствует размножению нитчатых бактерий, разрушающих биоценоз активного ила) [1, 3]; молочная кислота и моющие средства (кислотные и щелочные растворы, используемые для СІР-мойки оборудования) быстро во времени значительно изменяют величину рН водных растворов, что губительно для многих водных организмов и микрофлоры почв, особенно для активного ила биологических КОС [3, 4].

При этом традиционная структура локальных очистных сооружений (ЛОС) таких производств включает в себя [3]: механическую и физико-химическую обработку; усреднение для обеспечения равно-

мерных параметров по расходу и концентрациям загрязнителей; биологическую редукцию загрязнителей; переработку осадков сточных вод. Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУТП) ЛОС, как правило, способна в автоматическом режиме выполнять функции [5]: контроля и управления оборудованием, дистанционного регулирования, сигнализации и предотвращения аварийных и предаварийных ситуаций; автоматического формирования ретроспективы; оптимизации операционных режимов [6, 7]. Однако на большинстве ЛОС применяются только системы диспетчеризации типа SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), что значительно снижает эффективность принятия оперативных управленческих решений.

Постановка задачи

Анализ недостатков, присущих существующим системам выявленных в ходе мониторинга процессов водопользования молокоперерабатывающих предприятий и очистки их сточных вод, позволяет сделать вывод о целесообразности создания мультиагентной системы оперативного управления с целью улучшения ресурсоэффективности производства и повышения его экологической безопасности.

Структурный анализ процессов управления очисткой сточных вод и водопотребления (на примере мойки оборудования цеха сухих молочных продуктов) молокоперерабатывающих производств

На рисунке 1 представлен пример диаграммы вариантов использования (прецедентов) в нотации UML (Unified modeling language) ЛОС. Актёры – это внешние сущности, которые взаимодействуют с ней, чтобы достичь собственных целей или выполнить определённые задачи. Они обозначают роли, которые могут выполнять пользователи или другие системы в процессе работы с программным обеспечением АСУТП.

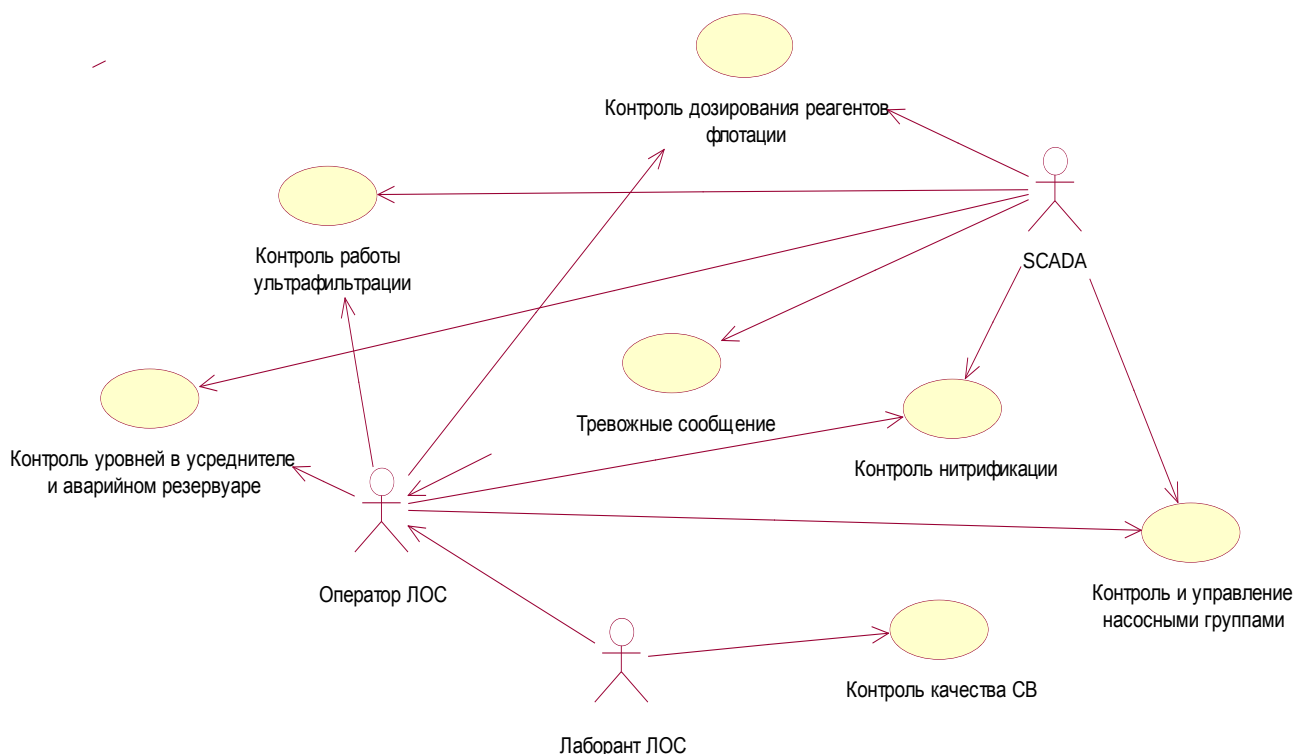


Рисунок 1 – Обобщённая диаграмма вариантов управления локальными очистными сооружениями

Варианты использования (прецеденты) – это действия или функции, которые системная среда предоставляет актёрам. Диаграмма (см. рисунок 1) показывает неоправданное перекрестное управление ЛОС, как со стороны оператора-человека так и со стороны SCADA, и значительную несистемность (отсутствие единой информационной экосреды)

при поддержании необходимых режимов очистки СВ – абсолютно без координирующей аналитической поддержки такая ситуация приводит к отсутствию интероперабельности (способности различных программных и аппаратных комплексов взаимодействовать друг с другом: обмениваться данными, понимать их и использовать полученную информацию).

На практике аналогичная неинтероперабельность при принятии управленческих решений имеет место и в рамках планирования и реализации мойки технологического оборудования [1], к примеру, цеха сухих молочных продуктов (СМП) (рисунок 2).

Вместе с тем наличие SCADA-системы переводит операции ЛОС и мойки оборудования с уровня «ручного труда» на более высокий уровень контроля. В этой схеме SCADA (см. рисунки 1 и 2) выступает в роли информационной среды, которая агрегирует данные и предоставляет исполнительные механизмы, но «интеллект» системы (целеполагание, анализ трендов и выбор планов действий) полностью возложен на человека-оператора и инженерно-технологических работников (ИТР). Тогда функции оператора (лица, принимающего решения – ЛПР) следующие:

- определение установок для локальных контуров автоматики (например, изменение целеполаганий коррекции pH и/или расхода реагентов во флотаторе);
- анализ графиков (трендов) для выявления скрытых аномалий (например, причины плавного роста трансмембранного давления (ТМД) в установках ультрафильтрации СВ в течение недели);
- ручной запуск сложных кросс-узловых сценариев (команда на старт CIP-мойки (Cleaning in place), переключение СВ в резервную емкость при залповом сбросе).

Недостатками и ограничениями гибридного подхода (штатная работа SCADA вместе с оператором-человеком), несмотря на удобство визуализации, являются (на примере ЛОС) следующие:

- когнитивная перегрузка оператора («информационный шум»): например, в случае масштабного сброса сыворотки SCADA генерирует большое количество аварийных сигналов одновременно по всем узлам (падение кислорода, рост мутности СВ, увеличение ТМД) – человеку требуется значительное время (иногда недопустимое с точки зрения производственной безопасности), чтобы

отфильтровать второстепенные тревоги от первопричины и принять верное решение;

- сохранение фактора «слепого» времени реакции: SCADA показывает аварию на экране, но если оператор не отследил уведомление, то время физического реагирования на критическую ситуацию (например, прорыв жира на мембраны) может составлять от 15 до 40 минут;
- отсутствие автоматической оптимизации OPEX (Operating Expenditure – операционные затраты): SCADA стабилизирует значения параметров, которые ранее ввел человек. Если оператор установил завышенную уставку по расходу кислорода в биореактора (например, 4 мг/дм³ вместо 2,5 мг/дм³), то система будет перерасходовать электроэнергию, не выполняя необходимую коррекцию;
- человеческий фактор при оценке сложных взаимосвязей: SCADA не связывает параметры разных узлов в единую логическую модель. Как вариант, может иметь место демонстрация на мнемосхеме роста мутности СВ на флотаторе и повышения ТМД на мембранах. Проанализировать такие графики, сделав вывод о том, что флотатор не справляется с жиром и создаёт технологические опасности для ультрафильтрации и вовремя скорректировать дозы коагулянтов и флокулянтов – сложная многопараметрическая аналитическая задача, решение которой зависит исключительно от квалификации и внимательности оператора, с чем на реальных коммунально-промышленных объектах, в силу «кадрового дефицита», имеются значительные проблемы.

Соответственно, обосновано использовать для интеллектуального мониторинга (прогноза и контроля) и управления водопотреблением и очисткой сточных вод современные подходы, например, на основе мультиагентных систем (МАС) [8, 9], которые позволяют создавать интегральную информационную среду с максимизацией информационно-технологической интероперабельности.

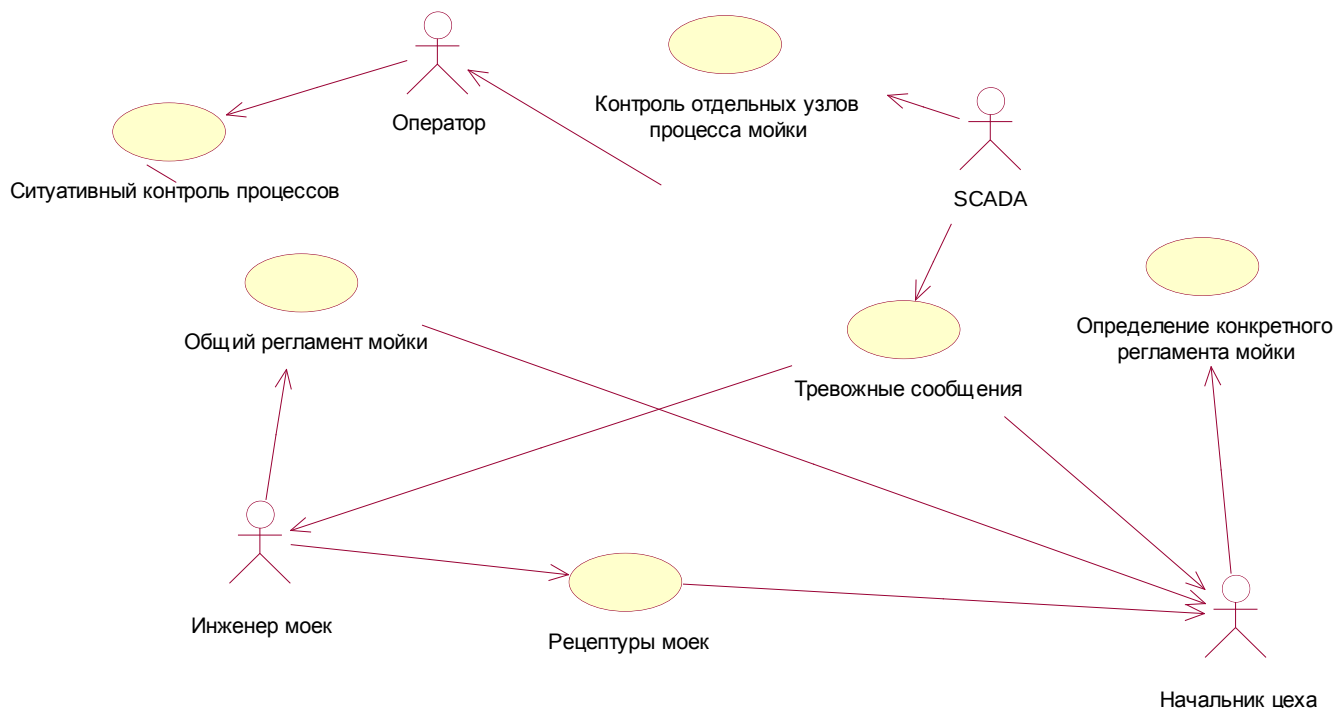


Рисунок 2 – Обобщённая диаграмма процесса управления мойкой цеха сухих молочных продуктов

Обоснование и создание мультиагентной системы управления очисткой сточных вод и водопотреблением молокоперерабатывающих предприятий

В целом создание мультиагентных систем – процесс обоснования и создания решений путем декомпозиции общей задачи на множество автономных интеллектуальных агентов, способных взаимодействовать друг с другом для достижения общей цели.

Процесс создания МАС включает следующие шаги [10–12]:

- 1) декомпозиция задачи – сложный процесс разбивается на параллельно выполняемые подзадачи;
- 2) определение ролей и компетенций – для каждой подзадачи назначается специализированный агент с ограниченной зоной ответственности;
- 3) выделение уровней (уровневая архитектура):
 - бизнес-логика – реализация конкретных функций внутри каждого агента;

– интеграционный слой – обеспечение взаимодействия через стандартизированные протоколы (например, FIPA-ACL (Agent communication language foundation for intelligent physical agents) или фреймворк JADE (Java agent development) [13];

4) проектирование взаимодействия – определение способов обмена данными и координации действий между агентами;

5) настройка автономии – каждый агент проектируется как самостоятельная единица, способная принимать решения без прямого внешнего управления, но в интересах всей системы.

В дальнейшем будет применён шаблон проектирования мониторинга использования водных ресурсов молокозаводом по методологии AOSE (Agent-Oriented Software Engineering) [14, 15]. В его рамках процесс агентизации (разработки MAC) представляет собой структурированный жизненный цикл, который решает задачу повышения эффективности потребления водных ресурсов и их очистки.

Вариант архитектуры MAC для мониторинга функционирования ЛОС молокозавода представлен на рисунке 3.

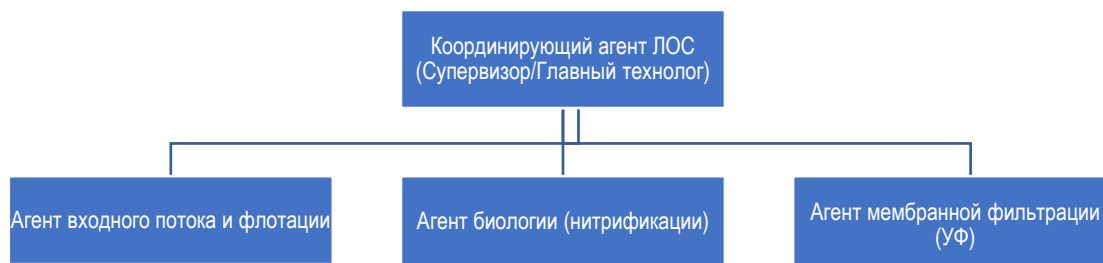


Рисунок 3 – Архитектура MAC мониторинга функционирования ЛОС

Роль «Агента входного потока СВ и флотации»: подача стабильного по pH и максимально очищенного от жиров субстрата на биологическую ступень водообработки.

Контролируемые параметры среды (Beliefs): объемы СВ в усреднителе и аварийном резервуаре, текущий pH, мутность, концентрация жиров на входе и выходе флотатора.

Доступные управляющие действия (Intentions): регулирование подачи СВ, дозирование кислоты/щелочи для коррекции pH, изменение рабочих доз коагулянта и флокулянта.

Протокол взаимодействия: предупреждает «Агента биологии» (биологической очистки) о недопустимом увеличении соотношения ХПК/БПК или риске проскока жира.

Роль «Агента биологии»: поддержание оптимальной экосистемы для бактерий-нитрификаторов и минимизация концентрации аммония (NH_4^+) на выходе.

Контролируемые параметры среды (Beliefs): уровень растворенного кислорода (DO), pH в аэротенке.

Протокол взаимодействия: передает «Агенту ультрафильтрации» данные о концентрации биомассы; запрашивает у «Агента входного потока и флотации» снижение расхода при дефиците кислорода.

Роль «Агента мембранной фильтрации»: обеспечение бесперебойного отвода очищенной воды (пермеата) при максимальном сохранении ресурса мембран.

Контролируемые параметры среды (Beliefs): трансмембранное давление, удельный поток.

Доступные управляющие действия (Intentions): переключение режимов работы (фильтрация/обратная промывка/химическая CIP-мойка), регулирование мощности фильтрационных насосов.

Протокол взаимодействия: при критическом росте ТМД отправляет запрос «Координирующему агенту» на остановку фильтрации для проведения экстренной мойки.

Роль «Координирующего агента ЛОС»: максимизация общей эффективности очистки при минимизации стоимости ресурсов (расхода электроэнергии и реагентов).

Контролируемые параметры среды (Beliefs): общий баланс СВ на ЛОС, текущие тарифы на электроэнергию, интегральные показатели сброса (отведения), запасы реагентов.

Доступные управляющие действия (Intentions): корректировка целевых установок для локальных агентов, инициация аварийных режимов (перевод стока в буферный резервуар).

Протокол взаимодействия: принимает телеметрию от всех агентов, координирует их действия при пиковых нагрузках и оптимизирует затраты в режиме реального времени.

Для цеха сухих молочных продуктов молокозавода рассмотрим конкретный пример агентизации узла CIP-мойки вакуум-выпарной установки (BBU).

Архитектура агентов для узла мойки BBU.

1. «Агент-датчик контура»:

– роль – непрерывный измерительный мониторинг физической среды;

– Beliefs (убеждения/знания (текущие) о параметрах объекта) – результаты измерений;

– Desires (желания/цели) – обеспечить точность и непрерывность данных; первично классифицировать состояние среды (например, идет фаза щелочной мойки, но параметры pH водного раствора ниже нормативных);

– Intentions (намерения/планы) – например, каждые 500 миллисекунд опрашивать OPC UA-сервер (Open platform communications unified architecture), фильтровать шумы датчиков, при отклонении параметров более чем на 5 % немедленно отправлять структурированное ACL-сообщение «Агенту-координатору».

2. «Агент-координатор» BBU:

– Роль – защита интересов конкретного технологического оборудования;

– Beliefs – например, предыдущий цикл варки длился 20 часов (потенциально сильное налипание белка на трубках каландра); текущий статус – «Требуется усиленная мойка»;

– Desires – добиться 100 % чистоты внутренних поверхностей;

– Intentions – сформировать запрос к «Агенту-рецепту» на подбор оптимальной программы очистки с учетом тяжести загрязнения; отклонять команды на запуск производства, пока «Агент-датчик» не подтвердит необходимую чистоту поверхностей (на основе электропроводности водного раствора).

3. «Агент-рецепт»:

– роль – экспертная система и база знаний стандартов мойки;

– Beliefs – хранит профили процессов мойки;

– Desires – минимизировать время простоя оборудования

при строгом соблюдении регламента безопасности;

– Intentions – получить данные от «Агента-координатора» BBU, рассчитать динамический профиль (например, увеличить время циркуляции щелочи на 10 минут из-за риска пригара) и передать эту инструкцию «Агенту CIP-станции».

4. «Агент CIP-станции»:

– роль – управление подачей реагентов, насосами и клапанами;

– Beliefs – например, в баке концентрированной щелочи осталось 200 литров; дозирующий насос № 2 исправен; насос возврата работает;

– Desires – удерживать заданные «Агентом-рецептом» параметры;

– Intentions – открывать клапан подачи концентрата короткими импульсами, отслеживая реакцию через «Агента-датчика».

Разработка архитектуры и алгоритмическо-технологической части МАС сквозного мониторинга ресурсоэффективности и экологической безопасности использования водных ресурсов

Традиционно в мультиагентных системах роль «Супер-агента» выполняет «Агент-диспетчер верхнего уровня» [16, 17]. В рамках водопотребления молокоперерабатывающего предприятия его задача – балансировать потоки, ресурсы и экологические риски между производством (например, цехом сухих молочных продуктов) и локальными очистными сооружениями.

1. Прогнозирование и планирование пиковых нагрузок.
 2. Динамическое управление гидравлическим и химическим балансом.
 3. Регулирование параметров повторного использования ресурсов.
 4. Интеллектуальный мониторинг мойки и экологический контроль.
- «Агент-диспетчер верхнего уровня» выступает в роли независимого цифрового аудитора:

– сквозной трекинг инцидентов – к примеру, если «Агент-Датчик» в цеху СМП зафиксировал утечку концентрированной щелочи (авария клапана), то «Агент-диспетчер верхнего Уровня» переводит ЛОС в «Режим нештатной ситуации» – СВ изолируются в аварийный бак, минуя активный ил азотенков;

– формирование «Зеленого паспорта» смены – автоматическая генерация отчетов: сколько сырья переработано, сколько кислоты, щелочи и других моющих средств потрачено, какой углеродный след и объемы ХПК/БПК отведены в городскую канализационную сеть (сброшены в природный водоём) после ЛОС.

Таким образом «Агент-диспетчер верхнего уровня» будет выполнять функцию технологического OLAP (Online analytical processing) и CALS (Continuous acquisition and lifecycle support) (рисунок 4) [18].

Вместе с тем принятие управленческих решений на уровне руководства предприятий обязательно сопровождается оценкой финансовой модели (денежных потоков). МАС мониторинга использования водных ресурсов за счет реализации эффективных режимов водного цикла улучшает (таблица 1) [19]:

- OPEX (operating expenditure) – денежные затраты на электроэнергию, реагенты, утилизацию/хранение/переработку осадка сточных вод, фонд оплаты труда;
- CAPEX (Capital Expenditure) – денежные затраты на инвестиции в модернизацию процессов водного цикла и оборудование; создание дополнительного производства переработки осадка сточных вод;
- ESG-метрики (Environmental, Social, Governance) – аварийные сбросы и экологические нарушения или денежные затраты на их предотвращение.

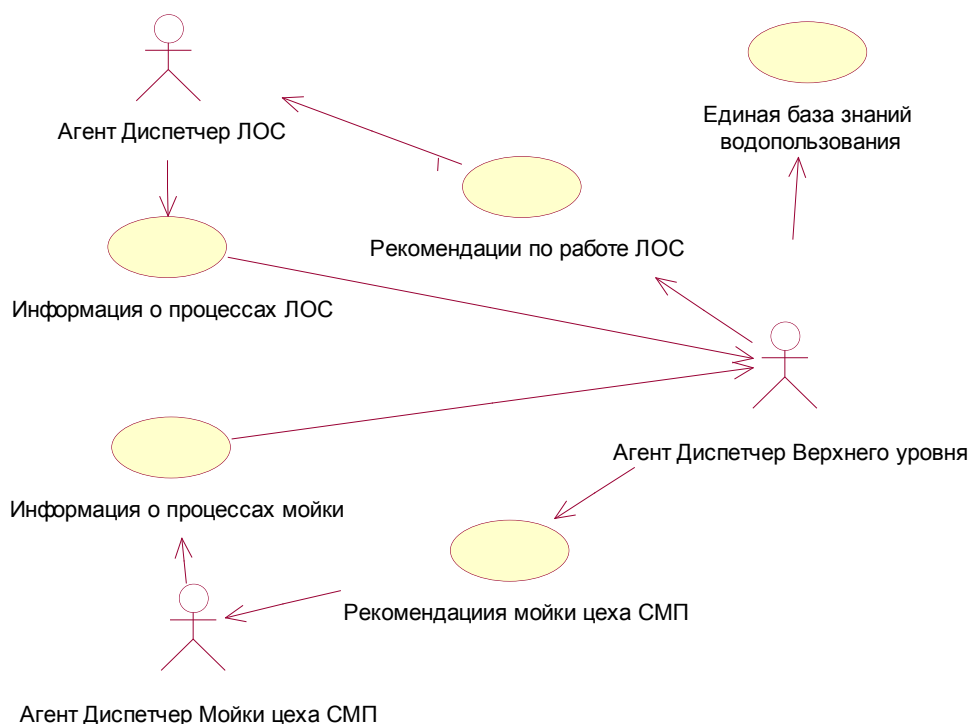


Рисунок 4 – Диаграмма вариантов использования агентов МАС мониторинга водопотребления (мойки оборудования цеха СМП) и очистки сточных вод: «Диспетчера верхнего уровня», «Диспетчера ЛОС», «Диспетчера мойки цеха СМП»

Таблица 1 – Потенциальные эффекты от внедрения МАС мониторинга использования водных ресурсов молокоперерабатывающими производствами

Показатель	Потенциальный достигаемый эффект
OPEX	Снижение расхода: электроэнергии – до 30 % реагентов – до 15 % фонда оплаты труда – до 30 %
CAPEX	Уменьшение избыточных инвестиций в оборудование. Своевременная модернизация и реконструкция на основе более точного прогноза и оценки технического состояния – возможность повышения эффективности использования финансовых ресурсов
ESG	Риск аварийных сбросов и экологических нарушений – значительно ниже

Таким образом, можно сформулировать задачи интеллектуально-го мониторинга водопользования производства молочных продуктов:

- аналитическая обработка экспертных заключений, данных лабораторных анализов и информации от измерительных средств;

- формирование оперативных рекомендаций по действиям оператора SCADA ЛОС и производственных цехов в рамках задач технологического регламента;

- формирование оперативных логических прогнозов экологических рисков вызванных возможностью нерегламентной работы ЛОС и производственных цехов;
- формирование оперативных отчётов о выполнении целевых показателей КРП (расход электроэнергии и другие затраты);
- формирование оперативных логических прогнозов по работе технологического оборудования;
- интерфейсное взаимодействие с ИТР с целью обновления технологической базы знаний, например, на основе методологии OSTIS [8];
- особый акцент при разработке ПО необходимо сделать на интерфейсные решения, которые обеспечивают взаимодействие МАС с инженерно-технологическими специалистами; локальные контроллеры также представляют виртуальных актёров и должны реализовываться на основе мультиагентного подхода – им делегируются логическое ранжирование данных получаемых от измерительных средств;
- стратегическая задача – качественное повышение интероперабельности всей производственной информационной системы, куда включены и специалисты организации с дальнейшим переходом к объектовым (корпоративным) интеллектуальным платформам [20].

Заключение

Предлагаемый мультиагентный подход к управлению процессами очистки сточных вод предприятий молочной промышленности может быть использован для разработки инфраструктуры цифровой среды при решении разнородных задач интегрированного информационно-аналитического обеспечения:

- организации защищенного единого информационного пространства абонентов – участников интегрированной автоматизированной системы с целью обеспечения их информационного взаимодействия на этапах испытаний и эксплуатации оборудования и поддержки принятия решений;
- интеграции и каталогизации данных и знаний о водопользовании в процессах выработки и реализации управленческих решений, например на основе цифровых двойников (хронологии и ретроспективы по всем стадиям процессов применения на единых принципах интерпретации, обработки, анализа и представления информации);
- автоматизации процессов информационно-аналитического обеспечения на основе единой цифровой платформы непрерывной предиктивной, ретроспективной и дополненной аналитики и обработки распределенных данных и знаний, мониторинга и поддержки принятия управленческих решений, в том числе, в режиме реального времени.

Дальнейшие исследования актуально сфокусировать на создании математических моделей локального уровня (агентов), с учётом их дальнейшей интеграции в цифровую платформу ресурсопользования предприятия по производству молочных продуктов.

Список цитированных источников

1. Штепа, В. Н. Прикладные аспекты использования технологии OSTIS при информационном обеспечении цифровизации процессов водопользования молокоперерабатывающих предприятий / В. Н. Штепа, Э. Н. Муслимов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems : сборник научных трудов / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. В. Голенков (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2024. – Вып. 8. – С. 171–176.
2. Директива 2000/60/ЕС Европейского Парламента и Совета от 23 октября 2000 г., устанавливающая рамки для деятельности Сообщества в области водной политики // Официальный журнал Европейского Союза (Official Journal of the European Union). – 2000. – L 327. – 73 с.
3. Enhancing Ecological Efficiency in Biological Wastewater Treatment: A Case Study on Quality Control Information System / D. Alekseevsky, Y. Chernysh, V. Shtepa [et al.] // Water. – 2023. – Vol. 15, Iss. 21. – P. 3744. – DOI: 10.3390/w15213744.
4. Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks / E. Molina-Navarro, P. Segurado, P. Branco [et al.] // Limnologia. – 2020. – Vol. 80. – P. 125742. – DOI: 10.1016/j.limno.2019.125742.
5. Штепа, В. Н. Обоснование и схемы использования ранжирующих измерительных систем экологического мониторинга и интеллектуального анализа режимов водоотведения / В. Н. Штепа, Н. Ю. Золотых, С. Ю. Киреев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки: научный журнал. – 2023. – № 1. – С. 94–103.
6. Rationale for the Combined Use of Biological Processes and AOPs in Wastewater Treatment Tasks / V. Shtepa, M. Balintova, Ye. Chernysh [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, Iss. 16. – P. 7551.
7. Предиктивное управление процессом биологической очистки сточных вод на основе нейросетевого прогнозирования pH / В. Н. Штепа, В. А. Кудинов, О. Н. Прокопеня, Э. Н. Муслимов // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 1 (133). – С. 149–155. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-149-155.
8. Технология комплексной поддержки жизненного цикла семантически совместимых интеллектуальных компьютерных систем нового поколения : монография / В. В. Голенков, Н. А. Гулякина, Д. В. Шункевич [и др.]; под ред. В. В. Голенкова. – Минск : Бестпринт, 2023. – 1064 с.
9. Integrated Automation of Water Disposal in Terms of Interoperability of Monitoring and Control Processes / I. Voitov, V. Shtepa, M. Okhtilev [et al.] // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems : research papers collection / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics ; editorial board: V. V. Golenkov (Editor in chief) [et al.]. – Minsk, 2025. – Iss. 9. – P. 193–198.
10. Поспелов, Д. А. Многоагентные системы – настоящее и будущее / Д. А. Поспелов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 1998. – № 1. – С. 14–21.
11. Phan, T. Pathfinding in Multi-Agent Systems via Multi-Agent Reinforcement Learning / T. Phan, T. Gabor // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2026. – Vol. 40, No. 1. – P. 15–32. – DOI: 10.1007/s10458-026-09642-x.
12. Глущенко П. В. Активно-адаптивные электросети: интеллектуальный мультиагентный диагностико-прогнозирующий комплекс и интеллектуальный алгоритм мультиагента решений диагностического мониторинга / П. В. Глущенко // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2014. – № 8 (68). – С. 1–5.
13. Malik F. H. A review: Agents in smart grids / F. H. Malik, M. Lehtonen // Electric Power Systems Research. – 2016. – Vol. 131. – P. 71–79. – DOI: 10.1016/j.epsr.2015.10.004.
14. Multi-agent systems for grid energy management: A short review / R. Robin, B. Blunier, A. Miraoui [et al.] // IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – IEEE, 2010. – P. 3341–3346. – DOI: 10.1109/IECON.2010.5675295.
15. Kiran, P. Multi-agent based systems on micro grid – a review / P. Kiran, K. R. M. V. Chandrakala, T. N. P. Nambiar // 2017 international conference on intelligent computing and control (I2C2). – IEEE, 2017. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/I2C2.2017.8321880.
16. Morstyn, T. Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: An overview / T. Morstyn, B. Hredzak, V. G. Agelidis // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2016. – Vol. 9, Iss. 4. – P. 3652–3666. – DOI: 10.1109/TSG.2016.2637958.
17. Poggi, A. Extending JADE for agent grid applications / A. Poggi, M. Tomaiuolo, P. Turci // 13th IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises. – IEEE, 2004. – P. 352–357. – DOI: 10.1109/ENABE.2004.30.
18. Bellifemine, F. L. Developing multi-agent systems with JADE / F. L. Bellifemine, G. Caire, D. Greenwood. – Chichester : John Wiley & Sons, 2007. – Vol. 7. – 300 p.
19. Карцан, И. Н. Современные поисковые системы в сети Интернет: анализ принципов работы и классификация / И. Н. Карцан, В. В. Кожевников, П. В. Зеленков // Вестник НИИ СУВБП : сб. науч. тр. / под общ. ред. Н. В. Василенко. – Красноярск : НИИ СУВБП, 2006. – Вып. 23. – С. 221–227.

20. Охтилев, М. Ю. Интеллектуальная информационно-аналитическая платформа управления организациями ВКХ / М. Ю. Охтилев, В. Н. Штепа, В. И. Баженов // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2025. – № 2. – С. 20–29.

References

1. SHtepa, V. N. Prikladnye aspekty ispol'zovaniya tekhnologii OSTIS pri informacionnom obespechenii cifrovizatsii processov vodopol'zovaniya molokopererabatyvayushchih predpriyatij / V. N. SHtepa, E. N. Muslimov // Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nyh sistem = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems : sbornik nauchnyh trudov / Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki ; redkol.: V. V. Golenkov (gl. red.) [i dr.]. – Minsk, 2024. – Vyp. 8. – S. 171–176.
2. Direktiva 2000/60/ES Evropejskogo Parlamenta i Soveta ot 23 oktyabrya 2000 g., ustanavlivayushchaya ramki dlya deyatel'nosti Soobshchestva v oblasti vodnoj politiki // Oficial'nyj zhurnal Evropejskogo Soyuza (Official Journal of the European Union). – 2000. – L 327. – 73 s.
3. Enhancing Ecological Efficiency in Biological Wastewater Treatment: A Case Study on Quality Control Information System / D. Alekseevsky, Y. Chernysh, V. Shtepa [et al.] // Water. – 2023. – Vol. 15, Iss. 21. – P. 3744. – DOI: 10.3390/w15213744.
4. Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks / E. Molina-Navarro, P. Segurado, P. Branco [et al.] // Limnologica. – 2020. – Vol. 80. – P. 125742. – DOI: 10.1016/j.limno.2019.125742.
5. SHtepa, V. N. Obosnovanie i skhemy ispol'zovaniya ranzhiruyushchih izmeritel'nyh sistem ekologicheskogo monitoringa i intellektual'nogo analiza rezhimov vodootvedeniya / V. N. SHtepa, N. YU. Zolotyh, S. YU. Kireev // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki: nauchnyj zhurnal. – 2023. – № 1. – S. 94–103.
6. Rationale for the Combined Use of Biological Processes and AOPs in Wastewater Treatment Tasks / V. Shtepa, M. Balintova, Ye. Chernysh [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, Iss. 16. – P. 7551.
7. Prediktivnoe upravlenie processom biologicheskoy ochistki stochnyh vod na osnove nejrosetevogo prognozirovaniya rN / V. N. SHtepa, V. A. Kudinov, O. N. Prokopenya, E. N. Muslimov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 1 (133). – S. 149–155. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-149-155.
8. Tekhnologiya kompleksnoj podderzhki zhiznennogo cikla semanticheski sovместimyh intellektual'nyh komp'yuternyh sistem novogo pokoleniya : monografiya / V. V. Golenkov, N. A. Gulyakina, D. V. SHunkevich [i dr.] ; pod red. V. V. Golenkova. – Minsk : Bestprint, 2023. – 1064 s.
9. Integrated Automation of Water Disposal in Terms of Interoperability of Monitoring and Control Processes / I. Voitov, V. Shtepa, M. Okhtilev [et al.] // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems : research papers collection / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics ; editorial board: V. V. Golenkov (Editor in chief) [et al.]. – Minsk, 2025. – Iss. 9. – P. 193–198.
10. Pospelov, D. A. Mnogoagentnye sistemy – nastoyashchee i budushchee / D. A. Pospelov // Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy. – 1998. – № 1. – S. 14–21.
11. Phan, T. Pathfinding in Multi-Agent Systems via Multi-Agent Reinforcement Learning / T. Phan, T. Gabor // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2026. – Vol. 40, No. 1. – P. 15–32. – DOI: 10.1007/s10458-026-09642-x.
12. Glushchenko P. V. Aktivno-adaptivnye elektroseti: intellektual'nyj mul'tiagentnyj diagnostiko-prognozirovushchij kompleks i intellektual'nyj algoritm mul'tiagenta reshenij diagnosticheskogo monitoringa / P. V. Glushchenko // Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyj nauchnyj zhurnal. – 2014. – № 8 (68). – S. 1–5.
13. Malik F. H. A review: Agents in smart grids / F. H. Malik, M. Lehtonen // Electric Power Systems Research. – 2016. – Vol. 131. – P. 71–79. – DOI: 10.1016/j.epsr.2015.10.004.
14. Multi-agent systems for grid energy management: A short review / R. Robin, B. Blunier, A. Miraoui [et al.] // IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – IEEE, 2010. – P. 3341–3346. – DOI: 10.1109/IECON.2010.5675295.
15. Kiran, P. Multi-agent based systems on micro grid – a review / P. Kiran, K. R. M. V. Chandrakala, T. N. P. Nambiar // 2017 international conference on intelligent computing and control (I2C2). – IEEE, 2017. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/I2C2.2017.8321880.
16. Morstyn, T. Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: An overview / T. Morstyn, B. Hredzak, V. G. Agelidis // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2016. – Vol. 9, Iss. 4. – P. 3652–3666. – DOI: 10.1109/TSG.2016.2637958.
17. Poggi, A. Extending JADE for agent grid applications / A. Poggi, M. Tomaiuolo, P. Turci // 13th IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises. – IEEE, 2004. – P. 352–357. – DOI: 10.1109/ENABL.2004.30.
18. Bellifemine, F. L. Developing multi-agent systems with JADE / F. L. Bellifemine, G. Caire, D. Greenwood. – Chichester : John Wiley & Sons, 2007. – Vol. 7. – 300 p.
19. Karcan, I. N. Sovremennye poiskovyie sistemy v seti Internet: analiz principov raboty i klassifikaciya / I. N. Karcan, V. V. Kozhevnikov, P. V. Zelenkov // Vestnik NII SUVPT : sb. nauch. tr. / pod obshch. red. N. V. Vasilenko. – Krasnoyarsk : NII SUVPT, 2006. – Vyp. 23. – S. 221–227.
20. Ohtilev, M. YU. Intellektual'naya informacionno-analiticheskaya platforma upravleniya organizatsiyami VKKH / M. YU. Ohtilev, V. N. SHtepa, V. I. Bazhenov // Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya. – 2025. – № 2. – S. 20–29.

Материал поступил 29.06.2026, одобрен 02.07.2026,
принят к публикации 22.07.2026

RESOURCE-UTILITY APPROACH TO ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF LAND RECLAMATION ACTIVITIES IN THE REPUBLIC OF BELARUS

S. V. Makarevich

Candidate of Economic Sciences, Head of the Department of Scientific and Technical Information, RUE "Institute of Land Reclamation", Minsk, Belarus, e-mail: makarevich.serge@gmail.com

Abstract

This article examines the theoretical and methodological issues of assessing the efficiency of land reclamation activities in the Republic of Belarus under increasing requirements for the rational use of natural resources, ensuring food security, and promoting the sustainable development of the agro-industrial sector. The relevance of the study is determined by the need to improve existing approaches to evaluating the results of land reclamation activities, since traditional methods based primarily on cost indicators, profitability, and payback measures do not fully account for the diversity of economic, social, and environmental effects generated by the operation of land reclamation systems.

The purpose of the study is to provide a theoretical justification and develop the methodological foundations of a resource-utility approach to assessing the efficiency of land reclamation activities. The economic essence of land reclamation is revealed as a long-term investment process that affects not only the productivity of agricultural land but also the sustainability of agricultural landscapes, the condition of land and water resources, and the socio-economic development of rural areas.

A system of indicators for resource-utility assessment is proposed, including indicators of resource expenditures and indicators reflecting the overall utility of land reclamation. An algorithm for constructing an integrated efficiency indicator based on the comparison of the total utility of land reclamation outcomes with the volume of resources utilized is developed. The scientific novelty of the study lies in expanding the category of results by incorporating social and environmental effects into the efficiency assessment framework. The practical significance of the proposed approach consists in its potential application for substantiating managerial decisions, determining funding priorities, evaluating the effectiveness of government programs, and improving the management system of the land reclamation sector in the Republic of Belarus.

Keywords: land reclamation, efficiency, resources, utility, agricultural economics.

РЕСУРСНО-ПОЛЕЗНОСТНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МЕЛИОРАЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

С. В. Макаревич

Реферат

В статье рассматриваются теоретические и методологические вопросы оценки эффективности деятельности мелиорации в Республике Беларусь в условиях возрастающих требований к рациональному использованию природных ресурсов, обеспечению продовольственной безопасности и устойчивому развитию агропромышленного комплекса. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования существующих подходов к оценке результатов мелиоративной деятельности, поскольку традиционные методы, основанные преимущественно на стоимостных показателях, показателях рентабельности и окупаемости затрат, не позволяют в полной мере учитывать многообразие экономических, социальных и экологических эффектов, возникающих в процессе функционирования мелиоративных систем.

Цель исследования заключается в теоретическом обосновании и разработке методологических основ ресурсно-полезностного подхода к оценке эффективности деятельности мелиорации. Раскрыта экономическая сущность мелиорации как долгосрочного инвестиционного процесса, оказывающего влияние не только на продуктивность сельскохозяйственных земель, но и на устойчивость агроландшафтов, состояние земельных и водных ресурсов, а также социально-экономическое развитие сельских территорий.

Предложена система показателей ресурсно-полезностной оценки, включающая показатели ресурсных затрат и показатели совокупной полезности мелиорации. Разработан алгоритм формирования интегрального показателя эффективности, основанный на сопоставлении совокупной полезности результатов мелиоративной деятельности с объемом использованных ресурсов. Научная новизна исследования заключается в расширении категории результата за счет включения социальных и экологических эффектов в систему оценки эффективности. Практическая значимость предложенного подхода состоит в возможности его использования при обосновании управленческих решений, определении приоритетов финансирования, оценке результативности государственных программ и совершенствовании системы управления мелиоративным комплексом Республики Беларусь.

Ключевые слова: мелиорация, эффективность, ресурсы, полезность, аграрная экономика.

Introduction

The current stage of development of the agro-industrial complex is characterized by increasingly complex tasks related to the rational use of land and water resources, increasing environmental constraints, and the need to ensure the sustainability of agricultural production. Under these conditions, the importance of land reclamation is growing as a key element of the land management system aimed at regulating soil water regimes and increasing the productivity of agricultural land [1].

In the Republic of Belarus, land reclamation has historically occupied a special place in the structure of agricultural production, due to the sig-

nificant proportion of overly waterlogged and swampy lands [2]. Drainage and regulating land reclamation systems ensure the inclusion of significant areas of agricultural land (15.8 %) into economic circulation and contribute to increased sustainability of crop production [3, 4].

At the same time, given limited financial resources and the need to optimize public spending, the relevance of scientifically based assessments of the effectiveness of land reclamation activities is growing [5, 6]. Traditional approaches to assessing effectiveness, based on comparing costs and economic results, do not fully reflect the multifaceted nature of the impact of land reclamation [7].

A significant portion of its effects manifests itself in the social and environmental spheres, as well as in the strategic provision of food security.

Accordingly, the development of comprehensive methodological approaches that take into account both the resource component of land reclamation activities and the overall utility of their results is becoming increasingly important. One such approach is the resource-utility approach, which focuses on correlating the volume of resources involved with the integrated effect of land reclamation on the economy and society [8].

Results and their discussion

Land reclamation today is a system of organizational, economic, engineering, and agronomic measures aimed at fundamentally improving land properties to enhance their productivity and the sustainability of agricultural production. Economically, land reclamation is a specific type of capital investment, the results of which manifest themselves in the long term. Unlike most production processes, land reclamation impacts not only the volume of output but also the state of natural resources. It shapes the stability of agricultural landscapes, regulates soil water regimes, and influences biogeochemical processes and land use patterns [9]. This necessitates a comprehensive approach to assessing its results.

The economic essence of land reclamation as an object of effectiveness assessment lies in its dual nature. On the one hand, it requires significant financial expenditures, material and labor resources. On the other hand, its results are expressed not only in increased agricultural output but also in the reduction of risks associated with unfavorable natural conditions, as well as in the conservation and restoration of land resources [10].

Thus, land reclamation is an investment process with a high degree of social significance, necessitating the consideration of both private and public effects when assessing its effectiveness.

The concept of efficiency and its interpretation in relation to land reclamation

In economics, efficiency is traditionally viewed as the ratio of the result obtained to the resources used. In its most general form, efficiency is expressed by the formula 1

$$\Theta = P/3, \quad (1)$$

where Θ – performance indicator; P – result; 3 – resource costs.

When applied to land reclamation, this formula requires significant clarification, as the results of land reclamation activities are multifaceted. They include not only increased crop yields or gross output, but also changes in the condition of land and water resources, farming conditions, and the social infrastructure of rural areas.

Therefore, it is appropriate to consider land reclamation effectiveness as an integrated characteristic reflecting the degree to which land reclamation objectives are achieved for a given volume of resources used. This approach expands the concept of "result" to include indicators characterizing the sustainability of land use and the quality of agroecosystems. Given this, land reclamation effectiveness can be defined as the degree of benefit of its results to the economy and society, calculated per unit of resources used.

Limitations of traditional approaches to assessing the effectiveness of land reclamation

Traditional methods for assessing the effectiveness of land reclamation rely primarily on cost indicators, such as the payback period for capital investment, profitability, and growth in gross output. A widely used method is comparative efficiency, which compares management indicators on reclaimed and non-reclaimed lands, or indicators "before" and "after" reclamation measures [11, 12]. These indicators allow one to assess the economic feasibility of individual projects, but do not take into account the overall social and environmental impacts. Typically, the impact of land reclamation on rural employment, changes in the ecological status of land, the role of reclamation systems in preventing soil degradation, and the contribution of land reclamation to food security are often left outside the analysis.

Furthermore, the use of purely cost criteria does not allow for the long-term impact of land reclamation to be taken into account. A significant portion of its effects manifests itself over a long period, making it difficult to adequately reflect them in traditional performance indicators. The above limitations necessitate the search for alternative approaches to assessing the effectiveness of land reclamation, focused on the integration of resource and utility aspects.

The resource-utility approach fundamentally differs from traditional performance assessment methods in its expanded category of outcome. While classical models equate outcome with economic impact, this approach encompasses a system of heterogeneous effects subject to aggregation. The resource-utility approach compares the volume of resources involved in land reclamation activities with the integrated utility of the results obtained. Within this approach, resources are understood as all types of costs supporting the functioning of the land reclamation system, including financial, material, labor, and natural resources. Thus, this approach allows for the incorporation of resource costs and the overall utility of land reclamation into a unified system, creating a methodological basis for more informed management decisions in the management and development of the land reclamation complex.

Methodological foundations of resource-utility assessment of land reclamation efficiency

The development of a resource-utility approach to assessing the effectiveness of land reclamation requires reliance on a combination of general scientific and specific economic principles. This approach is based on the recognition of the multifaceted nature of the results of land reclamation activities and the need to correlate them with the volume of resources used. The basic principles of resource-utility assessment include the principle of comprehensiveness; the principle of comparability; the principle of systematicity; the principle of long-termism; and the principle of target orientation [13, 14, 15, 16]. The implementation of these principles ensures that the assessment of the effectiveness of land reclamation is adequate to its actual socio-economic significance.

For the practical implementation of the resource-utility approach, it is necessary to develop a system of indicators that allows for the quantitative reflection of both the resource and utility components of land reclamation activities. The system of indicators should include:

- 1) *resource cost indicators*, characterizing the volume and structure of resources used;
- 2) *utility indicators*, reflecting the economic, social, and environmental effects of land reclamation.

Resource cost indicators can be expressed in physical and monetary units, while utility indicators often require standardization and aggregation to ensure comparability.

To integrate disparate indicators, it is advisable to use standardization methods that allow them to be converted to a dimensionless form in the range from 0 to 1. This creates the basis for developing integrated indices.

Within the resource-utility approach, resources are understood as a set of factors used in the creation, operation, and development of reclamation systems. They can be conveniently classified into the following main groups.

Financial resources include budgetary allocations, funds from economic entities, and other funding sources allocated for the design, construction, reconstruction and operation of drainage systems:

- capital investments in the construction and reconstruction of drainage systems;
- current operating costs;
- maintenance and repair costs.

This resource group reflects the monetary value of drainage activities and is traditionally used in economic calculations.

Material and technical resources – hydraulic structures, pumping equipment, drainage systems, canals, and technical means for monitoring and managing water conditions:

- hydraulic structures;
- pumping stations;
- drainage and irrigation networks;
- machinery and equipment.

Their condition and level of technical development largely determine the functional reliability of drainage systems and the amount of operating costs.

Labor resources are represented by personnel involved in the design, maintenance, and management of land reclamation systems:

- personnel of operating organizations;
- design and monitoring specialists;
- workers ensuring the operation of the systems.

The quality and qualifications of personnel directly impact the efficiency of land reclamation infrastructure operation and the implementation of innovative technologies.

Natural resources, in the context of land reclamation, include land and water resources involved in economic circulation:

- land;
- water resources;
- soil and ecological potential of territories.

Their use should be considered not only from the standpoint of economic benefit but also from the perspective of preserving natural potential.

Temporal resources reflect the duration of the operation of land reclamation systems and their payback period.

Thus, the resource component of land reclamation is a multi-element system reflecting both the economic and natural aspects of land reclamation activities.

The essence of the benefits of land reclamation and its main forms

The utility of land reclamation can be defined as the cumulative effect of its impact on economic, social, and natural processes. Unlike the category of economic effect, utility includes not only results measured in monetary terms but also intangible effects of social significance. With in the structure of land reclamation utility, it is appropriate to distinguish the following main forms:

Economic utility manifests itself in increased crop yields, increased production stability, and reduced production losses due to unfavorable hydrological conditions. Economic utility indicators may include: increased gross crop output; reduced unit costs; increased land use profitability; and reduced damage from waterlogging and drought.

Economic utility can be expressed in monetary terms, allowing for comparison with resource costs.

The *social utility* of land reclamation is expressed in improved living conditions for rural residents, expanded employment opportunities, and increased sustainability of socioeconomic development. Its main manifestations include: increased employment in rural areas; demographic stabilization; infrastructure development; and improved working conditions in the agricultural sector.

Social effects are primarily qualitative in nature and require the use of expert assessment and indexing methods.

Environmental utility is associated with the impact of land reclamation on the state of natural ecosystems. These benefits manifest themselves in the regulation of soil water regimes, the prevention of land degradation, the reduction of erosion processes, and the preservation of biodiversity. This list demonstrates that the benefits of land reclamation are complex and cannot be reduced to just one: preventing waterlogging and soil erosion; stabilizing groundwater levels; maintaining the productivity of agricultural landscapes; and reducing negative impacts on water bodies.

Environmental benefits can be expressed through prevented damage and indicators of the ecological sustainability of territories.

Exclusively to economic results.

Integral indicator of resource-utility efficiency

A generalized assessment of the effectiveness of land reclamation within the resource-utility approach can be presented as an integrated indicator reflecting the ratio of utility to resources.

In general, this indicator can be written as follows

$$E_M = \frac{\sum_{i=1}^n W_i U_i}{\sum_{j=1}^m R_j}, \quad (2)$$

where E_M – resource-utility efficiency;

W_i – utility weighting indicators;

U_i – standardized utility indicators;

R_j – resource cost indicators.

The use of weighting coefficients allows for consideration of socioeconomic policy priorities and the specific operating conditions of land reclamation systems.

The integrated indicator can be used for comparative analysis of various land reclamation projects, regions, and time periods, as well as to substantiate management decisions in land reclamation development.

The methodological foundations of the resource-utility approach are based on the principles of comprehensiveness, systematicity, and long-term assessment of the results of land reclamation activities. Expanding the category of results to include social and environmental effects allows for a more complete reflection of the societal significance of land reclamation. The development of a system of indicators and an integrated indicator of resource-utility efficiency creates a methodological basis for the practical application of this approach in the public administration system of the agro-industrial complex of the Republic of Belarus.

Algorithm for Resource-Utility Efficiency Assessment

Accordingly, the algorithm for assessing the effectiveness of land reclamation within the resource-utility approach is as follows.

1. *Defining the assessment boundaries.* The object of analysis (reclamation system, district, region), time interval, and set of indicators are selected.

2. *Assessing resource costs.* The total costs for all resource groups are calculated and brought into a comparable form.

3. *Assessing utility.* The economic, social, and environmental effects of the operation of reclamation systems are determined.

4. *Standardizing indicators.* All indicators are converted to a dimensionless scale (e.g., from 0 to 1) to ensure comparability.

5. *Aggregating indicators.* An integrated utility indicator and an integrated resource intensity indicator are formed.

6. *Calculating the integrated efficiency coefficient.*

The integrated efficiency indicator is proposed to be determined using the formula 2

$$E_M = \frac{U}{R}, \quad (3)$$

where E_M – efficiency of land reclamation activities;

U – integrated utility;

R – total resource costs.

The resulting performance indicator values allow for comparison of the effectiveness of various reclamation systems; identification of the most resource-intensive infrastructure elements; determination of modernization priorities; and justification of public funding volumes. Dynamic analysis is particularly important, allowing for the assessment of changes in effectiveness over time and the identification of development trends in the reclamation system.

The resource-utility approach forms the methodological basis for a comprehensive assessment of reclamation effectiveness, taking into account the multifaceted nature of its consequences. The proposed methodology allows for the linking of resource expenditures with economic, social, and environmental outcomes, thereby enhancing the validity of management decisions in the development of the reclamation system.

Conclusion

In the context of increasing demands on the rational use of natural resources [17] and the sustainable development of the agricultural sector [18, 19], the problem of a comprehensive assessment of the effectiveness of land reclamation activities is becoming particularly relevant. Land reclamation in the Republic of Belarus is a key factor in maintaining the productivity of agricultural land [20], stabilizing production and developing rural areas, which necessitates improving methodological approaches to assessing its results.

The conducted study substantiated the feasibility of applying a resource-utility approach to assessing the effectiveness of land reclamation, taking into account not only the economic, but also the social

and environmental consequences of the functioning of land reclamation systems. Unlike traditional methods based primarily on profitability and payback indicators, the proposed approach is focused on identifying the total utility of land reclamation activities in relation to the volume of resources used. The paper reveals the essence of the category of efficiency as applied to the land reclamation complex and demonstrates that it is multifaceted in nature, determined by the interaction of production, social and natural factors. It has been demonstrated that land reclamation generates sustainable economic benefits in the form of increased crop yields and reduced production risks, as well as social benefits such as maintaining employment and rural development, and environmental benefits associated with regulating water regimes and preventing soil degradation.

A resource-utility-based efficiency assessment methodology for land reclamation activities has been developed, including a system of resource cost and utility indicators, an algorithm for their aggregation, and the formation of an integrated efficiency coefficient. Particular attention is paid to standardizing indicators and accounting for difficult-to-formalize social and environmental effects using index and expert methods. The resource-utility approach creates the methodological prerequisites for developing a more sound management system for the land reclamation complex of the Republic of Belarus, focused on achieving economic efficiency while simultaneously ensuring social stability and environmental sustainability.

References

1. Povyshenie effektivnosti meliorativnogo kompleksa Belarusi / A. P. Lihacevich, A. S. Meerovskij, N. K. Vahonin [i dr.] // Melioraciya. – 2004. – № 1. – S. 7–22.
2. Anzhenkov, A. S. Melioraciya i ispol'zovanie osushennyh zemel' / A. S. Anzhenkov // Nauchnye sistemy organizatsii i vedeniya agropromyshlennogo proizvodstva : v 2 ch. – Minsk : Belaruskaya navuka, 2025. – CH. 1, gl. 7. – S. 328–342.
3. Anzhenkov, A. S. Sostoyanie meliorativnyh sistem v Belarusi: zadachi i perspektivy / A. S. Anzhenkov, N. N. Linkevich // Melioraciya. – № 1 (99). – S. 5–12.
4. Pogodin, N. N. Ocenka meliorativnogo sostoyaniya osushennyh zemel' i meropriyatiya po uluchsheniyu ih vodnogo rezhima i produktivnosti / N. N. Pogodin, G. V. Latushkina // Aktual'nye nauchno-tehnicheskie i ekologicheskie problemy melioratsii zemel' : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Gorki, 12 marta 2021 g. – Gorki, 2021. – S. 49.
5. Vahonin, N. K. Informacionnye tekhnologii kak klyuchevoy faktor effektivnosti melioratsii i sel'skohozyajstvennogo ispol'zovaniya zemel' / N. K. Vahonin // Innovacionnye tekhnologii v melioratsii: opyt, strategiya, priority (Skoropanovskie chteniya) : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 110-letiyu Instituta melioratsii i 110-letiyu so dnya rozhdeniya akad. S. G. Skoropanova, Minsk, 5–6 noyab. 2020 g. – Minsk : Belaruskaya navuka. 2021. – S. 18–30.
6. Pogodin, N. N. Kriterii ocenki meliorativnogo sostoyaniya osushennyh zemel' i meropriyatiya po uluchsheniyu ih vodnogo rezhima i produktivnosti / N. N. Pogodin, G. V. Latushkina // Melioraciya. – № 4 (90). – S. 5–11.
7. Anzhenkov, A. S. Primenenie rekomendatsiy po obosnovaniyu ob'emov rabot i zatrat na ih vypolnenie pri normativnom tekhnicheskoy obsluzhivani meliorativnyh sistem / A. S. Anzhenkov, G. YU. Levin // Melioraciya. – № 3 (85). – S. 5–16.
8. El'meev, V. YA. Ekonomicheskoe razvitiye i potrebitel'naya sila obshchestva / V. YA. El'meev // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 6. Gumanitarnye nauki. – 1997. – № 3. – S. 105–111.
9. Lihacevich, A. P. Model' ekologo-ekonomicheskoy ocenki effektivnosti melioratsii zemel' / A. P. Lihacevich // Sovremennyye problemy izucheniya, ispol'zovaniya i ohrany prirodnogo kompleksa Poles'ya: Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. – Minsk, 1998. – S. 16–17.
10. Kolobaev, A. N. Vliyaniye melioratsii zemel' na gidrologicheskij rezhim rek-vodopriemnikov / A. N. Kolobaev, A. I. Mitrahovich, I. CH. Kaz'miruk // Melioraciya. – № 1 (115). – S. 50–55.
11. Metodika ocenki ekonomicheskoy effektivnosti meropriyatij po rekonstrukcii meliorativnyh sistem s uchetom tekhnicheskogo sostoyaniya gidromeliorativnyh ob'ektov, veroyatnostnogo haraktera izmeneniya prirodno-klimaticheskikh uslovij, hozyajstvennyh, ekologicheskikh i social'nyh uslovij funkcionirovaniya melioriruemyh agrolandshaftov, ekologicheskoy cennosti prirodnih ekosistem, stepeni erozii, struktury prirodnih landshaftov i ushcherba zdorov'yu cheloveka. – Kolomna, 2015. – URL: <https://inform-raduga.ru/sites/all/files/2015-04-20-raduga4.pdf> (data obrashcheniya: 20.02.2026).
12. Vremennyye rekomendatsii po raschetu osnovnyh pokazatelej ekonomicheskoy effektivnosti kapital'nyh vlozhenij v melioratsiyu zemel' v tekushchih (prognoznnyh) cenah. – Minsk : Belgiprovodhoz, 1998. – 23 s.
13. Bajnev, V. F. Analiz i upravlenie tekhnologicheskimi kachestvom social'no-ekonomicheskikh processov: zatratno-rezultativnyj podhod, ego teoreticheskie i prikladnye osnovy / V. F. Bajnev, N. F. Zen'chuk // Sovremennaya politekonomiya: klassicheskie tradicii, novye tendentsii: kollektivnaya monografiya / P. S. Lemeschenko, I. A. Lavruhina, T. I. Gleba [i dr.]. – Minsk : BGU, 2025. – 800 s. – S. 773–779.
14. Zen'chuk, N. F. Zatratno-rezultativnyj podhod k analizu i upravleniyu tekhnologicheskimi kachestvom social'no-ekonomicheskikh processov / V. F. Bajnev, N. F. Zen'chuk // Nauka i innovatsii. – 2024. – № 10. – S. 4.
15. Bajnev, V. F. Resursno-poleznostnyj podhod k obespecheniyu tekhnologicheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus' / V. F. Bajnev, S. V. Makarevich // Nauka i innovatsii. – 2023. – Vyp. 5 (243). – S. 27–32.
16. Bajnev, V. F. Poleznostnyj metod analiza nauchno-tehnicheskoy deyatel'nosti / V. F. Bajnev, S. V. Makarevich // Ekonomicheskaya nauka segodnya : sb. nauch. st. / Belorus. nac. tekhn. un-t. – Minsk, 2023. – Vyp. 17. – S. 41–50.
17. Filippova, L. N. Problema racional'nogo ispol'zovaniya prirodnih resursov / L. N. Filippova, E. N. Stepanova // Melioraciya kak drajver modernizatsii APK v usloviyah izmeneniya klimata : materialy V Mezhdunar. nauch.-prakt. internet-konf., Novocheboksarsk, 22–24 apr. 2024 g. – Novocheboksarsk: Lik, 2024. – S. 460–466.
18. Gusakov, V. G. Osnovnyye napravleniya sovershenstvovaniya agrarnoy strategii i politiki / V. G. Gusakov. – Minsk : BGEU, 2007. – 124 s.
19. Gorbatenko, I. Istochniki rosta i ustojchivost' razvitiya agrarnogo sektora Belarusi / I. Gorbatenko // Aktual'nye problemy innovatsionnogo razvitiya agropromyshlennogo kompleksa Belarusi : materialy H Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 90-letiyu ekonomicheskogo fakul'teta, Gorki, 18–19 okt. 2018 g. – Gorki : Belorusskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya, 2019. – CH. 1. – S. 106–113.
20. Anzhenkov, A. S. Istoriya instituta melioratsii (1910–2023 gg.) / A. S. Anzhenkov // Perspektivy i potencial ispol'zovaniya meliorirovannyh zemel' (Skoropanovskie chteniya) : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 2–3 noyab. 2023 g. / Nacional'naya akademiya nauk Belarusi, Nauchno-prakticheskij centr NAN Belarusi po zemledeliyu, Institut melioratsii ; redkol.: A. S. Anzhenkov [i dr.]. – Minsk : Belaruskaya navuka, 2024. – S. 6–12.

Список цитированных источников

1. Повышение эффективности мелиоративного комплекса Беларуси / А. П. Лихачевич, А. С. Мееровский, Н. К. Вахонин [и др.] // Мелиорация. – 2004. – № 1. – С. 7–22.
2. Анженков, А. С. Мелиорация и использование осушенных земель / А. С. Анженков // Научные системы организации и ведения агропромышленного производства : в 2 ч. – Минск : Белорусская наука, 2025. – Ч. 1, гл. 7. – С. 328–342.
3. Анженков, А. С. Состояние мелиоративных систем в Беларуси: задачи и перспективы / А. С. Анженков, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. – № 1 (99). – С. 5–12.

4. Погодин, Н. Н. Оценка мелиоративного состояния осушенных земель и мероприятия по улучшению их водного режима и продуктивности / Н. Н. Погодин, Г. В. Латушкина // Актуальные научно-технические и экологические проблемы мелиорации земель : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Горки, 12 марта 2021 г. – Горки, 2021. – С. 49.
5. Вахонин, Н. К. Информационные технологии как ключевой фактор эффективности мелиорации и сельскохозяйственного использования земель / Н. К. Вахонин // Инновационные технологии в ме-лиорации: опыт, стратегия, приоритеты (Скоропановские чтения) : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 110-летию Института мелиорации и 110-летию со дня рождения акад. С. Г. Скоропанова, Минск, 5–6 нояб. 2020 г. – Минск : Беларуская навука. 2021. – С. 18–30.
6. Погодин, Н. Н. Критерии оценки мелиоративного состояния осушенных земель и мероприятия по улучшению их водного режима и продуктивности / Н. Н. Погодин, Г. В. Латушкина // Мелиорация. – № 4 (90). – 5–11.
7. Анженков, А. С. Применение рекомендаций по обоснованию объемов работ и затрат на их выполнение при нормативном техническом обслуживании мелиоративных систем / А. С. Анженков, Г. Ю. Левин // Мелиорация. – № 3 (85). – С. 5–16.
8. Ельмеев, В. Я. Экономическое развитие и потребительная сила общества / В. Я. Ельмеев // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 6. Гуманитарные науки. – 1997. – № 3. – С. 105–111.
9. Лихацевич, А. П. Модель эколого-экономической оценки эффективности мелиорации земель / А. П. Лихацевич // Современные проблемы изучения, использования и охраны природного комплекса Полесья: Тезисы докладов международной научной конференции. – Минск, 1998. – С. 16–17.
10. Колобаев, А. Н. Влияние мелиорации земель на гидрологический режим рек-водоприемников / А. Н. Колобаев, А. И. Митрахович, И. Ч. Казмирук // Мелиорация. – № 1 (115). – С. 50–55.
11. Методика оценки экономической эффективности мероприятий по реконструкции мелиоративных систем с учетом технического состояния гидромелиоративных объектов, вероятностного характера изменения природно-климатических условий, хозяйственных, экологических и социальных условий функционирования мелиорируемых агроландшафтов, экологической ценности природных экосистем, степени эрозии, структуры природных ландшафтов и ущерба здоровью человека. – Коломна, 2015. – URL: <https://inform-raduga.ru/sites/all/files/2015-04-20-raduga4.pdf> (дата обращения: 20.02.2026).
12. Временные рекомендации по расчету основных показателей экономической эффективности капитальных вложений в мелиорацию земель в текущих (прогнозных) ценах. – Минск : Белгипроводхоз, 1998. – 23 с.
13. Байнев, В. Ф. Анализ и управление технологическим качеством социально-экономических процессов: затратно-результативный подход, его теоретические и прикладные основы / В. Ф. Байнев, Н. Ф. Зеньчук // Современная политэкономия: классические традиции, новые тенденции: коллективная монография / П. С. Лемещенко, И. А. Лаврухина, Т. И. Глеба [и др.]. – Минск : БГУ, 2025. – 800 с. – С. 773–779.
14. Зеньчук, Н. Ф. Затратно-результативный подход к анализу и управлению технологическим качеством социально-экономических процессов / В. Ф. Байнев, Н. Ф. Зеньчук // Наука и инновации. – 2024. – № 10. – С. 4.
15. Байнев, В. Ф. Ресурсно-полезностный подход к обеспечению технологической безопасности Республики Беларусь / В. Ф. Байнев, С. В. Макаревич // Наука и инновации. – 2023. – Вып. 5 (243). – С. 27–32.
16. Bajnev, V. F. Poleznostnyj metod analiza nauchno-tehnicheskoy deyatel'nosti / V. F. Bajnev, S. V. Makarevich // Ekonomicheskaya nauka segodnya : sb. nauch. st. / Belarus. nac. tekhn. un-t. – Minsk, 2023. – Vyp. 17. – S. 41–50.
17. Филиппова, Л. Н. Проблема рационального использования природных ресурсов / Л. Н. Филиппова, Э. Н. Степанова // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата : материалы V Междунар. науч.-практ. интернет-конф., Новочеркасск, 22–24 апр. 2024 г. – Новочеркасск: Лик, 2024. – С. 460–466.
18. Гусаков, В. Г. Основные направления совершенствования аграрной стратегии и политики / В. Г. Гусаков. – Минск : БГЭУ, 2007. – 124 с.
19. Горбатенко, И. Источники роста и устойчивость развития аграрного сектора Беларуси / И. Горбатенко // Актуальные проблемы инновационного развития агропромышленного комплекса Беларуси : материалы X Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию экономического факультета, Горки, 18–19 окт. 2018 г. – Горки : Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2019. – Ч. 1. – С. 106–113.
20. Анженков, А. С. История института мелиорации (1910–2023 гг.) / А. С. Анженков // Перспективы и потенциал использования мелиорированных земель (Скоропановские чтения) : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2–3 нояб. 2023 г. / Национальная академия наук Беларуси, Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию, Институт мелиорации ; редкол.: А. С. Анженков [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2024. – С. 6–12.

Материал поступил 28.05.2026, одобрен 02.06.2026, принят к публикации 16.06.2026

UDC 656.1/.5; 005; 656.073.9; 338.35; 338.1

METHODOLOGY FOR MODELING THE GROSS OUTPUT OF FREIGHT TRANSPORTATION IN INTERNATIONAL TRAFFIC

D. N. Mesnik

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Marketing Department, Belarusian State Economic University, Minsk, Belarus, e-mail: metelskyi.d308@gmail.com

Abstract

This study presents a comprehensive analysis of methodological contradictions identified in the process of modelling the gross output of freight transport services in international communication. Two mutually exclusive assumptions have been established that create a conceptual gap in the system of equations and undermine the logical integrity of the model. These contradictions arise from the conflation of gross output and value-added concepts, the omission of domestic consumption of transport services, the disregard of price differentials between embedded and direct transport services, and the absence of the transit component in the baseline model specification. In this regard, a three-stage methodology for resolving the identified contradictions is developed: the first stage involves the decomposition of gross output into four structural components (direct export, embedded services, transit, and import-related services); the second stage establishes balance relationships between gross output and net export of transport services; the third stage introduces corrective coefficients for export orientation and intermediate consumption. An alternative model is proposed based on a three-scenario decomposition of the value-added creation mechanism in the transport sector: a direct export growth scenario, a transit development scenario, and an import substitution scenario in transport activities. The production function of the transport sector is specified in the Cobb – Douglas form, incorporating capital, labour, investment, and total factor productivity. The empirical illustration encompasses a complete cycle of numerical calculations with economic interpretation of structural shock and adaptation dynamics of the transport sector. The balance identity of the model is verified on conditional data of the transport sector of the Republic of Belarus. The developed methodology serves as a foundation for in-depth analysis of the transport sector, substantiation of managerial decisions in transport and foreign trade policy, and medium-term forecasting with in the EAEU. The novelty of the study lies in forming a consistent system of structural equations that eliminates logical incompatibilities of previous formulations and ensures unambiguous identifiability of model parameters.

Keywords: gross output of transport services, net export, methodological contradictions, balance relationships, production function, Cobb – Douglas model, total factor productivity, structural shocks, transit economy, EAEU.

МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВАЛОВОГО ВЫПУСКА ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК В МЕЖДУНАРОДНОМ СООБЩЕНИИ

Д. Н. Месник

Реферат

Настоящее исследование представляет собой комплексный анализ методологических противоречий, выявленных в процессе моделирования валового выпуска грузовых перевозок в международном сообщении. Установлено наличие двух взаимоисключающих допущений, создающих концептуальный разрыв в системе уравнений и подрывающих логическую целостность модели. Данные противоречия возникают вследствие смешения концепций валового выпуска и добавленной стоимости, игнорирования внутреннего потребления транспортных услуг, не учета ценовых различий между встроенными и прямыми транспортными услугами, а также отсутствия транзитной компоненты в базовой спецификации модели. В этой связи разработана трехэтапная методология устранения выявленных противоречий: первый этап – декомпозиция валового выпуска на четыре структурных компонента (прямой экспорт, встроенные услуги, транзит, услуги по импорту); второй этап – установление балансовых соотношений между валовым выпуском и чистым экспортом транспортных услуг; третий этап – введение корректирующих коэффициентов экспортной ориентации и промежуточного потребления. Предложена альтернативная модель, основанная на трехсценарной декомпозиции механизма созидания добавленной стоимости транспортного сектора: сценарий роста прямого экспорта, сценарий развития транзита и сценарий импортозамещения в транспортной деятельности. Производственная функция транспортного сектора специфицирована в форме Кобба – Дугласа с включением капитала, труда, инвестиций и совокупной факторной производительности. Эмпирическая иллюстрация включает полный цикл численных расчетов с экономической интерпретацией структурных шоков и динамики адаптации транспортного сектора. Балансовое тождество модели верифицировано на условных данных транспортного сектора Республики Беларусь. Разработанная методология является основой для углубленного анализа транспортного сектора, обоснования управленческих решений в области транспортной и внешнеторговой политики, построения среднесрочных прогнозов в рамках ЕАЭС. Новизна исследования состоит в формировании согласованной системы структурных уравнений, устраняющих логические несовместимости предшествующих формулировок и обеспечивающей однозначную идентифицируемость параметров модели.

Ключевые слова: валовой выпуск транспортных услуг, чистый экспорт, методологические противоречия, балансовые соотношения, производственная функция, модель Кобба – Дугласа, совокупная факторная производительность, структурные шоки, транзитная экономика, ЕАЭС.

Introduction

Modelling the gross output of transport services in international traffic represents one of the most complex challenges in modern economic theory, situated at the intersection of international trade theory, national accounting, and sectoral economics [1, 8, 14]. This problem is particularly acute in the context of small open economies with a high share of transit transportation, where the transport sector accounts for a significant portion of net export of services [11, 21]. For the Republic of Belarus – a country with pronounced transit potential – the share of transport services in total export of services has historically exceeded 40 %, underscoring the strategic importance of accurate modelling of this sector [5, 11].

The existence of two mutually exclusive statements in the system of equations, identified during preliminary research, does not constitute a trivial methodological error but represents a fundamental problem affecting the conceptual foundations of the model [1]. The contradiction reflects the incompleteness of the theoretical framework and has necessitated further investigation and revision of the methodological apparatus. Similar problems of methodological incompleteness in transport system modelling have been noted by a number of researchers [2, 3, 12]; however, no systematic solution applicable to the foreign trade component of the transport sector has previously been proposed.

Analysis of the presented systems of equations has established two mutually exclusive statements that function as assumptions (constraints) of the model [1, 13]. The first states that the gross output of freight transportation in international traffic is represented as the sum of the value of transport services embedded in the cost of export-oriented goods. The second states that this sum balances with net export ($X_{n\text{ транс}}$); however, net export is self-evidently not identical to the gross output of freight transportation in international traffic [15, 19].

The logical incompatibility of these statements is evident: the use of an approximate equality operator alongside a simultaneous assertion of inequality creates methodological ambiguity [4, 16, 17]. The degree of criticality of the identified contradiction is assessed as high on the following grounds: first, mutually exclusive assumptions undermine the logical integrity of the model and render unambiguous interpretation of results impossible; second, in the presence of contradictory assumptions, empirical testing of the model becomes meaningless; third, using a model with internal contradictions to substantiate managerial decisions may lead to systematic errors in transport and foreign trade policy [6, 7, 9, 18].

The violation of the identifiability principle for structural equations precludes the possibility of obtaining consistent parameter estimates [16, 17]. Consequently, resolving this contradiction is a priority task, without which further use of the model is inadmissible from the standpoint of scientific accuracy and rigour. This article proposes an original methodology for addressing this task, tested on data from the transport sector of the Republic of Belarus [2, 5, 11].

Research Methodology

The theoretical and methodological foundation of the study comprises the provisions of the System of National Accounts (SNA 2008) [13], the theory of production functions [8, 9], the Leontief input-output balance methodology, and contemporary approaches to transport sector modelling in a small open economy [3, 12, 20]. The information base is formed by data from the National Statistical Committee of the Republic of Belarus [5, 11], the National Bank of the Republic of Belarus [6, 7], the Eurasian Economic Commission [18], and the International Monetary Fund [19].

To eliminate the identified contradictions, it is necessary to identify their sources. The analysis reveals the following causes of incompatible statements: conflation of gross output and value-added concepts – gross output includes intermediate consumption [13], whereas net export in the SNA is recorded at value added; omission of domestic consumption of transport services; disregard of price differentials between embedded and direct transport services; absence of the transit component,

$$X_{n\text{ транс}}(t) = (TC_{\text{пр экс}}(t) + TC_{\text{гр}}(t) + TC_{\text{транзит}}(t)) - TC_{\text{импорт}}(t). \quad (5)$$

If $X_{n\text{ транс}}(t) > 0$, a positive balance is observed – the country is a net exporter of transport services; if $X_{n\text{ транс}}(t) < 0$ – it is a net importer; $X_{n\text{ транс}}(t) = 0$ indicates a balance of export and import [5, 19]. Net export is an indicator of the international competitiveness of the transport sector and its contribution to the country's balance of payments [18, 19].

For the Republic of Belarus, which has traditionally been a net exporter of transport services, this indicator is of particular significance: transit revenues (primarily from pipeline and railway transport) account for a substantial share of services exports [5, 11, 21].

Stage 3. Introduction of Corrective Coefficients

To establish a precise relationship between gross output and net export, corrective coefficients are introduced [4, 16]

$$X_{n\text{ тр}} = \alpha \times B_{\text{гр транс}} - \beta \times InC_{\text{транс}}, \quad (6)$$

where α – export orientation coefficient of transport services ($0 < \alpha \leq 1$); β – intermediate consumption coefficient; $InC_{\text{транс}}$ – intermediate consumption of transport services, representing the value of goods and services consumed in the process of producing transport services during the reporting period: expenditures on fuel and energy, materials and spare parts, services of other sectors, rent, communications and telecommunications [3, 13].

Taking into account the proposed methodology, the system of equations takes the following form (1) production equation $B_{\text{гр транс}}(t) = F(K(t), L(t), I(t), TFP(t))$; (2) distribution equation

which forms a significant share of gross output of transport services in transit states [11, 21].

In this regard, a three-stage strategy for eliminating the identified methodological contradictions is proposed, which ensures the transition from partial to full specification of the model of gross output of transport services in international traffic. This approach is consistent with the principles of constructing consistent econometric systems [16, 17] and with the requirements for identifiability of structural models [4, 15].

Stage 1. Decomposition of Gross Output of Transport Services

The gross output of the transport sector in the reporting period ($B_{\text{гр транс}}$) is an indicator of the productive capacity of the transport sector, reflecting the total volume of production activity without deducting intermediate costs. The gross output of transport services in international traffic should be represented as the sum of four components [3, 13]:

$$B_{\text{гр транс}} = TC_{\text{пр экс}} + TC_{\text{гр}} + TC_{\text{транзит}} + TC_{\text{импорт}}, \quad (1)$$

where $B_{\text{гр транс}}$ – gross output of transport services; $TC_{\text{пр экс}}$ – direct transport services for export (sold separately); $TC_{\text{гр}}$ – embedded (indirect) transport services included in the value of exported goods from other sectors; $TC_{\text{транзит}}$ – transit transportation of goods of third countries; $TC_{\text{импорт}}$ – transport services related to import. This decomposition conforms to the methodological principles of SNA 2008 and allows the conceptual incompleteness of the baseline specification to be eliminated [13, 19].

Stage 2. Establishing the Relationship with Net Export

Net export of transport services is defined as the difference between export and import of transport services, showing the foreign trade balance of the sector [13, 19]

$$X_{n\text{ транс}} = EX_{\text{транс}} - IM_{\text{транс}}, \quad (2)$$

where the export of transport services includes direct export, embedded export, and the transit component

$$EX_{\text{транс}} = TC_{\text{пр экс}} + TC_{\text{гр}} + TC_{\text{транзит}}. \quad (3)$$

And the import of transport services determines payments to foreign carriers

$$IM_{\text{транс}} = TC_{\text{импорт}}. \quad (4)$$

The net export ($X_{n\text{ транс}}(t)$) of transport services in the reporting period (t) is calculated as

$$B_{\text{гр транс}}(t) = VA_{\text{транс}}(t) + InC_{\text{транс}}(t); \quad (3) \text{ equation linking to foreign trade } VA_{\text{транс}}(t) = X_{n\text{ транс}}(t) + D_{\text{транс}}(t); \quad (4) \text{ net export equation } X_{n\text{ транс}}(t) = (TC_{\text{пр экс}}(t) + TC_{\text{гр}}(t) + TC_{\text{транзит}}(t)) - TC_{\text{импорт}}(t); \quad (5) \text{ balance identity } B_{\text{гр транс}}(t) = InC_{\text{транс}}(t) + X_{n\text{ транс}}(t) + D_{\text{транс}}(t),$$

where $D_{\text{транс}}(t)$ – domestic final use of transport services in period (t). Thus, the logical incompatibility is eliminated: the new formulation contains a precise mathematical relationship without ambiguity [8, 16, 17].

Research Results

The proposed system of equations constitutes a consistent model of the transport sector integrating production and foreign trade aspects. The modification of the first assumption ensures comprehensive coverage of all types of transport activity: direct transport services ($TC_{\text{пр экс}}(t)$); embedded (indirect) transport services ($TC_{\text{гр}}(t)$); the transit component ($TC_{\text{транзит}}(t)$); services for import handling (part of $InC_{\text{транс}}(t)$ and $D_{\text{транс}}(t)$) [3, 13, 21].

The replacement of the second assumption with a precise relationship entails: instead of the claim that components “balance”, a precise mathematical relationship is established $X_{n\text{ транс}}(t) = B_{\text{гр транс}}(t) - InC_{\text{транс}}(t) - D_{\text{транс}}(t)$. This equation unambiguously links net export to gross output through intermediate consumption and domestic use, consistent with SNA 2008 standards [15, 13, 19].

The production function of the transport sector is specified in the Cobb-Douglas form [2, 8, 9]

$$B_{\text{гр}}^{\text{транс}}(t) = A \times TFP(t) \times K^{\alpha}(t) \times L^{\beta}(t) \times I^{\gamma}(t), \quad (7)$$

where α, β, γ – elasticity coefficients with respect to the respective production factors; A – scale (calibration) multiplier; $TFP(t)$ – total factor productivity index. According to research by Grechishkina E. A. and Vasilchenko A. O. [20], the arithmetic mean value of TFP for the economy of the Republic of Belarus over the period 2010–2023 amounts to 2,2485 ranging from 2,05 (2021) to 2,55 (2023), reflecting successful adaptation to changing operating conditions and intensification of trade cooperation within the EAEU [18, 20].

The practical application envisages three scenarios for interpreting the revised assumptions. The first scenario is growth in direct export of transport services: an increase in $TC_{\text{пр экс}}(t)$ with other components unchanged leads to growth in $X_{\text{н транс}}(t)$ with constant $B_{\text{гр}}^{\text{транс}}(t)$. The second scenario is transit development ($TC_{\text{транзит}}(t)$): transit constitutes pure export creates a multiplier effect through intermediate demand (fuel, services, etc.), and may require infrastructure investments [11, 18, 21]. The third scenario is import substitution in transport activities: replacing foreign carriers with national ones increases $X_{\text{н транс}}(t)$ even at unchanged export volumes and raises the utilization of the domestic transport sector [5, 11].

Components of the Production Function of the Transport Sector

Capital $K(t)$ represents the value of fixed assets of the transport sector and encompasses: transport vehicles (automobiles, rolling stock, vessels, aircraft); transport infrastructure (roads, bridges, railway tracks, ports, airports, terminals); buildings and structures, equipment and machinery. Capital dynamics follow the formula

$$K(t+1) = K(t) + (t) - \delta \times K(t), \quad (8)$$

where δ – depreciation (retirement) rate of capital; $I(t)$ – investment in period t [3, 13].

Labour ($L(t)$) represents the quantity of labour resources employed in the transport sector during the period, encompassing all employed persons: drivers and train operators; pilots, dispatchers, technical, and administrative-managerial personnel. Units of measurement include: number of employees (persons); man-hours, full-time equivalent (FTE). Labour as a factor of production represents the human resource of production, whose change in quantity or quality directly affects the production capacity of the transport sector [3, 13].

Investment $I(t)$ is represented by capital expenditures for the development of the transport sector during the period, directed towards the acquisition, creation, or modernization of fixed assets, and encompasses the following areas: acquisition of new transport vehicles; construction and modernization of infrastructure; procurement of equipment and machinery; implementation of information systems; research and development in the field of transport.

Total Factor Productivity ($TFP(t)$) is an indicator of technological production efficiency, measuring the contribution of technological progress, innovation, organizational improvements, and other intangible factors [8, 10]. It is calculated as the Solow residual [8]

$$TFP(t) = \frac{B_{\text{гр}}^{\text{транс}}(t)}{F(K(t), L(t), I(t))}, \quad (9)$$

where $F(K(t), L(t), I(t))$ – the production function excluding technological progress.

This indicator is subject to the influence: of technological innovations, organizational improvements, workforce upskilling, improvements in the institutional environment, network effects, digitalization and process automation [2, 20].

Components of Transport Services Export

Direct export of transport services ($TC_{\text{пр экс}}(t)$) represents transport services rendered directly to foreign residents by national carriers: international freight transportation on order of foreign companies; charter of transport vehicles by foreign customers; port and airport services for foreign carriers; forwarding services for foreign clients. These data are recorded under the item "Transport Services" in the "Services" section of the current account of the balance of payments [18, 19].

Embedded (indirect) export of transport services ($TC_{\text{гр}}(t)$) – transport services included in the value of exported goods of other economic sectors. It is calculated through coefficients of direct and total expenditures from input-output tables

$$TC_{\text{гр}} = \sum_{j \neq \text{транс}} a_{\text{транс}j} \times EX_j, \quad (10)$$

where $a_{\text{транс}j}$ – coefficient of direct expenditures of transport services of economic activity type j ; EX_j – export of economic activity type j .

Embedded (indirect) export shows the indirect contribution of the transport sector to the country's sector through servicing other exporters [3, 13].

Transit transport services ($TC_{\text{транзит}}(t)$) – services for the transportation of goods and passengers through the country's territory without their domestic consumption. Transit does not increase the domestic GDP of producing economic activity types and is entirely attributed to the export of transport services. For the Republic of Belarus, significant examples include: transit of natural gas from the Russian Federation to EU countries through Belarusian territory; rail transit of containers from China to EU countries; transit of oil and petroleum products through pipeline systems [5, 11, 18].

The Cobb-Douglas production function (equation 1) for the transport sector takes the form [2, 10]

$$B_{\text{гр}}^{\text{транс}}(t) = A_{\text{транс}} \times TFP_{\text{транс}}(t) \times K_{\text{транс}}^{0,45}(t) \times L_{\text{транс}}^{0,35}(t) \times I_{\text{транс}}^{0,10}(t)$$

The following data are given: $K_{\text{транс}}(t) = 500$ bln conventional units; $L_{\text{транс}}(t) = 1,2$ mln people; $I_{\text{транс}}(t) = 50$ bln conventional units; $InC_{\text{транс}}(t) = 180$ bln conventional units; $TFP_{\text{транс}}(t) = 1,15$; $A_{\text{транс}} = 0,50$; $c = 20$; $\alpha_{\text{транс}} = 0,45$; $\beta_{\text{транс}} = 0,35$; $\gamma_{\text{транс}} = 0,90$; $TC_{\text{пр экс}}(t) = 45$ bln conventional units; $TC_{\text{гр}}(t) = 28$ bln conventional units; $TC_{\text{транзит}}(t) = 15$ bln conventional units; $TC_{\text{импорт}}(t) = 32$ bln conventional units. Production function calculation

$$B_{\text{гр}}^{\text{транс}}(t) = 0,50 \times 1,15 \times 500^{0,45} \times 1,2^{0,35} \times 50^{0,10} = 14,92.$$

Multiplied by the scale coefficient $B_{\text{гр}}^{\text{транс}}(t) = 14,92 \times 20 = 298,40$ bln conventional units [2, 10]. Gross Value Added calculation (equation 2)

$$VA_{\text{транс}}(t) = B_{\text{гр}}^{\text{транс}}(t) - InC_{\text{транс}}(t) = 298,40 - 180 = 118,40 \text{ bln conventional units.}$$

Net export calculation (equation 4)

$$X_{\text{н транс}}(t) = (TC_{\text{пр экс}}(t) + TC_{\text{гр}}(t) + TC_{\text{транзит}}(t)) - TC_{\text{импорт}}(t) = (45,00 + 28,00 + 15,00) - 32,00 = 56,00 \text{ bln conventional units.}$$

Domestic final use calculation (equation 3)

$$D_{\text{транс}}(t) = VA_{\text{транс}}(t) - X_{\text{н транс}}(t) = 118,40 - 56,00 = 62,40 \text{ bln conventional units.}$$

Balance identity verification (equation 5)

$$B_{\text{гр}}^{\text{транс}}(t) = InC_{\text{транс}}(t) + X_{\text{н транс}}(t) + D_{\text{транс}}(t). \\ 298,40 \text{ bln conventional units} = 180,00 + 56,00 + 62,40 = 298,40 \text{ bln conventional units.}$$

The balance converges; consequently, the model is consistent. This result confirms the correctness of the proposed methodology for eliminating the identified contradictions [4, 16, 17].

The dynamics of TFP in the transport sector of the Republic of Belarus serve as a leading indicator of technological shifts. The growth of the indicator from 2,05 to 2,55 over the period 2010–2023 reflects the successful adaptation of the economy to changed operating conditions, the establishment of new supply chains, and the intensification of trade cooperation within the EAEU [5, 18, 20].

Discussion of Results and Scientific Novelty

The proposed three-stage methodology represents a new instrumental solution to the problem of correct modelling of the gross output of transport services in international traffic. Unlike previously

approaches [1, 3, 12], this methodology provides: complete decomposition of gross output with the identification of the transit component; strict balance identities that exclude logical incompatibility; a built-in verification mechanism through checking the balance identity; compatibility with the requirements of SNA 2008 [13] and the IMF balance of payments methodology [19].

The scientific novelty of the study consists in the following. First, a system of structural equations is proposed for the first time in which logical contradictions between statements about gross output and net export aggregates of transport services are eliminated. Second, a mechanism is developed for introducing corrective coefficients (export orientation and intermediate consumption), enabling formalization of the relationship between macroaggregates while preserving the economic meaningfulness of the model. Third, the Cobb – Douglas production function is adapted for the transport sector of a small open transit economy, accounting for the specifics of the Belarusian institutional environment [2, 10, 20].

Comparison with the international analogues shows that the application of production functions in the transport sector is widespread in global research practice [3, 12]. At the same time, the specifics of small transit economies with a high share of transport services exports in GDP remain insufficiently studied [19, 21]. The present study fills this gap by proposing a solution relevant for EAEU member states with similar transport sector characteristics [5, 18].

Data requirements for the proposed new model include: from national accounts compilations – gross output of the transport sector, intermediate consumption, gross value added, gross fixed capital formation; from the country's balance of payments – export and import of transport services; from input-output tables – coefficients of direct expenditures of transport services; from transport sector statistical publications – value of fixed assets, number of employees volume of transit transportation [5, 13, 18, 19].

Methods for estimating model parameters include: ordinary least squares (OLS) for linear and non-linear forms; panel methods when regional data are available, and others. Total factor productivity is estimated using the index method (Divisia index, Tornqvist index), calculation of the Solow residual [8], stochastic frontier analysis (SFA), or data envelopment analysis (DEA) [10, 16, 17]. The calculation of embedded export is performed using matrices of direct and total expenditures from input-output tables based on the Leontief input-output balance model [3, 13].

Conclusion

The presented system of equations constitutes a consistent model of the transport sector integrating production and foreign trade aspects. The revised version of the model eliminates the logical contradictions of previous formulations by establishing precise mathematical relationships between gross output, intermediate consumption, value added, net export, domestic use [13, 16, 19].

The functioning of the proposed model requires the fulfilment of a number of conditions: availability of data on all components of gross output of transport services in terms of direct export, embedded services, transit, and import; correct identification of the value of transport services embedded in the cost of exported products; comparability of the price base (FOB, CIF, ex-border), and the affiliation of data on all variables to the same reporting period [13, 19].

The mechanism of value added growth in freight transportation in international traffic is sensitive to the growth rate of final and intermediate consumption of services by national carriers in the domestic market and less sensitive to changes in net taxes on products [4, 9, 16]. The product of the technical coefficient and the total factor productivity index characterizes a relatively high baseline level of factor productivity of the Belarusian economy, achieved through significant public investment in fixed capital and the preservation of industrial potential [2, 20].

The model serves as a foundation for in-depth analysis of the transport sector, development of forecasts for its advancement, substantiation of economic policy measures in transport and logistics in the context of EAEU development and Eurasian transport-logistics integration [11, 18, 21]. Further research envisages empirical verification of the model on real statistical data, expansion of the specification to account for the digitalization of the transport sector, and construction of forecast scenarios with a horizon to 2030 [5, 6, 7, 18].

References

1. Mesnik, D. N. Nauchno-metodologicheskie osnovy ispol'zovaniya modeli gruzovyh avtomobil'nyh perevozok v sisteme adaptatsii k vneshneekonomicheskim vyzovam / D. N. Mesnik, A. K. Hodas // Vesti instituta predprinimatel'skoj deyatel'nosti. – 2023. – № 2 (29). – S. 42–55.
2. Rybak, K. A. Vliyanie nauchno-tehnicheskogo progressa na VVP Belarusi: analiz na osnove proizvodstvennoj funktsii Kobba-Duglasa / K. A. Rybak // Doklady BGUIR. – 2021. – № 19 (3). – S. 62–68.
3. Skal'skaya, N. O. Proizvodstvennye funktsii v ekonometricheskom analize i ih ispol'zovanie v scenarnykh raschetakh ekonomicheskikh pokazatelej Respubliki Belarus' / N. O. Skal'skaya, M. A. Pervushina, V. V. YUhnovich // Sbornik nauchnykh trudov BGEU. – 2025. – Vyp. 14. – S. 357–361.
4. CHubrik, A. Ekonomicheskij rost v Belarusi i Pol'she: teoriya rosta i politekonomiya / A. CHubrik // Rabochie materialy IPM. – 2003. – WP/03/02. – 56 s.
5. Oficial'naya statistika // Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika> (data obrashcheniya: 22.03.2026).
6. Otchet Nacional'nogo banka Respubliki Belarus'. – URL: <https://www.nbrb.by/publications/report> (data obrashcheniya: 22.03.2026).
7. Ocenka ravnovesnogo real'nogo VVP s ispol'zovaniem proizvodstvennoj funktsii. – URL: <https://www.nbrb.by/bv/pdf/articles/8303.pdf> (data obrashcheniya: 22.03.2026).
8. Solow, R. M. Technical Change and Aggregate Production Function / R. M. Solow // The Review of Economics and Statistics. – 1957. – Vol. 39, No. 3. – P. 312–320.
9. Barro, R. J. Economics Growth / R. J. Barro, X. Sala-i-Martin. – 2nd ed. – Cambridge : MIT Press, 2004. – 654 p.
10. Deardorff, A.V. Comparative Advantage and International Trade Theory / A. V. Deardorff // Journal of International Economics. – 2014. – Vol. 94, No. 2. – P. 139–153.
11. Transport v Respublike Belarus', 2022 // Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_brochures/index_52718 (data obrashcheniya: 22.03.2026).
12. Magnus, YA. R. Ekonometrika. Nachal'nyj kurs / YA. R. Magnus, P. K. Katyshev, A. A. Pereisekij. – 6-e izd. – M. : Delo, 2004. – 576 s.
13. Sistema nacional'nyh schetov 2008 (SNS-2008). – N'yu-York : Organizatsiya Ob'edinennykh Natsij, 2012. – 727 s.
14. Panevchik, V. V. K koncepcii sbalansirovannogo razvitiya otraslej ekonomiki (na primere transporta) / V. V. Panevchik, V. N. Malinovskij // Vestnik asociacii belorusskikh bankov. – 2023. – № 45 (1012). – S. 34–42.
15. Greene, W. H. Econometric Analysis / W. H. Greene. – 8th ed. – New York : Pearson, 2018. – 1168 p.
16. Hamilton, J. D. Time Series Analysis / J. D. Hamilton. – Princeton : Princeton University Press, 1994. – 799 p.
17. Wooldridge, J. M. Introductory Econometrics: A Modern Approach / J. M. Wooldridge. 7th ed. – Boston : Cengage Learning. 2020. – 912 p.
18. Evrazijskaya ekonomicheskaya komissiya. Statistika vneshnej i vzaimnoj torgovii tovarami / Evraz. ekon. komis. – M. : EEK, 2024. – 210 s.
19. Mezhdunarodnyj valyutnyj fond. Rukovodstvo po platěžnomu balansu i mezhdunarodnoj investicionnoj pozicii (RPB7) / Mezhdunar. valyut. fond. – Vashington, O. K. : MVF, 2023. – 340 s.
20. Grechishkina, E. A. Analiz sovokupnoj faktornoj proizvoditel'nosti Respubliki Belarus': retrospektivnaya dekompozitsiya faktorov ekonomicheskogo rosta / E. A. Grechishkina, A. O. Vasil'chenko // Ekonomika i banki. – 2024. – № 1. – S. 52–62.
21. Dutina, A. A. Odnofaktornye modeli rosta vyruchki logisticheskikh centrov i eksporta transportnykh uslug Belarusi / A. A. Dutina, D. A. Tomut' // Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika. – 2022. – № 2. – S. 24–29.
22. Koroleva, E. A. Modeli i metody agregatsii v konsensus-prognoz eksporta transportnykh uslug Belarusi i drugih stran EAES : avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk / E. A. Koroleva. – Minsk : BGU, 2022. – 25 s.
23. World Bank. Belarus: Transport Sector Policy Note. – Washington, D. C. : World Bank, 2010. – DOI: 10.1596/19462.

Список цитированных источников

1. Месник, Д. Н. Научно-методологические основы использования модели грузовых автомобильных перевозок в системе адаптации к внешнеэкономическим вызовам / Д. Н. Месник, А. К. Ходас // Вести института предпринимательской деятельности. – 2023. – № 2 (29). – С. 42–55.
2. Рыбак, К. А. Влияние научно-технического прогресса на ВВП Беларуси: анализ на основе производственной функции Кобба-Дугласа / К. А. Рыбак // Доклады БГУИР. – 2021. – № 19 (3). – С. 62–68.
3. Скальская, Н. О. Производственные функции в эконометрическом анализе и их использование в сценарных расчетах экономических показателей Республики Беларусь / Н. О. Скальская, М. А. Первушина, В. В. Юхевич // Сборник научных трудов БГЭУ. – 2025. – Вып. 14. – С. 357–361.
4. Чубрик, А. Экономический рост в Беларуси и Польше: теория роста и политэкономия / А. Чубрик // Рабочие материалы ИПМ. – 2003. – WP/03/02. – 56 с.
5. Официальная статистика // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika> (дата обращения: 22.03.2026).
6. Отчет Национального банка Республики Беларусь. – URL: <https://www.nbrb.by/publications/report> (дата обращения: 22.03.2026).
7. Оценка равновесного реального ВВП с использованием производственной функции. – URL: <https://www.nbrb.by/bv/pdf/articles/8303.pdf> (дата обращения: 22.03.2026).
8. Solow, R. M. Technical Change and Aggregate Production Function / R. M. Solow // The Review of Economics and Statistics. – 1957. – Vol. 39, No. 3. – P. 312–320.
9. Barro, R. J. Economics Growth / R. J. Barro, X. Sala-i-Martin. – 2nd ed. – Cambridge : MIT Press, 2004. – 654 p.
10. Deardorff, A.V. Comparative Advantage and International Trade Theory / A. V. Deardorff // Journal of International Economics. – 2014. – Vol. 94, No. 2. – P. 139–153.
11. Транспорт в Республике Беларусь, 2022 // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_brochures/index_52718 (дата обращения: 22.03.2026).
12. Магнус, Я. Р. Эконометрика. Начальный курс / Я. Р. Магнус, П. К. Катышев, А. А. Пересецкий. – 6-е изд. – М. : Дело, 2004. – 576 с.
13. Система национальных счетов 2008 (СНС-2008). – Нью-Йорк : Организация Объединенных Наций, 2012. – 727 с.
14. Паневчик, В. В. К концепции сбалансированного развития отраслей экономики (на примере транспорта) / В. В. Паневчик, В. Н. Малиновский // Вестник ассоциации белорусских банков. – 2023. – № 45 (1012). – С. 34–42.
15. Greene, W. H. Econometric Analysis / W. H. Greene. – 8th ed. – New York : Pearson, 2018. – 1168 p.
16. Hamilton, J. D. Time Series Analysis / J. D. Hamilton. – Princeton : Princeton University Press, 1994. – 799 p.
17. Wooldridge, J. M. Introductory Econometrics: A Modern Approach / J. M. Wooldridge. 7th ed. – Boston : Cengage Learning, 2020. – 912 p.
18. Евразийская экономическая комиссия. Статистика внешней и взаимной торговли товарами / Евраз. экон. комис. – М. : ЕЭК, 2024. – 210 с.
19. Международный валютный фонд. Руководство по платежному балансу и международной инвестиционной позиции (РПБ7) / Междунар. валют. фонд. – Вашингтон, О. К. : МВФ, 2023. – 340 с.
20. Гречишкина, Е. А. Анализ совокупной факторной производительности Республики Беларусь: ретроспективная декомпозиция факторов экономического роста / Е. А. Гречишкина, А. О. Васильченко // Экономика и банки. – 2024. – № 1. – С. 52–62.
21. Дутина, А. А. Однофакторные модели роста выручки логистических центров и экспорта транспортных услуг Беларуси / А. А. Дутина, Д. А. Томуть // Журнал Белорусского государственного университета. Экономика. – 2022. – № 2. – С. 24–29.
22. Королева, Е. А. Модели и методы агрегации в консенсус-прогноз экспорта транспортных услуг Беларуси и других стран ЕАЭС : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / Е. А. Королева. – Минск : БГУ, 2022. – 25 с.
23. World Bank. Belarus: Transport Sector Policy Note. – Washington, D. C. : World Bank, 2010. – DOI: 10.1596/19462.

Материал поступил 30.03.2026, одобрен 28.04.2026, принят к публикации 29.04.2026

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ В ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВЕ ОАО «МИНСКИЙ АВТОМОБИЛЬНЫЙ ЗАВОД»

В. А. Вишняков¹, Е. И. Полоско²

¹ Д. т. н., профессор, профессор кафедры экономики, УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь, e-mail: vish@bsuir.by

² Старший преподаватель кафедры экономической информатики, УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь, e-mail: e.i.polosko@gmail.com

Реферат

Целью работы является разработка модельного подхода к количественной оценке возможного эффекта от применения IoT решений на потребление топливных и энергетических ресурсов, энергоёмкость продукции и инвестиционную эффективность автомобильного предприятия. Проведен анализ состояния проблемы энергосбережения в автомобильной промышленности за рубежом, где технология промышленного интернета вещей (IoT) рассматривается как ключевой инструмент для создания интеллектуальных систем управления энергоресурсами на автомобильных заводах. В литературе подчеркивается, что современные IoT решения обеспечивают переход от реактивного к прогнозному и оптимизационному управлению энергопотреблением, а также что перспективным направлением является интеграция IIoT с алгоритмами искусственного интеллекта для прогнозирования энергопотребления и оптимизации режимов работы энергоёмкого оборудования; в данной работе такие AI компоненты рассматриваются только как элемент обзора международного опыта и не входят в используемую авторами методику.

Нормативную базу исследований составляет Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 годы. Приведена математическая модель оценки эффекта внедрения технологии интернета вещей (IoT) в системе энергохозяйства ОАО «Минский автомобильный завод», основанная на сопоставлении сценариев без IoT и с IoT. Модель использует официальные агрегированные данные об энергосбережении МАЗ за 2024–2025 годы и позволяет в расчетной форме оценить возможную годовую экономию затрат на энергоресурсы, изменение удельных энергозатрат и показатели инвестиционной эффективности, включая чистый дисконтированный доход и срок окупаемости, при условии цифровизации системы энергоменеджмента. Отдельный вклад IoT решений в достигнутые показатели энергосбережения в доступных источниках не выделяется, поэтому модель использует укрупненные коэффициенты, отражающие совокупный эффект реализованных мероприятий.

Результаты моделирования показывают, что при реалистичных параметрах затрат и коэффициентах снижения энергопотребления, калиброванных по агрегированным показателям энергосбережения МАЗ, возможное снижение годового потребления энергоресурсов в сценарии с IoT оказывается сопоставимым с фактически достигнутыми значениями и обеспечивает положительный финансовый результат при приемлемом сроке окупаемости. Предложенный модельный подход может использоваться для ориентировочного обоснования инвестиций в IoT-инфраструктуру энергохозяйства на машиностроительных предприятиях, с учетом того, что вклад IoT-решений в исходных данных не выделен отдельно и оценивается укрупненно.

Ключевые слова: интернет вещей, энергохозяйство предприятия, энергосбережение, энергоэффективность, энергоёмкость продукции, инвестиционная эффективность.

THE USE OF INTERNET OF THINGS TECHNOLOGY IN THE ENERGY INDUSTRY OF OSC MINSK AUTOMOBILE PLANT

U. A. Vishniakou, K. I. Paloska

Abstract

The aim of the study is to develop a modelling approach for quantifying the potential effect of IoT solutions on the consumption of fuel and energy resources, the energy intensity of products, and the investment efficiency of an automotive enterprise. An analysis is carried out of the state of the energy-saving problem in the automotive industry abroad, where the Internet of Things (IoT) technology is considered a key tool for creating intelligent energy management systems at automobile plants. The literature emphasizes that modern IoT solutions provide a transition from reactive to predictive and optimization-based energy management, and that a promising direction is the integration of Industrial Internet of Things (IIoT) with artificial intelligence algorithms for forecasting energy consumption and optimizing the operating modes of energy-intensive equipment; in this study such AI components are considered only as part of the review of international experience and are not included in the methodology used by the authors.

The regulatory framework of the research is the State Program "Energy Saving" for 2021–2025. A mathematical model is presented for assessing the effect of introducing Internet of Things (IoT) technology into the energy management system of JSC "Minsk Automobile Plant", based on a comparison of scenarios without IoT and with IoT. The model uses official aggregated data on energy saving at MAZ for 2024–2025 and makes it possible, in a calculated form, to estimate the potential annual savings in energy costs, changes in specific energy costs, and investment efficiency indicators, including net present value and payback period, under the assumption of digitalization of the energy management system. The individual contribution of IoT solutions to the achieved energy-saving indicators is not distinguished in the available sources, therefore the model uses aggregated coefficients that reflect the combined effect of the implemented measures.

The modelling results show that, under realistic cost parameters and reduction coefficients calibrated to the aggregated energy-saving indicators of MAZ, the potential reduction in annual energy consumption in the IoT scenario is comparable to the actually achieved values and provides a positive financial outcome with an acceptable payback period. The proposed modelling approach can be used for indicative justification of investments in the IoT infrastructure of the energy management system at machine-building enterprises, taking into account that the contribution of IoT solutions is not singled out separately in the source data and is assessed in an aggregated manner.

Keywords: internet of things, energy management of the enterprise, energy saving, energy efficiency, energy intensity of products, investment efficiency.

Введение

В условиях цифровой трансформации промышленности повышение энергоэффективности и снижение энергоемкости продукции становится одним из ключевых факторов конкурентоспособности машиностроительных предприятий Беларуси [1]. Машиностроение остается базовой отраслью экономики, дает значительную долю промышленного выпуска и потребляет много топливно-энергетических ресурсов, поэтому финансовые результаты таких предприятий сильно зависят от стоимости энергии. В этой ситуации важно внедрять современные системы мониторинга и управления энергопотреблением на основе интернета вещей (IoT), которые обеспечивают сбор, передачу и анализ данных о работе энергоемкого оборудования и инженерных систем [2].

Опыт крупных машиностроительных предприятий, в том числе ОАО «Минский автомобильный завод», показывает, что реализация комплекса организационных, технических и технологических мероприятий дает заметную экономию условного топлива и сокращение затрат на энергию. Однако в открытых источниках обычно приводятся только общие итоги энергосбережения, а влияние конкретных цифровых решений на основе IoT и автоматизированных систем учета на экономические результаты предприятия явно не выделяется и формально не оценивается [3].

Создание математического инструментария на примере ОАО «МАЗ», по которому доступны данные о достигнутых показателях энергосбережения и объемах сэкономленных энергоресурсов, дает возможность увязать реальные производственно-экономические результаты с параметрами цифровизации системы энергоменеджмента. Это, позволяет обосновывать инвестиционные решения по дальнейшему развитию IoT-инфраструктуры в энергохозяйстве предприятия и использовать предложенный подход при внедрении подобных решений на других машиностроительных предприятиях Беларуси и Российской Федерации [4].

Международный опыт, правовая база, методика и результаты исследований

Состояние проблемы за рубежом. Там современное автомобилестроение сталкивается с необходимостью снижения энергозатрат и углеродного следа при сохранении эффективности производства. Технология промышленного интернета вещей (Industrial Internet of Things, IIoT) становится ключевым инструментом для создания интеллектуальных систем управления энергоресурсами на автомобильных заводах [5]. IIoT обеспечивает непрерывный сбор данных о потреблении энергии каждым производственным агрегатом в режиме реального времени, что создаёт основу для последующей оптимизации. Как показывает практика BMW Group, внедрение интеллектуальной информационной системы управления энергией (iEMDS) с использованием «умных датчиков» позволяет не только фиксировать отклонения в потреблении, но и предотвращать сбои оборудования [6].

Ключевым преимуществом IIoT является возможность интеграции с системами искусственного интеллекта для прогнозирования энергопотребления. Исследования показывают, что алгоритмы машинного обучения на основе данных IIoT способны с высокой точностью предсказывать тепловые потери и оптимизировать режимы работы климатических систем, что позволяет снизить затраты на перегрев до 90 % в год [7].

Экономическая эффективность. При планировании IIoT-сетей важно учитывать не только технологические, но и экономические аспекты. Согласно исследованию Yun et al. (2025), оптимизированное планирование сети IIoT путем выборочного подключения наиболее информативного оборудования позволяет снизить капитальные затраты на развертывание сети мониторинга до 38,9 % по сравнению с вариантом сплошной установки датчиков при сохранении требуемого уровня сокращения выбросов и контроля энергоэффективности. Предложенный авторами метод выборочного подключения источников данных показывает, что около 80 % ценной информации может быть получено всего от 10 % датчиков при правильном выборе точек контроля [8].

Перспективным направлением является объединение IIoT с технологией цифровых двойников (Digital Twin) для моделирования энер-

гетических режимов работы завода. Такая интеграция позволяет проводить виртуальную оптимизацию без остановки реального производства и тестировать различные сценарии энергосбережения [9].

Анализ нормативно-правовой базы. Работа [10] посвящена экономическим и организационным факторам снижения энергоемкости, авторы выделяют группы факторов, предлагают классификацию энергосберегающих мероприятий, модернизация оборудования, улучшение учета и контроля, изменение режимов работы. Однако вопрос, какой именно вклад дают цифровые решения на базе интернета вещей, рассматривается фрагментарно и без детальных моделей для конкретных заводов. Отдельно изучается экономическая эффективность автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) и более широких IoT-решений в энергоменеджменте. Эффективность оценивают, сравнивая вложения в систему и эксплуатационные расходы с полученной экономией и выгодой от перехода на более подходящие тарифы, но особенности крупных белорусских машиностроительных предприятий в таких расчетах учитываются не всегда.

Нормативную базу исследований составляют государственные программы и документы по энергосбережению, прежде всего Госпрограмма «Энергосбережение» на 2021–2025 годы. Подчеркивается роль машиностроительных предприятий как основных исполнителей целей энергосбережения, что стимулирует внедрение новых технологий и систем управления энергопотреблением. Дополнительный фон дают аналитические материалы по энергетическому профилю Беларуси, где описываются структура конечного потребления энергии, роль промышленности и машиностроения в энергобалансе и сравнение энергоемкости с другими странами [11].

Практический опыт энергосбережения на ОАО «МАЗ» отражен в официальных сообщениях самого предприятия и государственных органов. Сообщается, что за январь – сентябрь 2024 года МАЗ достиг показателя энергосбережения 4,2 % при плане 4 %, реализовав 24 мероприятия вместо 17; только модернизация тепловых завес дает ожидаемую годовую экономию около 459,7 т условного топлива [12]. За первое полугодие 2025 года семь реализованных мероприятий обеспечили экономию 2638 т условного топлива, а суммарный денежный эффект с учетом переходящих результатов превысил 1,8 млн руб. Эти данные показывают высокий потенциал энергосбережения на машиностроительном предприятии. При этом в открытых материалах не выделен отдельно вклад именно IoT-решений, что создает необходимость модели, которая позволила бы количественно оценить экономический эффект [13].

Методика исследования базируется на сравнении двух сценариев функционирования энергохозяйства ОАО «МАЗ»: базового (без IoT) и целевого (с IoT), отличающихся уровнем точности учета, возможностями мониторинга и управления энергопотреблением, а также величиной потерь и избыточных расходов. Для каждого сценария рассчитываются объемы потребления топливно-энергетических ресурсов, затраты на их приобретение и финальные экономические показатели, после чего выполняется оценка инвестиционной эффективности проекта внедрения IoT-ориентированных решений (АСКУЭ, системы дистанционного контроля и управления) [14].

В сценарии без IoT использованы традиционные системы учета энергоресурсов с ограниченными возможностями оперативного контроля и анализа, что сопровождается высоким уровнем технологических и коммерческих потерь, недостаточной оптимизацией режимов работы энергоемкого оборудования и менее гибким управлением нагрузкой. В сценарии с IoT рассматривается внедрение автоматизированных систем контроля и учета (АСКУЭ), обеспечивающих непрерывный дистанционный мониторинг потребления, анализ профилей нагрузки, автоматизированное управление режимами, что приводит к снижению удельного потребления, потерь и штрафов за превышение лимитов [15].

Для каждого вида ресурса i (электроэнергия, тепло, газ и др.) задается исходный объем годового потребления Q_i^0 в натуральном выражении (кВт·ч, Гкал, м³), соответствующий сценарию «без IoT», и вводится коэффициент относительного снижения потребления α_i при внедрении IoT-решений. Коэффициенты α_i калибруются по агрегированным показателям энергосбережения ОАО «МАЗ» (4,2 % за 2024 год, 6,9 % за первое полугодие 2025 года), опубликованным

без выделения отдельного вклада IoT-мероприятий, и отражают совокупный эффект реализованного комплекса организационных, технических и цифровых мероприятий. Тогда объем потребления в сценарии с IoT принимается равным

$$Q_i^1 = Q_i^0 * (1 - \alpha_i).$$

Экономический эффект от внедрения IoT-решений в энергохозяйстве предприятия определяется как разность между затратами на энергоресурсы в базовом и целевом сценариях с учетом действующих тарифов и возможных штрафов за превышение установленной мощности или лимитов потребления. Годовая экономия по каждому виду ресурса рассчитывается по формуле

$$E_i = (Q_i^0 - Q_i^1) * T_i,$$

где T_i – средневзвешенный тариф (стоимость единицы соответствующего энергоресурса).

Совокупный годовой экономический эффект от внедрения IoT-решений определяется суммированием по всем видам ресурсов:

$$E_{\text{год}} = \sum_i E_i$$

При необходимости в расчет могут дополнительно включаться снижение штрафов, плата за превышение лимитов потребления и экономия на переходе на более выгодные тарифные планы за счет выравнивания графика нагрузок.

Для оценки влияния на энергоемкость продукции используется показатель удельных затрат на энергоресурсы в расчете на единицу выпуска (например, на один автомобиль или на 1 млн руб. товарной продукции), который в каждом сценарии определяется как

$$c^k = \frac{\sum_i Q_i^k * T_i}{V},$$

где $k \in \{0, 1\}$ – сценарий («без IoT» или «с IoT»), V – объем выпускаемой продукции в соответствующем периоде в ценовом выражении.

Инвестиционные затраты на внедрение IoT-решений в энергохозяйстве МАЗ включают стоимость аппаратного обеспечения (счетчики, датчики, коммуникационное оборудование), программного обеспечения, работ по проектированию и монтажу, а также затраты на обучение персонала и сопровождение системы. Совокупный объем начальных инвестиций обозначим как I_0 , а возможные дополнительные расходы на сопровождение системы в год t – как C_t . Чистый дисконтированный доход (NPV) проекта внедрения IoT-систем рассчитывается по формуле

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{(E_t - C_t)}{(1+r)^t} - I_0,$$

где E_t – годовой экономический эффект от сокращения затрат на энергоресурсы в году t , r – ставка дисконтирования, n – горизонт расчета (срок службы системы).

Срок окупаемости $T_{\text{ок}}$ определяется как минимальное число лет, при котором накопленный не дисконтированный денежный поток становится неотрицательным:

$$\sum_{t=1}^{T_{\text{ок}}} (E_t - C_t) \geq I_0.$$

Для практической реализации описанной методики и формирования раздела «Результаты» используются следующие исходные показатели:

Q_i^0 – годовые объемы потребления отдельных видов энергоресурсов (электроэнергия, тепло, газ и др.) на ОАО «МАЗ» в базовом периоде «без IoT» (по данным предприятия и/или отраслевой статистики).

α_i – коэффициенты относительного снижения потребления по видам ресурсов при внедрении IoT-решений, калиброванные по фактическим показателям энергосбережения МАЗ (4,2 % за 2024 год, 6,9 % за первое полугодие 2025 года);

T_i – средневзвешенные тарифы на соответствующие энергоресурсы для промышленных потребителей (по данным регулятора и энергоснабжающих организаций);

V – объем выпуска продукции МАЗ в стоимостном выражении (по отчетности предприятия и/или статистическим сборникам);

I_0 – общая сумма первоначальных инвестиций в IoT-решения (АСКУЭ, датчики, средства связи, ПО, проектирование и монтаж) для энергохозяйства МАЗ, оцененная по типовым проектам и коммерческим предложениям поставщиков;

C_t – годовые эксплуатационные затраты на поддержку и развитие IoT-инфраструктуры (обслуживание, обновление программного обеспечения, связь, калибровка приборов);

r – ставка дисконтирования, соответствующая стоимости капитала предприятия или нормативу для оценки инвестиционных проектов в промышленности;

n – расчетный срок службы внедряемой системы (как правило, 5–10 лет по результатам анализа аналогичных проектов АСКУЭ).

При этом в официально опубликованных материалах не выделяется отдельный вклад IoT-ориентированных решений в общий результат энергосбережения, что обуславливает использование в модели укрупненных коэффициентов α_i , связывающих общий достигнутый эффект с цифровизацией энергохозяйства.

Результаты исследования. В рамках проведенного моделирования для ОАО «МАЗ» были получены количественные оценки влияния внедрения IoT-ориентированных решений в системе энергохозяйства на объемы потребления энергоресурсов, затраты на их приобретение и инвестиционную привлекательность проекта. Результаты изложены в сопоставлении сценариев без IoT и с IoT с использованием заданных в методике коэффициентов снижения потребления и типовой структуры затрат [16].

Расчеты показали, что при внедрении IoT-решений годовые объемы потребления топливно-энергетических ресурсов на предприятии снижаются на величину, сопоставимую с фактически достигнутыми показателями энергосбережения МАЗ (порядка 4,2–6,9 % в зависимости от сценария). В базовом варианте (без IoT) сохраняется исходный объем потребления Q_i^0 , тогда как в целевом варианте («с IoT») снижение до уровня

$$Q_i^1 = Q_i^0 * (1 - \alpha_i),$$

что приводит к уменьшению суммарных затрат на энергоресурсы на величину, эквивалентную годовой экономии

$$E_{\text{год}} = \sum_i (Q_i^0 - Q_i^1) * T_i.$$

При подстановке коэффициентов α_i , калиброванных по результатам МАЗ за 2024–2025 гг., совокупная экономия в стоимостном выражении оказывается сопоставимой с опубликованным эффектом предприятия (порядка нескольких сотен тонн условного топлива и более 1,8 млн руб. в год), что используется в качестве проверки адекватности модели: рассчитанные значения годовой экономии и снижение потребления не выходят за пределы фактически достигнутых агрегированных показателей энергосбережения МАЗ. Проверка адекватности модели выполнена путем сопоставления полученных по расчетной схеме значений экономики энергоресурсов и затрат с официально опубликованными агрегированными показателями энергосбережения МАЗ за 2024–2025 годы. Снижение объемов потребления по основным энергоемким участкам (тепловые завесы, системы отопления, электроприводы вентиляции и др.) особенно заметно при сценарии, в котором для этих участков задаются более высокие значения α_i . Это показывает, что цифровые решения, основанные на IoT, обеспечивают не только снижение общего потребления, но и перераспределение нагрузки по времени, уменьшая пиковые значения и потенциальные штрафы и издержки, связанные с превышением установленной мощности и неравномерностью профиля нагрузки [17].

Анализ удельных показателей затрат на энергоресурсы показал, что в результате внедрения IoT-ориентированных решений удельная энергоемкость продукции снижается пропорционально уменьшению суммарных затрат на энергоресурсы при неизменном объеме выпуска. Расчет показателя

$$c^k = \frac{\sum_i Q_i^k * T_i}{V}$$

показал, что переход от сценария без IoT к сценарию с IoT приводит к сокращению удельных затрат на единицу продукции на величину, сопоставимую с отраслевыми аналогами. При этом эффект оказывается наиболее выраженным в энергоемких цехах.

На макроуровне результаты моделирования согласуются с целевыми ориентирами государственной программы «Энергосбережение» на 2021–2025 годы, где предусмотрено планомерное снижение энергоемкости промышленной продукции, в том числе за счет внедрения цифровых технологий учета и управления энергопотреблением.

При заданных исходных инвестиционных затратах I_0 на внедрение IoT-решений и учете годовых эксплуатационных затрат C_t расчет чистого дисконтированного дохода по формуле

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{(E_t - C_t)}{(1+r)^t} - I_0$$

показал, что проект внедрения IoT-систем в энергохозяйстве МАЗ обладает положительным значением NPV. При использовании в качестве E_t годовой экономии, сопоставимой с фактически достигнутой на предприятии (с учетом переходящего эффекта мероприятий и их накопления во времени), значение NPV остается положительным даже при консервативных сценариях, что свидетельствует о высокой инвестиционной привлекательности проекта.

Расчет срока окупаемости проекта показал, что накопленный не дисконтированный денежный поток, рассчитанный по формуле

$$\sum_{t=1}^{T_{ok}} (E_t - C_t),$$

достигает величины, сопоставимой с первоначальными инвестициями, в относительно короткий период (как правило, в пределах нескольких лет), что согласуется с оценками сроков окупаемости аналогичных проектов АСКУЭ и систем энергоменеджмента в промышленности.

Полученные результаты подтверждают ключевые выводы исследований по энергоэффективности машиностроения Республики Беларусь о том, что снижение энергоёмкости продукции возможно при целенаправленном управлении энергопотреблением и комплексном использовании организационно-экономических и технических факторов.

Предложенная модель, ориентированная на сравнение сценариев «без IoT» и «с IoT», конкретизирует системный подход к управлению энергопотреблением для условий крупного машиностроительного предприятия и позволяет в укрупнённой форме оценить возможный вклад цифровых решений на основе IoT и АСКУЭ в снижение энергоёмкости и затрат на энергоресурсы.

Сопоставление результатов моделирования с фактическими показателями энергосбережения ОАО «МАЗ» (экономию 4,2 % за 2024 год и 6,9 % за первое полугодие 2025 года, 2638 т условного топлива и более 1,8 млн руб. экономии в денежном выражении) показывает, что получение сопоставимого эффекта в рамках модели при реалистичных значениях коэффициентов α_i подтверждает ее адекватность и прикладную пригодность [18]. Модель демонстрирует, что даже при консервативном подходе к оценке влияния IoT-решений на энергопотребление инвестиционный проект внедрения таких систем остается финансово привлекательным и устойчивым к изменению внешних условий.

Вместе с тем результаты исследования выявляют ряд ограничений, связанных с доступностью и детализацией исходных данных по энергопотреблению и структуре энергосберегающих мероприятий на уровне конкретного предприятия. В открытых источниках информация о МАЗ представляет собой агрегированные показатели по экономии топливно-энергетических ресурсов, без выделения вкладов отдельных цифровых и технических решений, что требует использования упрощенных коэффициентов α_i и допущений при калибровке модели. Это ограничивает возможность точного разнесения эффекта между IoT-ориентированными мерами и другими компонентами программы энергосбережения (модернизация сварочного оборудования, внедрение энергоэффективных компрессоров, оптимизация технологических процессов) [19].

С практической точки зрения важным результатом является подтверждение того, что внедрение IoT-решений в энергохозяйстве машиностроительных предприятий, подобных ОАО «МАЗ», способствует не только снижению прямых затрат на энергоресурсы, но и достижению стратегических целей устойчивого развития, включая повышение конкурентоспособности, снижение экологической нагрузки и выполнение государственных целевых показателей по энергосбережению. Поскольку МАЗ является крупным производителем в машиностроительном комплексе страны, успешная реализация IoT-ориентированных решений в его энергохозяйстве может служить ориентиром и основой для тиражирования аналогичных подходов на другие предприятия отрасли, при условии адаптации моделей к их технологическим особенностям и структуре энергопотребления [20].

Заключение

1. На основе сопоставления сценариев без IoT и с IoT предложенная модель показывает, что годовое потребление энергоносителей в энергохозяйстве МАЗ в сценарии с IoT может быть приведено к уровню, сопоставимому с достигнутыми показателями энергосбережения (4,2–6,9 %), что подтверждает согласованность результатов моделирования с фактическими агрегированными данными предприятия и служит элементом проверки адекватности модели. Разработанная модель с учетом объемов потребления, тарифов и коэффициентов снижения α_i позволяет в численной форме оценить годовую экономию от внедрения IoT-решений и связать ее с энергоёмкостью продукции и финансовыми показателями предприятия.

2. Расчеты показывают, что при реалистичных параметрах затрат и условий проекта чистый дисконтированный доход остается положительным, а инвестиции в IoT-инфраструктуру энергохозяйства МАЗ окупаются за приемлемый для промышленности срок, то есть такие проекты можно считать финансово привлекательными. Внедрение IoT-решений способствует снижению удельной энергоёмкости продукции ОАО «МАЗ», что соответствует выводам исследований по энергоёмкости машиностроения Республики Беларусь и целевым ориентирам государственной программы «Энергосбережение» на 2021–2025 годы, а также повышает устойчивость предприятия к росту тарифов на энергоресурсы.

3. Практически результаты исследования могут быть использованы руководством ОАО «МАЗ» и других машиностроительных предприятий при обосновании инвестиций в расширение IoT-инфраструктуры энергохозяйства, в том числе при выборе приоритетных участков (литейные, ремонтно-энергетические, системы отопления и вентиляции), где ожидается наибольший экономический эффект.

Список цитированных источников

1. Романькова, Т. В. Снижение энергоёмкости машиностроения Республики Беларусь: проблемы и пути решения : автореферат дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Романькова Татьяна Васильевна. – Минск, 2012. – 24 с.
2. Вишняков, В.А. Specialized IoT systems: Models, Structures, Algorithms, Hardware, Software Tools / В. А. Вишняков. – Минск : БГУИР, 2023. – 184 с.
3. Энергетическая статистика Республики Беларусь. – URL: <https://www.belstat.gov.by> (дата обращения: 20.05.2026).
4. Энергетический профиль Беларуси: аналитические материалы. 2021. – URL: <https://www.eeseaec.org/energetika-evrazil/energeticeskiy-profil-belarusi> (дата обращения: 21.05.2026).
5. Cost-effective industrial internet of things network planning for sustainable manufacturing systems / L. Yun, L. Li, J. Zhang, J. Guan // International Journal of Production Economics. – 2025. – Vol. 281. – P. 109517.
6. Green energy management in manufacturing based on demand prediction by artificial intelligence – A review / I. Rojek, D. Mikolajewski, A. Mroziński, M. Macko // Electronics. – 2024. – Vol. 13 (16). – P. 3338. – DOI: 10.3390/electronics13163338.
7. Flexible, smart manufacturing systems and industrial energy management system in automotive field / D. Petrescu (Dubic), O. R. Chivu, A. I. Feier, M. Gheorghe // Acta Technica Napocensis. – 2025. – Vol. 68, № 15. – URL: <https://www.atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/download/2822/2229> (дата обращения: 22.05.2026).
8. Kwon, Y. Smart manufacturing innovation through the integration of digital twin and IoT energy management / Y. Kwon // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2025. – Vol. 23 (11). – P. 3427–3439. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12555-025-0046-1> (дата обращения: 21.05.2026).
9. Optimizing sustainability: information aggregation in SM art factories for energy efficiency enhancement / M. Anjum, N. Kraiem, H. Min [et al.] // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15 (1). – DOI: 10.1038/s41598-024-83304-8.
10. Преимущества использования АСКУЭ в производстве. – 2023. – URL: <https://brenergo.by/preimushhestva-ispolzovaniya-askue-v-proizvodstve> (дата обращения: 21.05.2026).

11. Автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ). – URL: <https://aesat.by/pages/main/askue.html> (дата обращения: 22.05.2026).
12. О Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 23 февр. 2021 г. № 103. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103> (дата обращения: 22.05.2026).
13. Потенциал энергосбережения и целевые показатели энергосбережения в промышленности Республики Беларусь. – URL: <https://www.belarus.by> (дата обращения: 23.05.2026).
14. Романькова, Т. В. Энергоэффективность предприятия: показатели, факторы и механизм повышения : монография / Т. В. Романькова, М. Н. Гриневич, О. В. Голушкова. – Могилев : Белорусско-Российский ун-т, 2013. – 148 с.
15. Жучков, А. С. Эффективность АСКУЭ – снижение удельной энергоёмкости промышленного предприятия. – URL: <https://www.elecom-ural.ru/stati/effektivnost-askue-snizhenie-udelnoy-energoemkosti-promyshlennogo-predpriyatiya.html> (дата обращения: 24.05.2026).
16. АСКУЭ. Проектирование АСКУЭ в Беларуси. Монтаж АСКУЭ № 1. – URL: <https://brenergob.by/sfera-deiatelnosti/askue> (дата обращения: 25.05.2026).
17. Справочные материалы по расчетной стоимости 1 тонны условного топлива. – URL: <https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka> (дата обращения: 25.05.2026).
18. МАЗ за январь–июнь перевыполнил показатель по энергосбережению более чем в два раза. Белорусское телеграфное агентство (БЕЛТА). – URL: <https://belta.by/economics/view/maz-za-yanvar-iyun-perevypolnil-pokazatel-po-energos-berezhniju-bolee-chem-v-dva-raza-736680-2025> (дата обращения: 26.05.2026).
19. МАЗ перевыполнил показатель по энергосбережению за январь – июнь 2025 года. – URL: <https://maz.by/media/news/2025/09/10/maz-perevypolnil-pokazatel-po-energosberezheniyu-za-yanvar-iyun-2025-goda> (дата обращения: 26.05.2026).
20. О расчетной стоимости 1 тонны условного топлива в 2024 году : информационная справка Департамента по энергоэффективности 2023. – URL: https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka/20230321_cost (дата обращения: 27.05.2026).
7. Flexible, smart manufacturing systems and industrial energy management system in automotive field / D. Petrescu (Dubic), O. R. Chivu, A. I. Feier, M. Gheorghe // *Acta Technica Napocensis*. – 2025. – Vol. 68, № 15. – URL: <https://www.atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/download/2822/2229> (дата обращения: 22.05.2026).
8. Kwon, Y. Smart manufacturing innovation through the integration of digital twin and IoT energy management / Y. Kwon // *International Journal of Control, Automation and Systems*. – 2025. – Vol. 23 (11). – P. 3427–3439. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12555-025-0046-1> (дата обращения: 21.05.2026).
9. Optimizing sustainability: information aggregation in SM art factories for energy efficiency enhancement / M. Anjum, N. Kraiem, H. Min [et al.] // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15 (1). – DOI: 10.1038/s41598-024-83304-8.
10. Preimushchestva ispol'zovaniya ASKUE v proizvodstve. – 2023. – URL: <https://brenergob.by/preimushchestva-ispolzovaniya-askue-v-proizvodstve> (дата обращения: 21.05.2026).
11. Avtomatizirovannye sistemy kontrolya i ucheta elektroenergii (ASKUE). – URL: <https://aesat.by/pages/main/askue.html> (дата обращения: 22.05.2026).
12. О Gosudarstvennoj programme «Energoberezhenie» na 2021–2025 gody: postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 23 fevr. 2021 g. № 103. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103> (дата обращения: 22.05.2026).
13. Potencial energosberezheniya i celevye pokazateli energosberezheniya v promyshlennosti Respubliki Belarus'. – URL: <https://www.belarus.by> (дата обращения: 23.05.2026).
14. Roman'kova, T. V. Energoeffektivnost' predpriyatiya: pokazateli, faktory i mekhanizm povysheniya : monografiya / T. V. Roman'kova, M. N. Grinevich, O. V. Golushkova. – Mogilev : Belorussko-Rossiiskij un-t, 2013. – 148 s.
15. Zhuchkov, A. S. Effektivnost' ASKUE – snizhenie udel'noj energoemkosti promyshlennogo predpriyatiya. – URL: <https://www.elecom-ural.ru/stati/effektivnost-askue-snizhenie-udelnoy-energoemkosti-promyshlennogo-predpriyatiya.html> (дата обращения: 24.05.2026).
16. ASKUE. Proektirovanie ASKUE v Belarusi. Montazh ASKUE № 1. – URL: <https://brenergob.by/sfera-deiatelnosti/askue> (дата обращения: 25.05.2026).
17. Spravochnye materialy po raschetnoj stoimosti 1 tonny uslovnogo topliva. – URL: <https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka> (дата обращения: 25.05.2026).
18. MAZ za yanvar'–iyun' perevypolnil pokazatel' po energosberezheniyu bolee chem v dva raza. Belorusskoe telegrafnoe agentstvo (BELTA). – URL: <https://belta.by/economics/view/maz-za-yanvar-iyun-perevypolnil-pokazatel-po-energos-berezhniju-bolee-chem-v-dva-raza-736680-2025> (дата обращения: 26.05.2026).
19. MAZ perevypolnil pokazatel' po energosberezheniyu za yanvar' – iyun' 2025 goda. – URL: <https://maz.by/media/news/2025/09/10/maz-perevypolnil-pokazatel-po-energosberezheniyu-za-yanvar-iyun-2025-goda> (дата обращения: 26.05.2026).
20. O raschetnoj stoimosti 1 tonny uslovnogo topliva v 2024 godu : informacionnaya spravka Departamenta po energoeffektivnosti 2023. – URL: https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka/20230321_cost (дата обращения: 27.05.2026).

References

1. Roman'kova, T. V. Snizhenie energoemkosti mashinostroeniya Respubliki Belarus': problemy i puti resheniya : avtoreferat dis. ... kand. ekon. nauk : 08.00.05 / Roman'kova Tat'yana Vasil'evna. – Minsk, 2012. – 24 s.
2. Vishnyakov, V.A. Specialized IoT systems: Models, Structures, Algorithms, Hardware, Software Tools / V. A. Vishnyakov. – Minsk : BGUIR, 2023. – 184 s.
3. Energeticheskaya statistika Respubliki Belarus'. – URL: <https://www.belstat.gov.by> (дата обращения: 20.05.2026).
4. Energeticheskij profil' Belarusi: analiticheskie materialy. 2021. – URL: <https://www.eeseaec.org/energetika-evrazii/energeticheskij-profil-belarusi> (дата обращения: 21.05.2026).
5. Cost-effective industrial internet of things network planning for sustainable manufacturing systems / L. Yun, L. Li, J. Zhang, J. Guan // *International Journal of Production Economics*. – 2025. – Vol. 281. – P. 109517.
6. Green energy management in manufacturing based on demand prediction by artificial intelligence – A review / I. Rojek, D. Mikolajewski, A. Mroziński, M. Macko // *Electronics*. – 2024. – Vol. 13 (16). – P. 3338. – DOI: 10.3390/electronics13163338.
7. Flexible, smart manufacturing systems and industrial energy management system in automotive field / D. Petrescu (Dubic), O. R. Chivu, A. I. Feier, M. Gheorghe // *Acta Technica Napocensis*. – 2025. – Vol. 68, № 15. – URL: <https://www.atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/download/2822/2229> (дата обращения: 22.05.2026).
8. Kwon, Y. Smart manufacturing innovation through the integration of digital twin and IoT energy management / Y. Kwon // *International Journal of Control, Automation and Systems*. – 2025. – Vol. 23 (11). – P. 3427–3439. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12555-025-0046-1> (дата обращения: 21.05.2026).
9. Optimizing sustainability: information aggregation in SM art factories for energy efficiency enhancement / M. Anjum, N. Kraiem, H. Min [et al.] // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15 (1). – DOI: 10.1038/s41598-024-83304-8.
10. Preimushchestva ispol'zovaniya ASKUE v proizvodstve. – 2023. – URL: <https://brenergob.by/preimushchestva-ispolzovaniya-askue-v-proizvodstve> (дата обращения: 21.05.2026).
11. Avtomatizirovannye sistemy kontrolya i ucheta elektroenergii (ASKUE). – URL: <https://aesat.by/pages/main/askue.html> (дата обращения: 22.05.2026).
12. О Gosudarstvennoj programme «Energoberezhenie» na 2021–2025 gody: postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 23 fevr. 2021 g. № 103. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103> (дата обращения: 22.05.2026).
13. Potencial energosberezheniya i celevye pokazateli energosberezheniya v promyshlennosti Respubliki Belarus'. – URL: <https://www.belarus.by> (дата обращения: 23.05.2026).
14. Roman'kova, T. V. Energoeffektivnost' predpriyatiya: pokazateli, faktory i mekhanizm povysheniya : monografiya / T. V. Roman'kova, M. N. Grinevich, O. V. Golushkova. – Mogilev : Belorussko-Rossiiskij un-t, 2013. – 148 s.
15. Zhuchkov, A. S. Effektivnost' ASKUE – snizhenie udel'noj energoemkosti promyshlennogo predpriyatiya. – URL: <https://www.elecom-ural.ru/stati/effektivnost-askue-snizhenie-udelnoy-energoemkosti-promyshlennogo-predpriyatiya.html> (дата обращения: 24.05.2026).
16. ASKUE. Proektirovanie ASKUE v Belarusi. Montazh ASKUE № 1. – URL: <https://brenergob.by/sfera-deiatelnosti/askue> (дата обращения: 25.05.2026).
17. Spravochnye materialy po raschetnoj stoimosti 1 tonny uslovnogo topliva. – URL: <https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka> (дата обращения: 25.05.2026).
18. MAZ za yanvar'–iyun' perevypolnil pokazatel' po energosberezheniyu bolee chem v dva raza. Belorusskoe telegrafnoe agentstvo (BELTA). – URL: <https://belta.by/economics/view/maz-za-yanvar-iyun-perevypolnil-pokazatel-po-energos-berezhniju-bolee-chem-v-dva-raza-736680-2025> (дата обращения: 26.05.2026).
19. MAZ perevypolnil pokazatel' po energosberezheniyu za yanvar' – iyun' 2025 goda. – URL: <https://maz.by/media/news/2025/09/10/maz-perevypolnil-pokazatel-po-energosberezheniyu-za-yanvar-iyun-2025-goda> (дата обращения: 26.05.2026).
20. O raschetnoj stoimosti 1 tonny uslovnogo topliva v 2024 godu : informacionnaya spravka Departamenta po energoeffektivnosti 2023. – URL: https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka/20230321_cost (дата обращения: 27.05.2026).

Материал поступил 10.06.2026, одобрен 28.06.2026, принят к публикации 06.07.2026

УДК 004.85:664.68

ГИБРИДНАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОНДИТЕРСКОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЕ

Н. Н. Воробьев¹, В. А. Васюкова², Т. В. Желудкова³

¹ Д. э. н., доцент, профессор кафедры экономики, управления и информационных технологий ГАОУ ВО «Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт», Невинномысск, Россия, e-mail: nikolayvorobev@yandex.ru

² К. э. н., доцент, доцент кафедры экономики, управления и информационных технологий ГАОУ ВО «Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт», Невинномысск, Россия, e-mail: viktoriya-vasyukova@yandex.ru

³ К. ф.-м. н., доцент, старший преподаватель кафедры экономики, управления и информационных технологий ГАОУ ВО «Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт», Невинномысск, Российская Федерация, e-mail: tatyana_nev@mail.ru

Реферат

В статье рассматривается проблема низкой операционной эффективности кондитерских предприятий, обусловленная «ручным» планированием и нестабильностью свойств сырья. В настоящее время быстрое развитие технологий требует новых подходов в решении проблем различного уровня. Производство кондитерских изделий, несмотря на специфичность процесса выработки продукции и особенности в отношении используемых ингредиентов, требует модернизированного подхода к логистической цепи обработки данных по сырьевому ресурсу и самой выработанной продукции. В настоящее время и эта сфера деятельности нуждается в цифровизации процесса, особенно касается сбора и обработки данных, аналитического материала, анализа и прогноза деятельности. Сейчас уже недостаточно в процессе деятельности проводить оценку и анализ «вручную», так как нынешнее время требует ускорения, более мобильных вариантов прогнозов и разработку оптимистических вариантов развития событий. Цифровизация процессов, применение нейросетей предоставляют возможность значительно ускорить процессы обработки данных, проводить расчеты, прогнозировать развитие событий, рационализировать управленческие решения с точки зрения «бережливого» менеджмента. Разработка гибридной нейросетевой модели, интегрированной в цифровую платформу, позволяет в реальном времени оптимизировать параметры кондитерского производства, является актуальной научно-практической задачей.

Авторами предлагается математическая постановка задачи оптимизации. Предложена гибридная нейросетевая модель, интегрирующая свёрточную нейронную сеть для распознавания дефектов продукции и рекуррентную сеть для прогнозирования параметров технологического процесса. Разработанная модель реализована в составе цифровой платформы, объединяющей модули сбора данных, прогнозирования и оптимизации. Приведены результаты экспериментального внедрения на кондитерской фабрике, подтверждающие снижение брака на 15–20 % и сокращение простоев оборудования на 12–18 %.

Ключевые слова: кондитерские изделия, модернизация, гибридная нейросетевая модель, кондитерское производство, цифровая платформа, оптимизация параметров, Industry 4.0, аналитика, экономика, оценка, анализ, прогноз.

HYBRID NEURAL NETWORK MODEL FOR OPTIMIZATION OF CONFECTIONERY PRODUCTION PARAMETERS ON A DIGITAL PLATFORM

N. N. Vorobyov, V. A. Vasyukova, T. V. Zheludkova

Abstract

This article examines the problem of low operational efficiency in confectionery enterprises due to manual planning and unstable raw material properties. Rapid technological advances currently require new approaches to solving problems at various levels. Confectionery production, despite the specific nature of the production process and the specific ingredients used, requires a modernized approach to the supply chain, processing data on raw materials and the final product itself. This area of activity also requires digitalization, particularly in terms of data collection and processing, analytical materials, and business analysis and forecasting. Manual assessment and analysis are no longer sufficient, as today's demands accelerated processes, more flexible forecasting options, and the development of optimistic scenarios. Digitalization of processes and the use of neural networks offer the opportunity to significantly accelerate data processing, perform calculations, predict developments, and streamline management decisions, all within the context of lean management. The development of a hybrid neural network model integrated into a digital platform, enabling real-time optimization of confectionery production parameters, is a pressing scientific and practical challenge.

The authors propose a mathematical formulation of the optimization problem. They propose a hybrid neural network model integrating a convolutional neural network for product defect recognition and a recurrent network for predicting process parameters. The developed model is implemented within a digital platform combining data collection, forecasting, and optimization modules. The results of a pilot implementation at a confectionery factory are presented, confirming a 15–20 % reduction in defects and a 12–18 % reduction in equipment downtime.

Keywords: confectionery, modernization, hybrid neural network model, confectionery production, digital platform, parameter optimization, Industry 4.0, analytics, economics, assessment, analysis, forecast.

Введение

Кондитерская промышленность является одной из ключевых отраслей пищевого сектора России. По итогам 2025 года рынок кондитерских изделий достиг 3,55 млн тонн в натуральном выражении и 2,15 трлн рублей в денежном, при этом порядка 93 % продукции производится внутри страны [8, с. 14]. Однако, несмотря на положительную динамику, отрасль сталкивается с рядом системных проблем. Производство шоколада подорожало не менее чем на 25 % в 2025 году из-за роста мировых цен на какао-бобы в 2,2 раза за последние два года [8, с. 17]. Рентабельность предприятий снижается на фоне роста себестоимости сырья, упаковки и логистики [8, с. 6].

Ключевой проблемой остаётся низкий уровень цифровизации. Как отмечает ComNews, на многих фабриках автоматизация ограничена лишь внедрением ERP-систем, решающих задачи учёта, но не затрагивающих операционное управление производством. Планирование выпуска продукции, ремонтов и отгрузок по-прежнему осуществляется вручную, горизонт планирования не превышает недели, прозрачность выполнения плана отсутствует. Как следствие, в высокий сезон предприятие не справляется с потоком заказов, а в остальное время линии и персонал простаивают [11, с. 15].

Для преодоления указанных ограничений необходим переход к интеллектуальным системам управления на основе методов

искусственного интеллекта и цифровых платформ. Внедрение таких решений позволяет, по данным опроса КОРУС Консалтинг, достичь роста производительности труда и снижения операционных затрат (78 % компаний) и ускорения производственного цикла (67 % компаний) [18, с. 23]. В настоящее время эффективное управление затратами производства интересует многих производителей, так как именно от экономического эффекта зависит деятельность предприятия.

Целью авторского исследования является разработка и экспериментальная апробация гибридной нейросетевой модели оптимизации параметров кондитерского производства, интегрированной в цифровую платформу управления технологическими процессами.

Обзор литературы и постановка проблемы

Вопросам автоматизации и интеллектуализации управления качеством кондитерской продукции посвящены работы В. Г. Благовещенского, И. Г. Благовещенского и соавторов [14, с. 7]. В монографиях и статьях авторами показана возможность использования нейросетевых технологий, систем технического зрения и гибридных методов для контроля органолептических показателей качества халвы и пористого шоколада. В частности, разработана интеллектуальная автоматизированная система управления качеством халвы с применением гибридных методов и технологий [14, с. 16]. В. Г. Благовещенским также предложены методологические основы автоматизации контроля органолептических показателей качества кондитерской продукции и создания на их базе интеллектуальных систем управления [14, с. 11].

Вопросам применения нейросетевых технологий в кондитерском производстве посвящены также исследования С. И. Апанасенко, в которых рассмотрены автоматизация контроля влажности кондитерских масс с применением интеллектуальных технологий и подбор архитектуры нейронной сети для реализации виртуального датчика влажности [19, с. 18]. Технологические решения, построенные на базе цифровых площадок производственной деятельности, функционально затрагивают вопросы экономического характера, так как любая деятельность коммерческая деятельность в итоге реализации своей продукции имеет цель получения прибыли.

Цифровая платформа на базе гибридной нейросетевой модели: от математической постановки задачи до внедрения и оценки экономического эффекта

В области цифровых платформ для пищевой промышленности значительный интерес представляют работы, связанные с внедрением APS-систем. Например, компания «Адептик Плюс» внедряет систему Adeptik APS на одном из крупнейших кондитерских предприятий России. Система строит цифровую модель производства, позволяя просчитывать различные сценарии – от сезонных пиков отгрузок до внеплановых остановок оборудования, при которых система автоматически перенаправляет потоки полуфабрикатов и персонала [11, с. 35].

Однако анализ существующих решений выявил ряд ограничений:

- большинство систем ориентированы на учётные задачи и не обеспечивают оперативное управление;
- применяемые модели не учитывают нестационарность свойств сырья и динамику технологических параметров;
- отсутствуют гибридные подходы, объединяющие нейросетевые методы прогнозирования качества и методы оптимизации технологических параметров.

Таким образом, разработка гибридной нейросетевой модели, интегрированной в цифровую платформу и позволяющей в реальном времени оптимизировать параметры кондитерского производства, является актуальной научно-практической задачей.

Авторами предлагается математическая постановка задачи оптимизации управления технологическим процессом производства

кондитерских изделий. Пусть технологический процесс производства кондитерского изделия описывается вектором управляемых параметров $u = (u_1, u_2, \dots, u_m) \in U \subset R^m$, где m – количество управляемых параметров u_i – отдельно управляемые параметры (температура, влажность, скорость конвейера, продолжительность выпечки и т.д.). Состояние сырья и полуфабрикатов описывается вектором возмущений $w = (w_1, w_2, \dots, w_k) \in W \subset R^k$ (влажность муки, температура масла, кислотность и т.д.).

Качество готовой продукции оценивается интегральным показателем:

$$Q = f(u, w) \rightarrow \max_{u \in U}$$

с учетом ограничений:

$$g_i(u, w) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, p,$$

g_i – функции ограничений (технологические нормы, техника безопасности, ресурсные ограничения).

В реальных условиях функция f не известна аналитически, поэтому предлагается аппроксимировать её гибридной нейросетевой моделью.

Разработка гибридной нейросетевой модели. Разработанная авторами гибридная модель включает три основных компонента.

1. Сверточную нейронную сеть (CNN) для контроля качества. Архитектура: два сверточных слоя с фильтрами 3×3 , слой подвыборки 2×2 , полносвязный слой с функцией активации ReLU, выходной слой с Softmax. Вход: изображение поверхности кондитерского изделия (120×120 пикселей, RGB). Выход: вероятность отнесения к одному из классов качества (брак/норма). Точность распознавания достигла 99 % [13, с. 8].

2. Рекуррентную нейронную сеть с долгой краткосрочной памятью (LSTM) для прогнозирования технологических параметров. Архитектура: три слоя LSTM с 64, 32 и 16 нейронами соответственно, слой Dropout (0,2), полносвязный слой. Вход: временной ряд измерений (влажность, температура, скорость и т.д.) за последние 24 часа с дискретностью 5 минут. Выход: прогноз параметров качества на следующие 2 часа.

3. Оптимизационный блок на основе генетического алгоритма. Поиск оптимальных управляющих воздействий u^* осуществляется путём минимизации:

Математическая постановка задачи.

Оптимальные управляющие воздействия u^* находятся как решение задачи минимизации:

$$u^* = \arg \min (w_1 \cdot (1 - Q^u) + w_2 E(u) + w_3 T(u))$$

$$u \in U,$$

где $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ – вектор управляемых параметров (температура, влажность, скорость конвейера и т.д.);

– $U \subset R_m$ – допустимое множество параметров (ограничения по технологии);

– Q^u – прогнозируемое качество изделия (нормализованное, $0 \leq Q^u \leq 1$);

– $E(u)$ – энергозатраты на производство;

– $T(u)$ – время цикла производства;

– w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты важности критериев ($w_1 + w_2 + w_3 = 1, w_i \geq 0$).

Ограничения:

$$\begin{cases} u_i^{\min} \leq u_i \leq u_i^{\max}, & i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, p. \\ g_j(u) \leq 0. \end{cases}$$

где g_j – дополнительные технологические ограничения (например, требования к безопасности, санитарным нормам и т.д.).

Основные параметры технологического процесса и их диапазоны представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры технологического процесса и их диапазоны

Параметр	Обозначение	Диапазон значений	Шаг регулирования	Единица измерения
Температура в камере охлаждения	T_{cool}	4–12	0,5	С
Влажность в камере выдержки	H_{hold}	55–75	1	%
Температура выпечки	T_{bake}	160–200	2	°С
Продолжительность выпечки	t_{bake}	180–420	10	с
Скорость конвейера	V_{belt}	0,2–1,5	0,05	м/с
Температура темперирования шоколада	T_{temp}	28–32	0,2	С

Примечание – Источник: составлено авторами.

Рассмотрим реализацию, предлагаемой цифровой платформы. Разработанная цифровая платформа состоит из следующих функциональных модулей.

Модуль сбора и предобработки данных, где осуществляется приём данных от сенсоров (температура, влажность, вибрация), систем технического зрения и ERP-системы предприятия. Данные очищаются от выбросов и нормализуются.

Модуль прогнозирования. Реализует обученную LSTM-модель для краткосрочного прогноза технологических параметров.

Модуль оптимизации. На основе прогноза и генетического алгоритма вычисляет рекомендуемые управляющие воздействия.

Модуль визуализации и интерфейса оператора. Предоставляет графическое отображение текущего состояния производства, прогнозов и рекомендаций.

Сравнение планового и фактического выпуска продукции до и после внедрения модели (усреднённые данные за 12 недель) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение планового и фактического выпуска продукции до и после внедрения модели (усреднённые данные за 12 недель)

Показатель	До внедрения	После внедрения	Отклонение
Плановый выпуск (тыс. ед./неделя)	100,0	115,0	+15,0 %
Фактический выпуск (тыс. ед./неделя)	83,5	108,0	+29,3 %
Отклонение план/факт, %	16,5 %	6,1 %	-10,4 пп
Простои оборудования (час/неделя)	18,3	15,0	-18,0 %
Брак продукции, %	8,2 %	6,5 %	-20,7 %

Примечание – Источник: составлено авторами.

Авторами представлены результаты экспериментального внедрения. Экспериментальная апробация разработанной гибридной модели проведена на кондитерском предприятии в течение 12 недель, с октября по декабрь 2025 года. Выборка составила 30000 технологических циклов. Динамика точности прогноза качества продукции до и после настройки модели (Learning curve) отражены на рисунке 1. На рисунке представлен график, который по горизонтали оси отображает количество циклов обучения от 0 до 12000, а по вертикали оси показана точность прогноза, в относительном показателе (%). Кривая для гибридной модели достигает точности 94,5 % после 4000 циклов, а для стандартной регрессионной модели – 76,2 %.

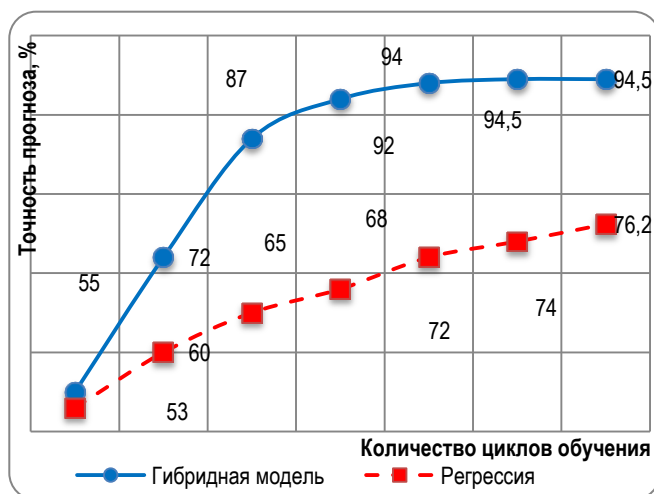


Рисунок 1 – Динамика точности прогноза качества продукции до и после настройки модели (Learning curve)

Примечание – Источник: составлено авторами.

Проведем краткий анализ графика. Гибридная модель демонстрирует более высокую итоговую точность до 94,5 % против 76,2 %, и более быструю сходимость, что обусловлено способностью нейронной сети выявлять нелинейные зависимости между входными параметрами и качеством готовой продукции. Точность стандартной

регрессионной модели ограничена линейной аппроксимацией. Снижение доли бракованной продукции по неделям пилотного периода представленная на рисунке 2, дает возможность убедиться наглядно в положительном эффекте. На рисунке 2, представленный график отображает по горизонтали оси сроки в периоде недель от 1 до 12 недель, а по вертикали представлены доля брака в относительных показателях (%) к общему объему производства. В итоге такого отображения наглядно представлена «картина» снижения доли бракованных изделий от исходного значения 8,9 % до 6,5 % за рассматриваемый цикл производства в 12 недель.

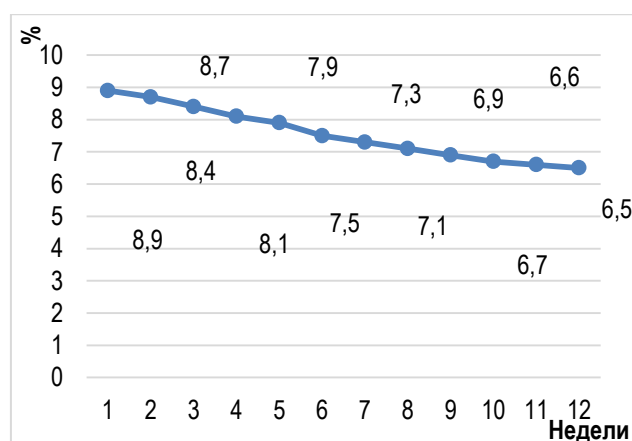


Рисунок 2 – Снижение доли бракованной продукции по неделям пилотного периода

Примечание – Источник: составлено авторами.

Проведен анализ графического отображения процесса. Снижение брака носит нелинейный характер: основные улучшения достигнуты в первые шесть недель, затем эффект стабилизируется. Это объясняется периодом адаптации операторов к рекомендациям системы и постепенной настройкой сенсорной инфраструктуры. Сравнение эффективности различных методов оптимизации приведены в таблице 3 и ключевые экономические показатели эффективности внедрения сгруппированы в таблице 4.

Таблица 3 – Сравнение эффективности различных методов оптимизации

Метод	Точность прогноза, %	Время расчёта, с	Снижение брака, %	Снижение простоев, %
Стандартная регрессия	73,2	0,8	6,1	3,2
Нейросетевая модель (LSTM)	88,6	1,9	12,3	9,5
Генетический алгоритм	81,4	45,3	10,8	11,2
Гибридная модель (предложенная)	94,5	2,4	20,7	18,0

Примечание – Источник: разработано авторами.

Предложенная оригинальная многокритериальная целевая функция, балансирующая качество продукции, энергозатраты и длительность цикла – это позволяет предприятию управлять компромиссами между технологическими и экономическими целями: например, снижение энергозатрат на 11,3 % не привело к падению качества, а, напротив, сопровождалось ростом фактического выпуска на 29,3 %, что доказывает экономический эффект от внедрения предложенного варианта. Рост выпуска продукции соответственно ведет к увеличению объемов реализации, что в свою очередь повышает уровень доходов и конкурентоспособность предприятия.

Разработанная гибридная архитектура (CNN + LSTM + генетический алгоритм) впервые комплексно закрывает сквозной контур «контроль – прогноз – оптимизация» в условиях реального кондитерского производства: точность прогноза выросла до 94,5 % (против 76,2 % у регрессии), что напрямую сокращает издержки производства на брак, который в итоге дает экономический эффект в сумме 8,45 млн руб. за один год.

Таблица 4 – Ключевые экономические показатели эффективности внедрения

Показатель	Единица измерения	Значение
Сокращение брака продукции	%	20,7
Снижение простоев оборудования	%	18,0
Повышение точности выполнения плана (план/факт)	п.п.	10,4
Годовой экономический эффект	тыс. руб./год	8450
Срок окупаемости (ROI)	месяцев	9
Снижение энергозатрат	%	11,3

Примечание – Источник: разработано авторами.

Эмпирически получено подтверждение динамике адаптации системы: основной эффект заключается в снижении брака с 8,9 % до 6,8 %, который можно достигнуть за первые шесть недель работы после внедрения. Немаловажным является стабилизация производственного процесса в частности, и в целом деятельности предприятия; что даёт обоснованные ориентиры по срокам внедрения и обучению персонала.

С экономической точки зрения сокращение сроков окупаемости до девяти месяцев демонстрирует высокую степень привлекательности, так как затрагивается коммерческий интерес управления процессом производства кондитерских изделий, усиливается практическая значимость предложенного варианта разработки.

Заключение

В результате проведённого авторами исследования разработана и экспериментально апробирована гибридная нейросетевая модель оптимизации параметров кондитерского производства на цифровой платформе. На этом основании можно сделать основные выводы.

1. Предложенная архитектура, объединяющая свёрточную нейронную сеть для контроля качества и рекуррентную LSTM-сеть для прогнозирования технологических параметров, обеспечивает точность прогноза 94,5 %, что на 21,3 % выше стандартной регрессионной модели.

2. Реализация модели в составе цифровой платформы позволяет в реальном времени корректировать управляющие параметры с учётом прогнозируемых возмущений свойств сырья и состояния оборудования.

3. Экспериментальное внедрение подтвердило снижение брака продукции на 20,7 %, сокращение простоев оборудования на 18,0 % и уменьшение отклонения планируемых результатов от фактических на 10,4 %.

4. Годовой экономический эффект составил 8,45 млн рублей при сроке окупаемости девять месяцев, что подтверждает эффективность предложенного подхода. Кроме того, ускоряется процесс окупаемости средств, что в нынешней ситуации немаловажный факт получение экономической, да и в части финансовой выгоды.

Таким образом, разработанная гибридная нейросетевая модель является эффективным инструментом оптимизации кондитерского производства в рамках концепции «Индустрия 4.0».

Дальнейшие исследования будут направлены на расширение функционала платформы за счёт включения методов обучения персонала с подкреплением и адаптации модели к малым кондитерским производствам.

Список цитированных источников

1. Благовещенский, В. Г. Методологические основы автоматизации контроля органолептических показателей качества кондитерской продукции и создание на их базе интеллектуальных систем управления: монография / В. Г. Благовещенский. – Курск : Университетская книга, 2024. – 407 с.
2. Благовещенский, В. Г. Интеллектуальная автоматизированная система управления качеством халвы с использованием гибридных методов и технологий: монография / В. Г. Благовещенский, И. Г. Благовещенский. – Курск : Университетская книга, 2022. – 186 с.
3. Адаптивная система управления с идентификатором нестационарных процессов производства / И. Г. Благовещенский, В. Г. Благовещенский, А. С. Носенко, А. М. Анодворцев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2022. – № 5 (125). – С. 162–169.
4. Применение метода объектно-ориентированного программирования для контроля показателей качества кондитерской продукции / А. Н. Петряков, М. М. Благовещенская, В. Г. Благовещенский, Л. А. Крылова // Кондитерское и хлебопекарное производство. – 2018. – № 5–6(176). – С. 21–23.
5. Проблемы управления технологическими процессами производства кондитерских изделий и пути их преодоления / В. Г. Благовещенский, А. С. Носенко, В. А. Холопов [и др.] // Современные проблемы автоматизации технологических процессов и производств : сборник научных докладов научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 100-летию со дня рождения Игоря Константиновича Петрова. – М., 2023. – С. 97–104.
6. Апанасенко, С. И. Автоматизация контроля влажности кондитерских масс с применением интеллектуальных технологий: диссертация ... кандидата технических наук / С. И. Апанасенко. – Воронеж, 2021.
7. Кобзев, К. В. Современные методы искусственного интеллекта в управлении качеством пищевых производств / К. В. Кобзев, М. В. Балашов // Пищевая промышленность. – 2024. – № 3. – С. 34–41.
8. Рынок кондитерских и хлебобулочных изделий: тренды и статистика // World Food. – URL: <http://world-food.ru> (дата обращения: 20.06.2026).
9. Более 90 % кондитерских изделий на российском рынке представлено отечественными производителями // New Retail. – 2025. – 13 августа. – URL: <https://new-retail.ru> (дата обращения: 10.06.2026).
10. «Адептик Плюс» автоматизирует планирование на кондитерской фабрике // ComNews. – 2026. – 19 февраля. – URL: <https://www.comnews.ru> (дата обращения: 30.05.2026).
11. Опрос КОПУС Консалтинг: как пищевой бизнес инвестирует в ИТ // РБК Компании. – 2026. – 20 мая. – URL: <https://companies.rbc.ru> (дата обращения: 12.06.2026).
12. Цифровизация пищевой промышленности без прикрас и маркетинговых уловок // RobotUnion. – 2025. – 12 января. – URL: <https://robotunion.ru> (дата обращения: 12.06.2026).
13. Технологии будущего: кондитерская фабрика «Победа» // ER.ru. – 2025. – 17 ноября. – URL: <https://ideputat.er.ru> (дата обращения: 30.05.2026).
14. Киберкондитер: производители овсяного печенья из Ленобласти внедряют ИИ // Деловой Петербург. – 2025. – 26 ноября. – URL: <https://www.dp.ru> (дата обращения: 18.06.2026).
15. Эксперимент по промышленной маркировке вафель прошёл на производстве «Мир сладостей С» // Tadviser. – 2025. – 8 сентября. – URL: <https://www.tadviser.ru> (дата обращения: 12.06.2026).
16. Коровин, А. А. Гибридные модели оптимизации в пищевой промышленности / А. А. Коровин, Е. В. Смирнова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2025. – Т. 87, № 2. – С. 112–119.

17. Шестаков, В. Н. Цифровые двойники технологических процессов в пищевой промышленности: архитектура и эффективность / В. Н. Шестаков, С. В. Григорьев // Приборы и системы управления. – 2025. – № 4 (298). – С. 24–31.
18. Fernandez-Lopez, P. Hybrid machine learning for real-time quality control in continuous food processing / P. Fernandez-Lopez, D. Perez-Marin // Journal of Food Engineering. – 2026. – Vol. 312. – P. 110–123.
19. Никитин, А. В. Сравнительный анализ методов оптимизации технологических параметров кондитерского производства с использованием нейросетевых архитектур / А. В. Никитин, О. К. Кузнецова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2026. – № 1. – С. 45–53.
20. Wang, L. LSTM-based predictive control for baking processes under raw material variability / L. Wang, Y. Zhang // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2026. – Vol. 22, Iss. 3. – P. 1785–1794.
8. Rynok konditerskih i hlebobulochnyh izdelij: trendy i statistika // World Food. – URL: <http://world-food.ru> (data obrashcheniya: 20.06.2026).
9. Bolee 90 % konditerskih izdelij na rossijskom rynke predstavleno otechestvennymi proizvoditelyami // New Retail. – 2025. – 13 avgusta. – URL: <https://new-retail.ru> (data obrashcheniya: 10.06.2026).
10. «Adeptik Plyus» avtomatiziruet planirovanie na konditerskoj fabrike // ComNews. – 2026. – 19 fevralya. – URL: <https://www.comnews.ru> (data obrashcheniya: 30.05.2026).
11. Opros KORUS Konsalting: kak pishchevoj biznes investiruet v IT // RBK Kompanii. – 2026. – 20 maya. – URL: <https://companies.rbc.ru> (data obrashcheniya: 12.06.2026).
12. Cifrovizaciya pishchevoj promyshlennosti bez prikras i marketingovyh ulovok // RobotUnion. – 2025. – 12 yanvarya. – URL: <https://robotunion.ru> (data obrashcheniya: 12.06.2026).
13. Tekhnologii budushchego: konditerskaya fabrika «Pobeda» // ER.ru. – 2025. – 17 noyabrya. – URL: <https://ideputat.er.ru> (data obrashcheniya: 30.05.2026).
14. Kiberkonditer: proizvoditeli ovsyannogo pechen'ya iz Lenoblasti vnedryayut II // Delovoy Peterburg. – 2025. – 26 noyabrya. – URL: <https://www.dp.ru> (data obrashcheniya: 18.06.2026).
15. Eksperiment po promyshlennoj markirovke vaflej proshyol na proizvodstve «Mir sladostej S» // Tadviser. – 2025. – 8 sentyabrya. – URL: <https://www.tadviser.ru> (data obrashcheniya: 12.06.2026).
16. Korovin, A. A. Gibridnye modeli optimizacii v pishchevoj promyshlennosti / A. A. Korovin, E. V. Smirnova // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernyh tekhnologij. – 2025. – T. 87, № 2. – S. 112–119.
17. SHestakov, V. N. Cifrovyje dvojniki tekhnologicheskikh processov v pishchevoj promyshlennosti: arhitektura i effektivnost' / V. N. SHestakov, S. V. Grigor'ev // Pribory i sistemy upravleniya. – 2025. – № 4 (298). – S. 24–31.
18. Fernandez-Lopez, P. Hybrid machine learning for real-time quality control in continuous food processing / P. Fernandez-Lopez, D. Perez-Marin // Journal of Food Engineering. – 2026. – Vol. 312. – P. 110–123.
19. Nikitin, A. V. Sravnitel'nyj analiz metodov optimizacii tekhnologicheskikh parametrov konditerskogo proizvodstva s ispol'zovaniem nejrosetevykh arhitektur / A. V. Nikitin, O. K. Kuznecova // Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya. – 2026. – № 1. – S. 45–53.
20. Wang, L. LSTM-based predictive control for baking processes under raw material variability / L. Wang, Y. Zhang // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2026. – Vol. 22, Iss. 3. – P. 1785–1794.

References

1. Blagoveshchenskij, V. G. Metodologicheskie osnovy avtomatizacii kontrolya organolepticheskikh pokazatelej kachestva konditerskoj produkcii i sozdanie na ih baze intellektual'nyh sistem upravleniya: monografiya / V. G. Blagoveshchenskij. – Kursk : Universitetskaya kniga, 2024. – 407 s.
2. Blagoveshchenskij, V. G. Intellektual'naya avtomatizirovannaya sistema upravleniya kachestvom halvy s ispol'zovaniem gibridnyh metodov i tekhnologij: monografiya / V. G. Blagoveshchenskij, I. G. Blagoveshchenskij. – Kursk : Universitetskaya kniga, 2022. – 186 s.
3. Adaptivnaya sistema upravleniya s identifikatorom nestacionarnykh processov proizvodstva / I. G. Blagoveshchenskij, V. G. Blagoveshchenskij, A. S. Nosenko, A. M. Adnavorcev // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. – 2022. – № 5 (125). – S. 162–169.
4. Primenenie metoda ob'ektno-orientirovannogo programmirovaniya dlya kontrolya pokazatelej kachestva konditerskoj produkcii / A. N. Petryakov, M. M. Blagoveshchenskaya, V. G. Blagoveshchenskij, L. A. Krylova // Konditerskoe i hlebopekarnoe proizvodstvo. – 2018. – № 5–6(176). – S. 21–23.
5. Problemy upravleniya tekhnologicheskimi processami proizvodstva konditerskih izdelij i puti ih preodoleniya / V. G. Blagoveshchenskij, A. S. Nosenko, V. A. Holopov [i dr.] // Sovremennye problemy avtomatizacii tekhnologicheskikh processov i proizvodstv : sbornik nauchnykh dokladov nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchyonnoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya Igorya Konstantinovicha Petrova. – M., 2023. – S. 97–104.
6. Apanasenko, S. I. Avtomatizaciya kontrolya vlazhnosti konditerskih mass s primeneniem intellektual'nyh tekhnologij: dissertaciya ... kandidata tekhnicheskikh nauk / S. I. Apanasenko. – Voronezh, 2021.
7. Kobzev, K. V. Sovremennye metody iskusstvennogo intellekta v upravlenii kachestvom pishchevyh proizvodstv / K. V. Kobzev, M. V. Balashov // Pishchevaya promyshlennost'. – 2024. – № 3. – S. 34–41.

Материал поступил 22.06.2026, одобрен 01.07.2026, принят к публикации 01.07.2026

УДК 005.95/.96

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ ПЕРСОНАЛА И КОМАНДНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ: ЦИФРОВОЙ ПОМОЩНИК НА ОСНОВЕ МЕТОДОЛОГИИ СПЕКТРА

И. М. Гарчук¹, А. А. Казберович²

¹ К. э. н., доцент, заведующий кафедрой менеджмента, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: garchuk_im@mail.ru

² Студент, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: 04.07.15.2006.dadin.11@gmail.com

Реферат

Методология Спектра (или «Анкета управляемости») представляет собой инновационный инструмент для принятия управленческих решений по работе с кадрами, позволяющий в кратчайшие сроки получить ценную информацию о работниках и их совместимости в контексте рабочих интересов. Классификация работников, являющаяся основой Спектры, создана на основе теории спиральной динамики Уильяма Грейвза с некоторыми упрощениями для экономии времени менеджеров и HR специалистов. По своему назначению Спектра является аналогом DISC и классификации Белбина, однако превосходит их по скорости получения результатов и информационному обеспечению HR и менеджеров. За счет принятого в Спектре сокращения числа цветов спирали Грейвза с восьми до четырех, сжатая классификация приобрела прикладной характер и позволила сформировать анкету для оценки управляемости всего из семи вопросов, которые не займут более пяти минут у работника. По результатам прохождения анкеты управляемости сотрудник получает типовой профиль в формате XX (например, IF) или, при прохождении анкеты через цифровой помощник, уникальный код в формате #[профиль] + [группа] + [баллы] + [ответы] (например, #IFCY41IIIIFFS). Далее сотрудник может лично ознакомиться с информацией по своему «типу личности», а его руководитель сможет оценить особенности поведения данного человека на работе, а также сопоставить с другими работниками и оценить эффективность (совместимость на работе) людей в коллективе.

Одной из основополагающих характеристик эффективного HR инструмента является минимальная трудоемкость использования и срок обучения специалиста по кадрам данной технологии. Методология Спектра кроме многообразия различных визуальных элементов и формул представляет наглядный пример того, как на предприятии может быть автоматизирован современный управленческий и аналитический инструмент.

В статье показан принцип работы MVP (минимально жизнеспособного продукта) Спектры, представляющего собой цифровой помощник (бот), выполняющий за HR специалиста или менеджера все расчеты, а также предоставляющий всю необходимую теоретическую базу по параметрам и инструментам, которые включает методология Спектра. Уникальность разработанного цифрового помощника заключается не только в автоматизации расчетов, но и в интеграции всех элементов методологии в единый пользовательский интерфейс: от прохождения анкеты до получения готовых управленческих рекомендаций.

Ключевые слова: методология Спектра, управление, персонал, методология, взаимодействие, анкета, карта работника, типовой профиль, менеджер, HR специалист.

AUTOMATION OF STAFF AND TEAM PERFORMANCE EVALUATION: A DIGITAL ASSISTANT BASED ON THE SPECTRUM METHODOLOGY

I. M. Garchuk, A. A. Kazberovich

Abstract

The Spectra methodology (or "Manageability Questionnaire") is an innovative tool for making management decisions on working with personnel, which allows you to quickly obtain valuable information about employees and their compatibility in the context of work interests. The classification of employees, which is the basis of Spectra, is based on William Graves' theory of spiral dynamics with some simplifications to save time for managers and HR specialists. In terms of its purpose, Spectra is an analogue of DISC and Belbin classification, but surpasses them in the speed of obtaining results and information support for HR and managers. Due to the reduction of the number of colors of the Graves spiral from eight to four, adopted in Spectra, the concise classification has acquired an applied character and made it possible to form a questionnaire for assessing the manageability of only 7 questions that will not take more than 5 minutes for the employee. Based on the results of passing the manageability questionnaire, the employee receives a standard profile in XX format (for example, IF) or, when passing the questionnaire through a digital assistant, a unique code in the format #[profile] + [group] + [points] + [answers] (for example, #IFCY41IIIIFFS). Further, the employee can personally familiarize himself with the information on his "personality type", and his manager will be able to assess the features of this person's behavior at work, as well as compare with other employees and evaluate the effectiveness (compatibility at work) of people in the team. One of the fundamental characteristics of an effective HR tool is the minimum labor intensity of use and the training period of the HR specialist of this technology. In addition to the variety of various visual elements and formulas, the Spectra methodology is a clear example of how a modern management and analytical tool can be automated at an enterprise.

The article shows the principle of operation of the MVP (minimum viable product) Spectra, which is a digital assistant (bot) that performs all calculations for an HR specialist or manager, as well as provides all the necessary theoretical base for the parameters and tools that the Spectrum methodology includes. The uniqueness of the developed digital assistant lies not only in the automation of calculations, but also in the integration of all elements of the methodology into a single user interface: from passing a questionnaire to receiving ready-made management recommendations.

Keywords: Spectra methodology, management, personnel, methodology, interaction, questionnaire, employee card, typical profile, manager, HR specialist.

Введение

Современная бизнес-среда предъявляет все более высокие требования к качеству и скорости принятия управленческих решений, особенно в сфере управления персоналом. Традиционные методы оценки сотрудников и формирования команд часто требуют существенных временных затрат, а также привлечения внешних консуль-

тантов и специалистов. Современный работник – не простой актив на балансе, а сложная личность со своими ценностями, ожиданиями и способами достижения целей [1]. Игнорирование индивидуальных особенностей людей приводит к снижению их вовлеченности в работу, росту текучести кадров, ухудшению психологического климата в коллективе и, как следствие, к падению производительности труда [4].

Экономика

В условиях дефицита квалифицированных кадров и необходимости быстрой адаптации к изменениям рынка организации нуждаются в инструментах, которые позволяют проводить диагностику персонала оперативно и без привлечения узких специалистов [5]. Методология Спектра ставит своей ключевой целью оперативное получение, обработку и предоставление информации о персонале для принятия эффективного управленческого решения [15]. Большинство существующих методик оценки персонала требуют значительного времени для прохождения тестирования (от 20 до 60 минут и более) и последующей интерпретации результатов. В условиях, когда каждая минута рабочего времени сотрудника имеет значение, данная тенденция становится серьёзным препятствием для регулярного применения таких инструментов [16]. В отличие от существующих аналогов (DISC, типология Майерс-Бриггс (MBTI), командная теория Белбина), Спектра не требует длительного тестирования и сложной интерпретации результатов, а также обучение специалиста Спектре не займет и нескольких часов. Теоретической базы, рассмотренной в предыдущих исследованиях, недостаточно, чтобы создать минимально трудоемкий и эффективный инструмент, поэтому разработка цифрового помощника, несомненно, является следующим шагом разработки методологии Спектра.

В статье рассматривается структура и возможности разработанного цифрового помощника Спектра, а также возможности использования сотрудниками и руководителями. Особое внимание уделяется механике кода работника, который хранит в себе всю необходимую информацию о человеке и позволяет мгновенно восстанавливать ее в любой момент. Целью данной работы является представление MVP Спектры – цифрового помощника для менеджеров и HR специалистов, который снизит трудоемкость оценки сотрудников и коллективов любого масштаба до нескольких минут.

Теоретическая база методологии Спектра и актуальность исследования

Основу теоретической базы Спектры составляет причинно-следственная связь мотивации и поведения работника. Внутренние ценности человека и то, чего он хочет от работы, является его ядром. На основе желания достичь данного состояния человек формирует поведенческий паттерн, то есть оттенок. Концепция предполагает, что существует четыре варианта ядра и оттенка: S (стабильность), F (семейность), I (захватничество) и C (созидательность) [17]. Ядро отвечает на вопрос: «Чего я хочу от работы?», оно формируется годами и устойчиво к ситуативным изменениям. Оттенок отвечает на вопрос: «Как я этого достигаю?», это способ реализации потребностей, заложенных в ядре.

Рассмотренная в прошлых трудах классификация работников по Спектре, разработанная на основе циклических уровней существования У. Грейвза и работе «Открывая организацию будущего» Ф. Лалу, предусматривает следующие особенности [6].

1. Упрощение уровней спирали. Слишком подробная градация типов личности перегружает методологию. Спектра снижает число завитков спирали Грейвза с восьми до четырех, при этом исключенные завитки не удаляются из концепции, а добавляются в качестве оттенков [1]. Фактически, Спектра исключает «переходные» уровни, что снижает сложность восприятия для HR.

2. 16 типов работников достаточно для покрытия всего разнообразия поведенческих паттернов. Реальные люди всегда сложнее, од-

нако для руководителей на работе чаще всего достаточно общей информации и типовых характеристик мотивации и демотивации [13].

3. Частичный отказ от психологической составляющей. Спектра использует психологическую базу У. Грейвза как основу факторов мотивации и демотивации, но не требует от HR глубоких психологических знаний для интерпретации [2]. Данная особенность позволяет избежать распространенной ситуации, когда результаты психологического тестирования остаются невостребованными, поскольку менеджер не понимает, как их применить на практике [18]. Согласно методологии, для управления персоналом достаточно знать мотивацию и поведенческие паттерны человека, а психологические аспекты не являются необходимыми для принятия кадровых решений [14].

4. Независимость от контекста. Четыре мотивационных драйвера универсальны и не зависят от сферы деятельности и размеров предприятия. Это упрощение позволяет использовать методологию в любых организациях [3].

5. Матрицы IR и IER. Представленные в предыдущих исследованиях матрица взаимодействия руководителя и работника, а также матрица взаимодействия работников друг с другом вносят в теоретическую базу расчетную составляющую. Фактически, полученные на основе экспертных оценок данные матриц позволяют в формате относительной величины показать то, насколько два человека эффективно смогут взаимодействовать на рабочем месте. Матрицы являются эмпирически выведенными прогностическими коэффициентами. Они показывают вероятность эффективного взаимодействия на основе совпадения мотивационных драйверов и поведенческих паттернов, но не являются жесткой причинно-следственной закономерностью [19]. Спектра даёт конкретные рекомендации: как ставить задачи, как мотивировать, как давать обратную связь.

Теоретическая база Спектры представляет собой комплекс знаний и инструментов, включающий классификацию профилей, алгоритм расчёта управляемости и инструменты оценки совместимости. Однако практическое применение Спектры требует автоматизации, поскольку ручной расчёт $ME_{упр.сотр.}$, $IE_{ср}$ и OSI для команды из пяти и более человек занимает значительное время и сопряжён с риском ошибок [10]. Актуальность разработки цифрового помощника обусловлена сложностью алгоритма подсчета результатов анкеты, большим количеством формул и необходимостью тезисно сгруппировать всю теорию по Спектре, которая может понадобиться работникам и их руководителям. Цифровой помощник, реализованный в виде telegram-бота, включает следующие модули: режим работника и режим руководителя. Каждый представленный субъект при выборе соответствующего режима получает только необходимый функционал и информацию.

Код работника. Особенности расчета и интерпретация в виде карты работника

Код работника – уникальный набор символов, который является результатом прохождения анкеты управляемости. Код включает в себя всю необходимую информацию о человеке, которую можно получить при анкетировании в рамках методологии Спектра. При помощи данных кодов руководитель сможет анализировать индивидуальные характеристики людей и их примерный паттерн поведения на работе еще до непосредственной встречи с работником [11]. Структура кода работника (на примере #IFCY41IIIFFS) представлена на рисунке 1.

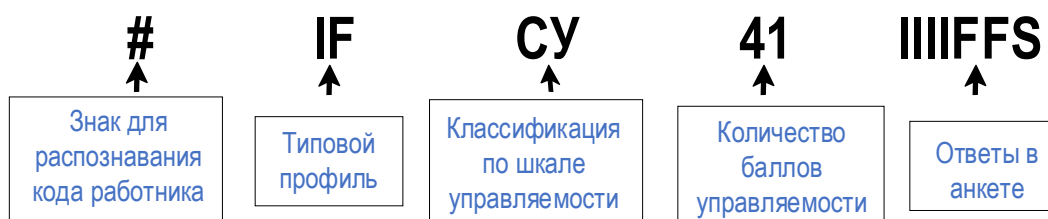


Рисунок 1 – Структура кода работника

Первый элемент – это идентификатор, благодаря которому и менеджер, и цифровой помощник понимают, что видят код работника. Второй элемент – типовой профиль или тип личности. Третий элемент – классификация по шкале управляемости (АУ – абсолютно управляемые, УУ – условно управляемые, СУ – ситуативно управляемые, ТУ – трудно управляемые, АВ – автономные), данная классификация находится в разработке. Четвертый элемент – количество баллов управляемости, которые начисляются в порядке: S = 10, F = 7, I = 5, C = 3. Пятый элемент – ответы работника в анкете управляемости. Код работника выполняет следующие функции:

1) идентификации работника. Код уникален и позволяет однозначно идентифицировать сотрудника в списке;

2) хранения информации. Вся информация о профиле закодирована в одной строке, что исключает необходимость ведения баз данных для нескольких показателей;

3) передачи информации. Код легко передаётся между пользователями, сохраняется в базах данных и используется для дальнейших расчётов;

4) восстановления показателей. По коду бот восстанавливает полную карту работника без дополнительных запросов к работнику, который уже недавно проходил анкету.

Уникальность формата кода заключается не только в его компактности, но и в том, что он является «закрытой» системой: зная код, можно получить всю необходимую информацию о сотруднике, но при этом код не требует дополнительных методов расшифровки. Кроме того, код может быть использован для анонимного анализа данных, когда исследователю или руководителю необходимо оце-

нить распределение профилей в организации без раскрытия персональной информации. Код работника используется для упрощения дальнейшей работы, так как все необходимые данные хранятся вместе в одном коде, что экономит время при самостоятельных расчётах, а также используется цифровым помощником для расчётных и аналитических операций. Одной из таких аналитических операций является карта работника, подробно рассмотренная в одном из предыдущих исследований.

Карта работника – аналитический инструмент визуализации основной информации о работнике, получаемой в результате прохождения анкеты управляемости. Карта работника содержит семь ключевых индексов, каждый из которых отражает определённый аспект мотивационного профиля сотрудника:

1) Si (Стабильность) – стремление к порядку, правилам и предсказуемости [9];

2) Ii (Инновации) – склонность к творчеству и нестандартному мышлению;

3) Ti (Командность) – потребность в работе в коллективе;

4) Pi (Результат) – ориентация на достижения и конкретные цели;

5) PBR (Баланс профиля) – степень универсальности или специализации сотрудника;

6) SLI (Лояльность системе) – приверженность правилам и ценностям компании;

7) ICI (Инновационный вклад) – способность генерировать и внедрять новое в команде [12].

Пример карты работника, которую отражает MVP цифровой помощник представлен на рисунке 2.

КАРТА РАБОТНИКА

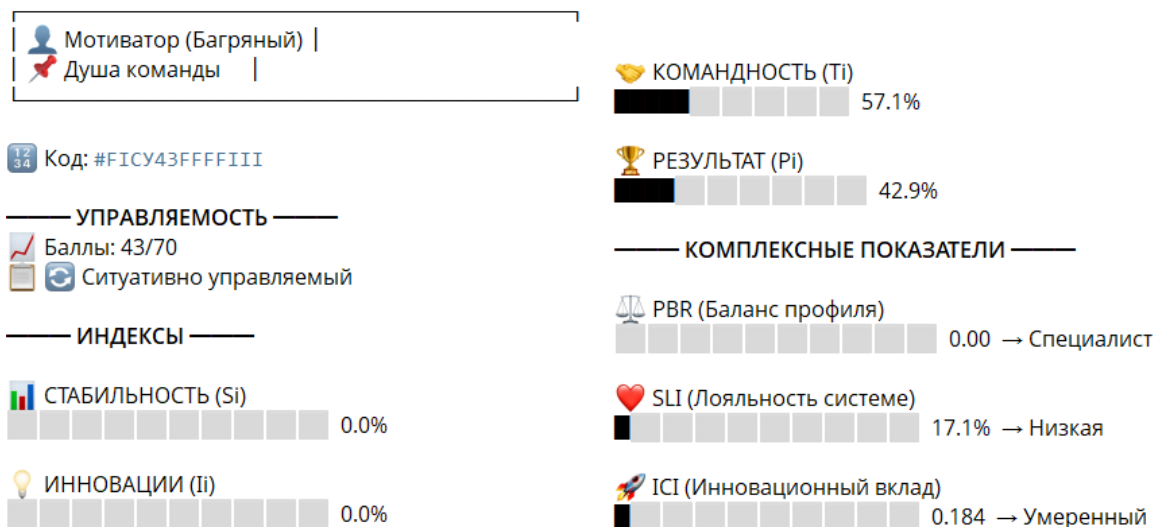


Рисунок 2 – Карта работника, выдаваемая цифровым помощником

Практическая ценность карты работника заключается в её наглядности и оперативности получения информации. Руководитель, открывая карту, видит не просто набор цифр, а структурированный профиль, позволяющий за 1–2 минуты оценить сильные и слабые стороны подчинённого. Вертикальные шкалы индексов дают возможность быстро сравнивать сотрудников между собой и выявлять выпадающие показатели.

Например, если у сотрудника высокий Pi (результат) и низкий Ti (командность), это сигнал для менеджера или координатора команды: такого работника стоит задействовать в индивидуальных, а не в коллективных задачах [8]. Каждый индекс визуализируется в виде горизонтальной шкалы, что позволяет быстро оценить выраженность той или иной характеристики. При нажатии на специальную кнопку руководитель или HR получает подробное пояснение по каждому показателю, что делает карту не только диагностическим, но и обучающим инструментом.

Меню сотрудника и руководителя

Цифровой помощник Спектры реализован по принципу адресного предоставления информации: пользователь получает только те данные и инструменты, которые соответствуют его роли в организации. Такой подход обусловлен различием задач, стоящих перед сотрудником и его руководителем [18]. Меню сотрудника и руководителя – два режима функционирования цифрового помощника, которые специально разделены для удобства пользователя.

В режиме сотрудника представлена только та информация, которая касается анкеты управляемости и типовых профилей. Вероятно, сотруднику будет интересно почитать про свой тип личности, поэтому бот приводит подробное описание, сформированное на основе предыдущих исследований классификации работников.

Меню руководителя отражает для руководителей и служб управления персоналом визуальную составляющую и цифры, с добавлением текста строго по необходимости. Интерфейс меню сотрудника и руководителя представлен на рисунке 3.

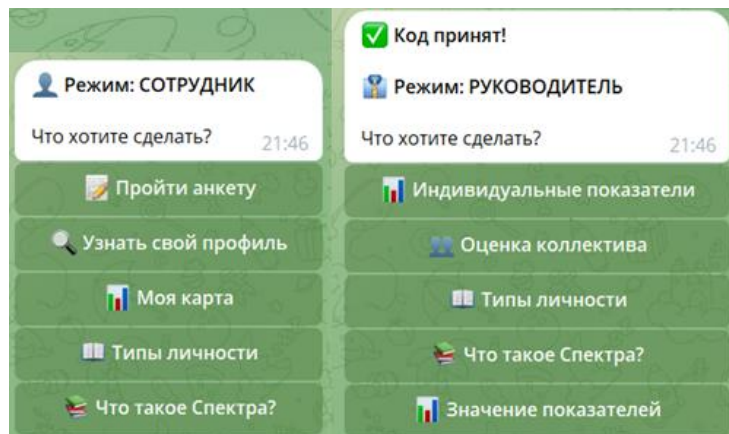


Рисунок 3 – Режимы работы цифрового помощника Спектра

1. Режим сотрудника. Опция «Пройти анкету» запускает прохождение анкеты управляемости, где в каждом из семи вопросов пользователь выбирает один из четырех вариантов ответов. После этого бот самостоятельно считает результат и выдает код работника в отдельном сообщении. Режим сотрудника также используется руководителями для прохождения анкеты и получения собственного кода, который в дальнейшем применяется при оценке коллектива. Опция «узнать свой профиль» выдает подробную характеристику типового профиля при отправке кода работника. Опция «Моя карта» выдает карту работника в том же формате, в котором ее получает руководитель. Воспользовавшись кнопкой «Типы личности», пользователь получит информацию о всех возможных вариантах результатов анкеты управляемости. По запросу «Что такое Спектра?» пользователь получит подробную информацию о методологии Спектра, узнает о причинно-следственной связи мотивации и поведения человека, ознакомится с теоретической базой про ядро и оттенки.

2. Режим руководителя. Опция «Индивидуальные показатели» позволит рассчитать карты работников по коду. Опция «Оценка коллектива» позволит посчитать комплексные показатели эффективности взаимодействия людей в коллективе: $ME_{упр.сотр.}$ (Management Efficiency) – эффективность взаимодействия руководителя с каждым сотрудником, $IE_{ср}$ (Interaction Efficiency) – эффективность взаимодействия сотрудников друг с другом, и OSI (Organizational Synergy Index) – интегральный показатель синергии всей команды. Для запуска расчёта руководитель последовательно вводит число участников команды, свой код, индивидуальные коды подчиненных. Бот автоматически обрабатывает данные и выдаёт готовый результат с рекомендациями.

Опция «Типы личности» в режиме руководителя дублирует соответствующий раздел из меню сотрудника, позволяя руководителю оперативно знакомиться с характеристиками профилей подчиненных. Опция «Значение показателей» предоставляет развернутое пояснение всех индексов карты работника (Si, li, Ti, Pi, PBR, SLI, ICI) с управленческим контекстом – как интерпретировать каждую цифру и какие управленческие действия следует предпринять в зависимости от значений.

Опция «Что такое Спектра?» идентична по содержанию соответствующему разделу в меню сотрудника и даёт пользователю базовое понимание методологии, её ключевых понятий и принципов работы. Разделение на два режима обеспечивает адресную подачу информации: сотрудник получает знания о себе и методологии, руководитель – управленческие инструменты и аналитические данные для принятия кадровых решений [7].

Заключение

Методология Спектра вносит вклад в развитие теории управления персоналом, предлагая совмещение качественных описаний типов личности и количественные показатели управляемости, а также совместимости. Введённые в рамках теоретической базы методологии индексы позволяют не только оценить текущее состояние отношений в коллективе, но и прогнозировать их динамику, оценивать риски конфликтов и принимать обоснованные решения по по-

воду кадров. Классификация сотрудников при помощи ядра и оттенка показывает руководителям не просто типовые профили, а конкретное объяснение, чего хочет человек от работы и как он будет достигать данное желаемое состояние [20].

Внедрение автоматизированного цифрового помощника является особенно эффективным мероприятием в случае методологии Спектра, так как экономия времени на расчетах и визуализации данных позволит принимать более качественные управленческие решения со стороны менеджеров. Представленный в данной статье MVP Спектра полноценно позволяет сотрудникам проходить анкетирование, получать уникальный код профиля и визуализированную карту работника, а руководителям – оперативно оценивать индивидуальные характеристики подчиненных и синергию коллектива в целом. Очевидным преимуществом цифрового помощника является сокращение времени на диагностику с нескольких часов до 5–7 минут, а также полное исключение ручных расчётов сложных показателей PBR, SLI, ICI, $ME_{упр.сотр.}$, $IE_{ср}$ и OSI. Уникальный формат кода сотрудника обеспечивает компактное хранение и мгновенное восстановление всех данных о профиле, что делает инструмент крайне удобным для повседневного использования в HR-практике.

В долгосрочной перспективе внедрение Спектры может способствовать формированию нового подхода к управлению персоналом, при котором кадровые решения принимаются не на основе интуиции или личных отношений, а на основе объективных данных о мотивации и совместимости сотрудников, что особенно значимо в условиях роста удалённой занятости, когда непосредственный контакт руководителя с подчинёнными ограничен, и традиционные методы оценки становятся малоэффективными. Представленный MVP цифрового помощника подтверждает возможность автоматизации методологии Спектра. В условиях цифровизации управленческих процессов такие инструменты становятся не просто удобным дополнением, а необходимым элементом эффективного управления трудовыми ресурсами.

Список цитированных источников

1. Баляев, А. Красный, желтый, бирюзовый: как перекрасить компанию в другой цвет / А. Баляев. – URL: <https://probusiness.io/management/3270-krasnyy-zheltyy-biruzovyy-kak-perekrasit-kompaniyu-v-drugoy-cvet.html> (дата обращения: 21.06.2026).
2. Бизнес-управление и креативные команды: методы, рекомендации и ошибки. – URL: <https://hightech.plus/2022/11/17/biznes-upravlenie-i-kreativnie-komandi-metodi-rekomendacii-i-oshibki> (дата обращения: 03.07.2026).
3. Ближе к делу: что такое спиральная динамика развития компании и какие есть уровни. – URL: <https://kdelu.vtb.ru/articles/chto-takoe-spiralnaya-dinamika-razvitiya-kompanii-i-kakie-est-urovni> (дата обращения: 09.07.2026).
4. Галямов, С. Разноцветный бизнес: как изменить цвет своей компании и увеличить его эффективность / С. Галямов. – URL: <https://aspro.cloud/pm/docs/raznotsvetnyy-biznes> (дата обращения: 09.07.2026).

5. Гарчук, И. М. Конкурентоспособность, конкурентные преимущества организации: понятия, факторы обеспечения конкурентоспособности / И. М. Гарчук // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 3. – С. 160–163. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-135-3-160-163.
6. Гарчук, И. М. Анкета управляемости: новый вспомогательный инструмент для менеджеров и HR-специалистов. Создание эффективной команды / И. М. Гарчук, А. А. Казберович // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2026. – № 1. – С. 244–252.
7. Друкер, П. Ф. Практика менеджмента = The practice of management : пер. с англ. / П. Ф. Друкер. – М. : Вильямс, 2003. – 397 с.
8. Иванова, И. А. Спиральная динамика как модель развития организации / И. А. Иванова, А. С. Бардина // Транспортное дело России. – 2022. – № 2. – С. 88–90.
9. Казберович, А. А. Анализ строительной сферы деятельности согласно концепции спиральной динамики У. Грейвза / А. А. Казберович, Н. В. Носко // Фотинские чтения – 2025 (весеннее собрание) : сборник материалов XII Междунар. науч.-практ. конф., Ижевск, 27–29 марта 2025 г. / УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова ; редкол.: Ю. Г. Кислякова, О. Л. Симченко, У. Ф. Симакова [и др.]. – Ижевск : УИР ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2025. – С. 168–172.
10. Казберович, А. А. Оценка эффективности команды при помощи инструментария концепции «Спектра» / А. А. Казберович, И. М. Гарчук // Управление персоналом: реалии настоящего и возможности будущего : сб. науч. ст. V Междунар. науч.-практ. конф., Донецк, 19 марта 2026 г. – Донецк : ДонГТУ, 2026. – С. 367–373.
11. Казберович, А. А. Роль эффективного менеджмента в достижении успеха организации / А. А. Казберович, А. В. Смаль // Экономика и управление: социальный, экономический и инженерный аспекты : сб. материалов VII Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 28–29 ноября 2024 г. – Брест : БрГТУ, 2024. – С. 128–132.
12. Коттов, А. Разноцветные организации: что это такое / А. Коттов. – URL: <https://deveducation.com/blog/chto-takoe-raznotsvetnye-organizatsii> (дата обращения: 04.07.2026).
13. Лалу, Ф. Открывая организацию будущего : пер. с англ. / Ф. Лалу. – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2019. – 432 с.
14. Орлова, А. В. Менеджмент: основы методологии : практ. рук-во / А. В. Орлова ; М-во образования Республики Беларусь, Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2014. – 48 с.
15. Петрович, М. В. Управление персоналом : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по группам специальностей «Экономика и управление», «Государственное управление», «Бизнес-управление» / М. В. Петрович. – Минск : БГЭУ, 2024. – 429 с.
16. Плешакова, Е. Ю. Причины возникновения патологий менеджмента в современных организациях / Е. Ю. Плешакова, И. Г. Головцова // Теория и практика общественного развития. – 2018. – № 11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prichiny-vozniknoveniya-patologiy-menedzhmenta-v-sovremennyh-organizatsiyah/viewer> (дата обращения: 24.06.2026).
17. Спиральная динамика для жизни и бизнеса. – URL: https://nlp.of.by/corporate/trening-manager/spiral_dynamics (дата обращения: 03.07.2026).
18. Степанов, А. А. Креативный менеджмент : учебник / А. А. Степанов, М. В. Савина, Н. Л. Красюкова [и др.]. – М. : Дашков и К°, 2023.
19. Таунсенд, Р. Сломай систему! Лекарство от управленческой изжоги / Р. Таунсенд. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2008. – 198 с.
20. Цветков, А. Н. Теория менеджмента : учебник для вузов / А. Н. Цветков. – 2-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2023. – 344 с.
21. Blizhe k delu: chto takoe spiral'naya dinamika razvitiya kompanii i kakie est' urovni. – URL: <https://kdelu.vtb.ru/articles/chto-takoe-spiralnaya-dinamika-razvitiya-kompanii-i-kakie-est-urovni> (дата обращения: 09.07.2026).
22. Galyamov, S. Raznotsvetnyy biznes: kak izmenit' cvet svoey kompanii i uvelichit' ego effektivnost' / S. Galyamov. – URL: <https://aspro.cloud/pm/docs/raznotsvetnyy-biznes> (дата обращения: 09.07.2026).
23. Garchuk, I. M. Konkurentosposobnost', konkurentnye preimushchestva organizatsii: ponyatiya, faktory obespecheniya konkurentosposobnosti / I. M. Garchuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 3. – С. 160–163. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-135-3-160-163.
24. Garchuk, I. M. Anketa upravlyaemosti: novyy vspomogatel'nyy instrument dlya menedzherov i HR-specialistov. Sozdanie effektivnoj komandy / I. M. Garchuk, A. A. Kazberovich // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2026. – № 1. – С. 244–252.
25. Druker, P. F. Praktika menedzhmenta = The practice of management : per. s angl. / P. F. Druker. – М. : Vil'yams, 2003. – 397 s.
26. Ivanova, I. A. Spiral'naya dinamika kak model' razvitiya organizatsii / I. A. Ivanova, A. S. Bardina // Transportnoe delo Rossii. – 2022. – № 2. – С. 88–90.
27. Kazberovich, A. A. Analiz stroitel'noy sfery deyatel'nosti soglasno koncepcii spiral'noy dinamiki U. Grejvza / A. A. Kazberovich, N. V. Nosko // Fotinskie chteniya – 2025 (vesennee sobranie) : sbornik materialov XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Izhevsk, 27–29 marta 2025 g. / UIR IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova ; redkol.: YU. G. Kislyakova, O. L. Simchenko, U. F. Simakova [i dr.]. – Izhevsk : UIR IzhGTU im. M. T. Kalashnikova, 2025. – С. 168–172.
28. Kazberovich, A. A. Ocenka effektivnosti komandy pri pomoshchi instrumentariya koncepcii «Spektra» / A. A. Kazberovich, I. M. Garchuk // Upravlenie personalom: realii nastoyashchego i vozmozhnosti budushchego : sb. nauch. st. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Doneck, 19 marta 2026 g. – Doneck : DonGTU, 2026. – С. 367–373.
29. Kazberovich, A. A. Rol' effektivnogo menedzhmenta v dostizhenii uspekha organizatsii / A. A. Kazberovich, A. V. Smal' // Ekonomika i upravlenie: social'nyj, ekonomicheskij i inzhenernyj aspekty : sb. materialov VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 28–29 noyabrya 2024 g. – Brest : BrGTU, 2024. – С. 128–132.
30. Kottov, A. Raznotsvetnye organizatsii: chto eto takoe / A. Kottov. – URL: <https://deveducation.com/blog/chto-takoe-raznotsvetnye-organizatsii> (дата обращения: 04.07.2026).
31. Lala, F. Otkryvaya organizatsii budushchego : per. s angl. / F. Lala. – М. : Mann, Ivanov i Ferber, 2019. – 432 s.
32. Orlova, A. V. Menedzhment: osnovy metodologii : prakt. ruk-vo / A. V. Orlova ; M-vo obrazovaniya Respubliki Belarus', Gom. gos. un-t im. F. Skoriny. – Gomel' : GGU im. F. Skoriny, 2014. – 48 s.
33. Petrovich, M. V. Upravlenie personalom : uchebnoe posobie dlya studentov uchrezhdenij vysshego obrazovaniya po gruppam special'nostej «Ekonomika i upravlenie», «Gosudarstvennoe upravlenie», «Biznes-upravlenie» / M. V. Petrovich. – Minsk : BGEU, 2024. – 429 s.
34. Pleshakova, E. YU. Prichiny vozniknoveniya patologij menedzhmenta v sovremennyh organizatsiyah / E. YU. Pleshakova, I. G. Golovcova // Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya. – 2018. – № 11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prichiny-vozniknoveniya-patologiy-menedzhmenta-v-sovremennyh-organizatsiyah/viewer> (дата обращения: 24.06.2026).
35. Spiral'naya dinamika dlya zhizni i biznesa. – URL: https://nlp.of.by/corporate/trening-manager/spiral_dynamics (дата обращения: 03.07.2026).
36. Stepanov, A. A. Kreativnyj menedzhment : uchebnik / A. A. Stepanov, M. V. Savina, N. L. Krasjukova [i dr.]. – М. : Dashkov i K°, 2023.
37. Taunsend, R. Slomaj sistem! Lekarstvo ot upravlencheskoj izzhogi / R. Taunsend. – М. : Al'pina Biznes Buks, 2008. – 198 s.
38. Cvetkov, A. N. Teoriya menedzhmenta : uchebnik dlya vuzov / A. N. Cvetkov. – 2-e izd., ster. – SPb. : Lan', 2023. – 344 s.

References

1. Balyaev, A. Krasnyj, zheltij, biryuzovyy: kak perekrasit' kompaniyu v drugoj cvet / A. Balyaev. – URL: <https://probusiness.io/management/3270-krasnyj-zheltij-biryuzovyy-kak-perekrasit-kompaniyu-v-drugoy-cvet.html> (дата обращения: 21.06.2026).
2. Biznes-upravlenie i kreativnye komandy: metody, rekomendacii i oshibki. – URL: <https://hightech.plus/2022/11/17/biznes-upravlenie-i-kreativnye-komandi-metodi-rekomendacii-i-oshibki> (дата обращения: 03.07.2026).

Материал поступил 10.07.2026, одобрен 17.07.2026, принят к публикации 10.08.2026

УДК 338.45

ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИЯМИ ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ

Т. В. Дашкевич

Магистр экономических наук, старший преподаватель кафедры менеджмента УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: consuelo82@mail.ru

Реферат

Топливо-энергетический комплекс занимает важнейшее место в структуре национальной экономики и является составляющей, необходимой для функционирования всех секторов народного хозяйства и повышения уровня жизни населения Республики Беларусь. Газовая промышленность, как одна из его составляющих, является для страны одним из ключевых ресурсов, который обеспечивает экономическую безопасность страны, энергетическую базу для промышленного производства, а также поддержание нормальной жизнедеятельности населения. Основными приоритетами развития отрасли являются: цифровизация сетей, реконструкция газораспределительных систем, внедрение газомоторного топлива и обеспечение надежности поставок. Республика Беларусь сохраняет одни из самых высоких показателей газификации в СНГ: газ подведен к 118 райцентрам и тысячам сельских населенных пунктов. Развитие отрасли продолжается и охватывает новые районы. Стратегия до 2030 года также включает развитие рынка сжиженного газа и оптимизацию работы газонаполнительных станций.

В статье рассматриваются особенности функционирования и стратегического управления предприятиями газовой промышленности, эффективная деятельность которых в значительной степени определяет основные показатели социально-экономического развития Брестской области. От степени устойчивости газовых организаций и уровня эффективности выбранных ими стратегий зависят не только темпы экономического роста топливо-энергетического комплекса, но и общие результаты макроэкономического развития страны. Развитие газовой отрасли определяется рядом государственных программ и социально-экономической стратегией, которые обеспечивают достижение установленных показателей при поддержке на государственном уровне. В сложившихся условиях особенно важно уделять внимание стратегическому развитию организаций. Являясь структурным элементом топливо-энергетического комплекса, предприятия газовой промышленности оказывают определяющее влияние на его развитие, поэтому рассмотрение вопросов работы данной отрасли представляется актуальным.

Ключевые слова: топливо-энергетический комплекс, газовая отрасль, функционирование, система сбалансированных показателей, промышленность, стратегическое развитие.

FEATURES OF THE STRATEGIC MANAGEMENT SYSTEM OF GAS INDUSTRY ORGANIZATIONS IN THE BREST REGION

T. V. Dashkevich

Abstract

The fuel and energy sector occupies a vital place in the national economy and is essential for the functioning of all sectors of the national economy and improving the standard of living of the population of the Republic of Belarus. The gas industry, as one of its components, is a key resource for the country, ensuring economic security, providing the energy base for industrial production, and maintaining the normal functioning of the population. The key priorities for the industry's development are: network digitalization, reconstruction of gas distribution systems, the introduction of natural gas as a motor fuel, and ensuring reliable supplies. The Republic of Belarus maintains one of the highest gasification rates in the CIS: gas is supplied to 118 district centers and thousands of rural settlements. The industry's development continues, expanding into new regions. The strategy through 2030 also includes the development of the liquefied natural gas market and the optimization of gas filling stations.

This article examines the functioning and strategic management of gas industry enterprises, whose effective performance significantly determines the key indicators of the socioeconomic development of the Brest Region. The sustainability of gas companies and the effectiveness of their chosen strategies determine not only the rate of economic growth in the fuel and energy sector but also the overall macroeconomic development of the country. The development of the gas industry is determined by a number of state programs and a socioeconomic strategy that ensure the achievement of established indicators with government support. In the current environment, it is especially important to pay attention to the strategic development of these companies. As a structural element of the fuel and energy sector, gas industry enterprises exert a decisive influence on its development, so examining the performance of this sector is relevant.

Keywords: fuel and energy sector, gas industry, performance, balanced scorecard, industry, strategic development.

Введение

Энергетика является одной из ключевых отраслей Республики Беларусь. Развитие данного направления обусловлено рядом государственных программ и социально-экономической стратегией страны, призванных обеспечить достижение установленных показателей.

Газовая промышленность Республики Беларусь – критически важная отрасль, обеспечивающая энергетическую безопасность и функционирование экономики. Страна является лидером в СНГ по газификации. Отрасль обеспечивает природным газом электростанции, промышленность и население, при этом добыча собственного газа незначительна и сопутствует нефтедобыче. Данное направление обеспечивает высокий уровень жизни населения и стабильную работу реального сектора экономики, являясь стратегическим компонентом инфраструктуры страны.

Помимо газа, важной составляющей энергетического баланса является добыча торфа, где Республика Беларусь занимает лидирующие позиции.

Эффективная работа всех отраслей, входящих в топливо-энергетический комплекс Республики Беларусь, имеет важное значение в обеспечении бесперебойного функционирования экономики страны в целом и уровня доходов общества, его материального благосостояния [1, 2].

Газовая промышленность как составляющая топливо-энергетического комплекса Республики Беларусь

Одной из составляющих топливо-энергетического комплекса Республики Беларусь является газовая отрасль, которая в последние годы стала активно развиваться.

Экономика

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-140-2-169-173>

Газовая отрасль включает в себя газотранспортную систему, которая состоит из магистральных трубопроводов, по которым газ следует до хранилищ или транзитом; и газораспределительную систему, которая осуществляет поставку газа конечным потребителям. Газотранспортную систему Республики Беларусь обслуживает ОАО «Газпром трансгаз Беларусь».

ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» осуществляет эксплуатацию белорусского участка газопровода «Ямал – Европа» (протяженность 575 км и пять компрессорных станций), который принадлежит ПАО «Газпром». По территории Республики Беларусь природный газ поставляется в Калининградскую область, Литву, Украину, Польшу [3–5].

Сети газораспределительной системы принадлежат государству. Их обслуживанием занимается ГПО «Белтопгаз». Основными задачами данной организации является стабильное и бесперебойное снабжение потребителей природным и сжиженным газом, торфом и топливными брикетами на основе торфа.

В Республике Беларусь поставку природного газа во все города страны обеспечивает сформированная современная газораспределительная система. В настоящее время страна является самой газифицированной не только на постсоветском пространстве, но и в мире.

Интенсивное развитие распределительной системы газопроводов в Республике Беларусь началось после принятия Государственной программы «Комфортное жилье и благоприятная среда» подпрограммы «Развитие электроэнергетики и газификации села» на 2016–2020 годы.

Реализация этой программы, связанная со строительством подводящих газопроводов к сельским населенным пунктам, позволила улучшить бытовые условия населения, способствовала улучшению демографической ситуации, развитию социальной и производственной сфер.

Газовая отрасль Республики Беларусь имеет свою управленческую структуру, которая учитывает особенности ее функционирования. ГПО «Белтопгаз» входит в состав Министерства энергетики Республики Беларусь.

В состав ГПО «Белтопгаз» входят не только газоснабжающие организации, но и предприятия различных сфер деятельности: строительные, занимающиеся научными исследованиями в данной сфере, относящиеся к горнодобывающей и обрабатывающей промышленности. Такой состав позволяет обеспечивать весь процесс управления газовой отраслью страны (таблица 1).

Таблица 1 – Состав ГПО «Белтопгаз»

Наименование организации	Наименование организации	Наименование организации
ГПО «Белтопгаз»	Газоснабжающие организации	УП «Минскоблгаз»
		УП «Мингаз»
		УП «Брестоблгаз»
		РПУП «Гомельоблгаз»
		УП «Витебскоблгаз»
		РУП «Могилевоблгаз»
		УП «Гроднооблгаз»
	Прочие организации	РУП СГ-ТРАНС
		РУП «Белгазтехника»
		ГИПК «Газ-институт»
		Государственное предприятие НИИ Белгипротопгаз»
		ОАО «НЗГА»
		ОАО «Белтопгазкомплект»
	Строительный комплекс	ОАО «Белгазстрой»
	Организации обрабатывающей промышленности	ОАО «ТБЗ Усяж»
		ОАО «Житковичский ТБЗ»
		ОАО «Торфопредприятие Глинка»
		ОАО «ТБЗ Ляховичский»
		ОАО «ТБЗ Дитва»
		ОАО «Завод торфяного машиностроения «Большевик»
		ОАО «ТБЗ Неман»
		ОАО «Торфопредприятие Днепровское»

Примечание – Источник [5, 7].

За последние несколько лет в развитии отрасли наблюдается значительная положительная динамика.

Добыча природного газа в стране занимает незначительную долю в общем его количестве. Большая часть его импортируется из Российской Федерации. Это свидетельствует о значительной энергетической зависимости Республики Беларусь от внешних поставок. Страна входит в двадцатку наиболее энергезависимых стран мира.

Одним из основных направлений модернизации объектов газораспределительной системы является их телемеханизация. Современные средства телемеханики способствуют обеспечению непрерывного контроля над технологическим оборудованием, которое территориально значительно распределено [5–8].

Дальнейшее развитие газораспределительной системы Республики Беларусь имеет социальную направленность. Это позволит повысить комфортность и качество жизни населения, будет способствовать равномерному размещению и развитию предприятий различных форм собственности и решению проблемы занятости населения, проживающего в малых городах и сельских населенных пунктах.

На современном этапе активная модернизация отрасли направлена на формирование единой системы газоснабжения на основе совершенствования организационной структуры.

Все основные отрасли топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь являются динамически развивающимися и имеют важное значение для экономики страны в целом. При использовании эффективных новейших технологий они способны в достаточном объеме обеспечить потребителей энергоресурсами [9–11].

Методологическое обеспечение стратегического управления предприятиями газовой промышленности Республики Беларусь

Предприятия газовой промышленности должны иметь возможность быстро адаптироваться к изменяющимся условиям рынка и превосходить своих конкурентов по всем направлениям деятельности. Быстрая изменчивость экономической и политической ситуации, усиление рисков на рынке топливно-энергетических ресурсов диктуют необходимость выбора новых ориентиров развития топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь.

Для обеспечения энергетической стабильности и безопасности Республики Беларусь необходимо повышать надежность и эффективность деятельности отраслей Министерства энергетики, в том числе и газовой, так как от их стабильной работы зависит макроэкономическое развитие страны и рост благосостояния населения.

Особое внимание необходимо уделять совершенствованию концептуальных подходов, методов, инструментов, которые используются при принятии стратегических решений в новой нестабильной среде [7, 9].

Система стратегического управления предприятиями газовой промышленности может рассматриваться как адаптированная к особенностям данной отрасли совокупность взаимосвязанных технологий, методов, принципов долгосрочного и краткосрочного планирования, а также управленческих решений, которые динамически развиваются и имеют логическую взаимосвязь.

Особенно важным является наличие взаимосвязи, которая необходима для корректировки процессов на каждом этапе стратегического управления, необходимость которой может возникнуть под влиянием изменений внешней и внутренней среды и обеспечивает формирование эффективной работы не только самих предприятий отрасли, но и в целом экономики как на уровне областей, так и Республики Беларусь. Это обусловлено особенностями топливно-энергетического комплекса страны и, в частности, газовой промышленности [8, 9].

Учитывать особенности газовой отрасли при разработке стратегии обязательно, так как без этого система не сможет эффективно функционировать. Сама система формируется не обособленно, а в рамках энергетической политики Республики Беларусь, которая разрабатывается как на республиканском, так и на областном уровнях.

Органы государственной власти оказывают сильное влияние на газовую промышленность страны, поэтому непрерывное взаимодействие в процессе функционирования осуществляется не только между самими предприятиями, но и с участием областных и республиканских органов управления. Этим обусловлена важность рассмотрения теоретических аспектов управления стратегическим развитием

предприятий газовой отрасли. Государственными органами регулярно разрабатываются долгосрочные программы развития энергетической отрасли и механизмы их реализации.

В настоящее время для достижения успеха в динамичном окружении организации необходимо уметь быстро адаптироваться к изменяющимся условиям рынка и превосходить своих конкурентов по качеству, скорости предоставления услуг, широте ассортимента и цене продукции.

Только оперативное получение информации о деятельности предприятия поможет руководству своевременно принять решение. В то же время оперативные действия организации должны быть скоординированы и направлены на достижение определенных долгосрочных целей, иначе есть риск остаться на месте. Для этого предприятие должно уметь верно идентифицировать свою стратегию и мобилизовать все ресурсы для достижения поставленных стратегических задач.

Стратегия развития газовой отрасли Брестской области зависит и определяется в значительной степени от различных подразделений ГПО «Белтопгаз» и ее областных подразделений, поэтому модель стратегического развития предприятий газовой отрасли области должна быть привязана к деятельности данной организации.

Важнейшим условием эффективного управления любого субъекта хозяйствования является доступ к качественной информации, выраженной в системе соответствующих индикаторов. В связи с этим в основе модели стратегического управления развитием предприятий газовой отрасли должны лежать методические подходы, позволяющие учесть, во-первых, задачи развития предприятий газового комплекса как субъекта рыночной деятельности, а во-вторых, охватить весь комплекс происходящих в рамках их функционирования процессов.

В качестве надежной методологической основы для разработки соответствующей отечественным условиям методики и инструментария стратегического управления газовой отрасли Брестской области может быть использована сбалансированная система показателей (ССП) [12–15].

Сбалансированная система показателей будет выступать способом эффективного выбора направлений стратегического развития газового хозяйства, позволяя увязать стратегию развития отдельных структурных подразделений организации ГПО «Белтопгаз» с набором количественных индикаторов, характеризующих приоритеты развития областной экономики.

Возможности сбалансированной системы показателей для совершенствования управления государственными организациями еще более широки, чем для предприятий частного сектора. Для последних финансовая составляющая четко определяет долгосрочные цели, а для государственных – наоборот, ограничения. Эти организации должны четко соотносить свои затраты с бюджетом.

Показатель успеха государственных организаций – это эффективность, с которой они действуют на своих территориях и в соответствующих группах населения. Цели в этом случае должны иметь реальный ощутимый результат, тогда как финансовые вопросы могут носить вспомогательный или ограничительный характер, но не являются приоритетом.

Для организаций газовой отрасли Брестской области как государственной структуры можно рекомендовать сбалансированную систему показателей, потому что она определяет высокоэффективные показатели, легка и оптимальна в использовании, сбалансирована и сфокусирована, прежде всего, на выявлении недостатков. Система ориентирована на клиента и многофункциональна, что расширяет возможности контроля. Она дает возможность подразделениям самостоятельно принимать решения и совершенствовать свою деятельность, а не ждать указаний сверху.

Сбалансированная система показателей может дать возможность организациям газовой промышленности Брестской области оценивать свою деятельность в соответствии системой критериев, тогда как раньше единственным критерием служил факт перерасхода бюджета.

Организациям газовой отрасли, прежде всего тем, которые должны предоставлять социальные услуги нуждающимся, особенно важно определить свои цели, задачи и показатели оценки деятель-

ности. Их главная задача – оказание конкретных услуг целевым группам населения. Поэтому финансовая составляющая для организаций газовой промышленности Брестской области финансовая составляющая является скорее ограничением, чем целью [16–19].

Формирование сбалансированной системы показателей на предприятиях газовой промышленности Брестской области целесообразно осуществлять в несколько этапов. Для этого был разработан алгоритм.

Исходя из предложенного алгоритма реализации стратегии на основе сбалансированной системы показателей необходимо рассмотреть содержание каждого этапа.

На первом этапе алгоритма происходит обзор и оценка основных факторов внешней и внутренней среды функционирования организации газовой промышленности. Необходимо изучить ситуацию с точки зрения оценки уровня конкурентоспособности организации и факторов, способных оказать влияние на неё.

В рамках аналитических мероприятий по данному направлению проводится анализ и используются следующие инструменты:

- анализ институциональной среды области;
- анализ тенденций развития рынка газа;
- анализ структуры потребления на рынке;
- формирование прогнозов развития этого рынка на средне- и долгосрочный период;
- разработка SWOT-анализа развития предприятия на различные временные интервалы.

Также необходимо рассмотреть общий уровень социально-экономического развития области и вклад организации. В рамках данного направления анализируется региональная эффективность развития предприятий газового комплекса, а также проводится анализ влияния газового комплекса на социально-экономическое развитие области.

На втором этапе происходит обзор стратегий газовой организации для установления стратегических целей. Установление стратегических целей и задач развития предприятий газовой отрасли осуществляется на основе анализа, проводящегося в двух аспектах с учётом специфики ГПО «Белтопгаз» как полноценного субъекта рынка и как субъекта, реализующего социально-экономические функции государства.

В результате проведенных аналитических работ в разрезе двух основных направлений, определяются либо корректируются уже действующие стратегические и тактические задачи развития организации.

На третьем этапе осуществляется формулировка миссии, видения и стратегических целей организации. Определяется причинно-следственная связь между стратегией газовой организации и основными целями, так как формирование перечня системы сбалансированных показателей для оценки реализации стратегии напрямую связано со стратегией управляющей организации и стратегическими целями ее подразделений.

Общая цель разработки сбалансированной системы показателей заключается в определении главного направления деятельности организации на среднесрочный и долгосрочный период; в определении частных направлений её развития, по достижении установленных в рамках системы стратегических задач; усилении бизнес-стратегии развития компании, реформатирования её в систему привязанных к деятельности предприятия стратегических показателей; создание системы мониторинга и получения обратной связи в ходе реализации бизнес задач для получения информации [16, 17].

Главными целями управления бизнесом газовой организации на основе СПС являются следующие.

1. Создание эффективной системы планирования за счет обеспечения взаимосвязи стратегического, среднесрочного и краткосрочного планирования.
2. Формирование системы количественных показателей, определяющих основные параметры деятельности организации.
3. Формирование условий для эффективного функционирования систем бюджетирования, управления затратами, рисками, мотивации персонала и других функциональных подсистем.
4. Мониторинг хода реализации стратегии и фактически достигнутых СПС, определение влияния изменений внешней среды, на реализацию стратегии.

5. Обеспечение адаптации деятельности организаций к изменяющимся внешним и внутренним условиям, обратной связи между процессами стратегического планирования.

Для достижения указанных целей в газовой организации должны быть решены следующие задачи:

1) внедрение и использование модели стратегического планирования, предполагающей прогнозирование ССП в зависимости от изменений внешних условий и принимаемых управленческих решений;

2) ежегодное планирование ССП на основе долгосрочных целей и стратегии;

3) создание алгоритма формирования на основе ССП системы текущих планово-контрольных показателей (ПКП), обязательных для исполнения структурными подразделениями и включающих в числе прочих показатели систем бюджетирования, управления затратами, инвестиционного планирования и т. д.;

4) разработка и внедрение механизма контроля, ответственности и мотивации за достижение ССП.

На четвертом этапе определяются критические показатели достижения целей и задач. Необходимо установить соответствие между стратегическими целями и показателями их достижения и информировать об этом все подразделения организации.

Если показатели соответствуют целям газовой организации, то можно приступать к формированию перечня системы сбалансированных показателей и определение их целевых значений. Разработка стратегических карт.

Если после определения показателей между ними и целями связи не установлено, то необходимо скорректировать цели.

На пятом этапе алгоритма происходит разработка стратегических карт функционирования предприятия газовой отрасли по следующим составляющим.

1. Финансы.

2. Работа с рынками сбыта (потребителями).

3. Организация внутренних бизнес-процессов.

4. Управление персоналом.

5. Отрасль.

Таким образом, стратегические карты позволяют выделить потенциал реализации стратегии по различным аспектам функционирования предприятий газовой отрасли – соответствия человеческих, финансовых, организационно-управленческих, процедурных и прочих ресурсов поставленным стратегическим задачам.

На этом этапе также определяются целевые значения показателей (количественное выражение).

На шестом этапе осуществляется оценка действия показателей на достижение стратегических целей предприятия в инвестиционной, финансовой и операционной деятельности.

С помощью стратегических карт, сформированных на предыдущем этапе, устанавливается причинно-следственная связь между целями деятельности самого предприятия и стратегиями развития, установленными на государственном уровне.

На седьмом этапе по каждому показателю устанавливаются фактические значения, достигнутые за определенный период. Далее эти показатели сравниваются с плановыми значениями.

Если отклонения от плановых значений не существенны либо отсутствуют, то можно дальше реализовывать стратегическую программу развития организации газовой промышленности. Если имеются значительные отклонения, то необходимо провести мониторинг причин их возникновения и устранить их [15, 17, 20].

Мониторинг ССП целесообразно проводить на постоянной основе – ежегодный мониторинг. Это позволит при необходимости вовремя оценить эффективность стратегии предприятия газовой промышленности, а также определить, осталась ли стратегия актуальной.

Алгоритм процесса применения ССП организациями газовой промышленности Брестской области может выступать в качестве инструмента планирования, организации, мотивации и контроля процесса реализации стратегии развития.

Внедрение сбалансированной системы показателей на областном уровне должно быть основано на системном подходе, что предполагает проведение групп мероприятий, предваряющих принятие и практическое использование стратегии и количественными индикаторами в деятельности газовых организаций отрасли.

Заключение

Развитие газовой промышленности для Республики Беларусь имеет стратегическое значение, обеспечивая энергетическую безопасность, высокий уровень газификации и стабильность экономики. Отрасль обеспечивает топливом промышленность, ЖКХ и население, способствует развитию инфраструктуры, а также модернизируется через телемеханизацию для надежности поставок. Высокий уровень газификации, особенно в сельской местности, повышает качество жизни граждан, способствует развитию регионов и решению вопросов занятости.

Значения всех основных показателей характеризуют отрасли топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь как динамически развивающиеся, перспективные и важные для всей экономики страны в целом, способные обеспечить потребителей энергоресурсами в достаточном объеме, при использовании новейших эффективных технологий и техники.

Список цитированных источников

1. Беларусь занимает второе место в Европе по добыче торфа // Энергетическая стратегия. – URL: <http://minenergo.gov.by> (дата обращения: 20.02.2019).
2. Газовой отрасли Беларуси 60 лет. – URL: <http://sens.by> (дата обращения: 05.05.2018).
3. Дашкевич, Т. В. Газовая промышленность Брестской области: состояние и особенности развития / Т. В. Дашкевич // Вестн. Брест. гос. тех. ун-та. Сер. Экон. – 2020. – № 3. – С. 18–20.
4. Дашкевич, Т. В. Инновационное развитие топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь / Т. В. Дашкевич // Экономика и управление: социальный, экономический и инженерный аспекты: сб. науч. ст. I Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 22–23 ноября 2018 г. / БрГТУ; редкол.: В. В. Зазерская [и др.]. – Брест, 2018. – С. 131–134.
5. Министерство энергетики Республики Беларусь: законодательство. – URL: <http://minenergo.gov.by> (дата обращения: 25.05.2021).
6. Статистические данные о результатах деятельности предприятий топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь. – URL: <http://www.belstat.gov.by> (дата обращения: 13.02.2021).
7. Дашкевич, Т. В. Роль отраслей топливно-энергетического комплекса в экономике Республики Беларусь / Т. В. Дашкевич // Новая экономика. Сер. Экономика. – Минск, 2020. – № 1 (75). – С. 232–238.
8. УП «Брестоблгаз»: о предприятии. – URL: <http://brest.gas.by> (дата обращения: 12.03.2020).
9. Дашкевич, Т. В. Топливо-энергетический комплекс Республики Беларусь: структура и особенности функционирования / Т. В. Дашкевич // Инновации: от теории к практике / под науч. ред.: А. М. Омелянюка [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2019. – С. 79–84.
10. Брестский областной исполнительный комитет. – URL: <http://brest-region.gov.by> (дата обращения: 20.02.2019).
11. Дашкевич, Т. В. Особенности развития предприятий топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь / Т. В. Дашкевич // Экономика и управление предпринимательскими структурами : сборник материалов Междунар. науч.-практ. конф., Псков, 18–19 декабря 2018 г. – Псков : Псковский государственный университет, 2019. – С. 22–28.
12. Внедрение сбалансированной системы показателей / Horvath & Partners ; науч. ред. В. Толкач ; пер. с нем. – 2-е изд. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2006. – 478 с.
13. Гершун, А. Технологии сбалансированного управления / А. Гершун, М. Горский. – М. : Олимп-Бизнес, 2005. – 416 с.
14. Горбашко, Е. А. Концепция сбалансированной системы показателей и управление качеством: на пути к интеграции / Е. А. Горбашко. – М. : Стандарт и качество, 2009. – 300 с.
15. Дашкевич, Т. В. Стратегическое управление предприятиями газовой промышленности Республики Беларусь / Т. В. Дашкевич // Современные вызовы устойчивого развития бизнеса: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Житомир, 5–6 ноября 2020 г. / Житомир. гос. тех. ун-т. – Житомир, 2020. – С. 126–128.

16. Каплан, Р. С. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию. / Р. С. Каплан, Д. П. Нортон ; пер. с англ. М. Павловой. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Олимп-Бизнес, 2019. – 320 с.
 17. Каплан, Р. С. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию / Р. С. Каплан, Д. П. Нортон ; пер. с англ. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Олимп-Бизнес, 2005. – 320 с.
 18. Каплан, Р. С. Как заставить работать сбалансированную систему показателей // Измерение результативности компании / Р. С. Каплан, Д. П. Нортон ; пер. с англ. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2006. – 220 с.
 19. Каплан, Р. С. Стратегические карты. Трансформация нематериальных активов в материальные результаты / Р. С. Каплан, Д. П. Нортон ; пер. с англ. – М. : Олимп-Бизнес, 2005. – 512 с.
 20. SWOT-анализ сбалансированной системы показателей. – URL: <http://www.sherpaconsulting.ru/statii/40.htm> (дата обращения: 12.03.2020).
- References**
1. Belarus' zanimaet vtoroe mesto v Evrope po dobyche torfa // Energeticheskaya strategiya. – URL: <http://minenergo.gov.by> (data obrashcheniya: 20.02.2019).
 2. Gazovoj otrasli Belarusi 60 let. – URL: <http://sens.by> (data obrashcheniya: 05.05.2018).
 3. Dashkevich, T. V. Gazovaya promyshlennost' Brestskoy oblasti: sostoyanie i osobennosti razvitiya / T. V. Dashkevich // Vestn. Brest. gos. tekhn. un-ta. Ser. Ekon. – 2020. – № 3. – S. 18–20.
 4. Dashkevich, T. V. Innovacionnoe razvitiye toplivno-energeticheskogo kompleksa Respubliki Belarus' / T. V. Dashkevich // Ekonomika i upravlenie: social'nyy, ekonomicheskij i inzhenernyy aspekty: sb. nauch. st. I Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 22–23 noyabrya 2018 g. / BrGTU ; redkol.: V. V. Zazerskaya [i dr.]. – Brest, 2018. – S. 131–134.
 5. Ministerstvo energetiki Respubliki Belarus': zakonodatel'stvo. – URL: <http://minenergo.gov.by> (data obrashcheniya: 25.05.2021).
 6. Statisticheskie dannye o rezul'tatah deyatelnosti predpriyatij toplivno-energeticheskogo kompleksa Respubliki Belarus'. – URL: <http://www.belstat.gov.by> (data obrashcheniya: 13.02.2021).
 7. Dashkevich, T. V. Rol' otraslej toplivno-energeticheskogo kompleksa v ekonomike Respubliki Belarus' / T. V. Dashkevich // Novaya ekonomika. Ser. Ekonomika. – Minsk, 2020. – № 1 (75). – S. 232–238.
 8. UP «Brestoblgaz»: o predpriyatii. – URL: <http://brest.gas.by> (data obrashcheniya: 12.03.2020).
 9. Dashkevich, T. V. Toplivno-energeticheskij kompleks Respubliki Belarus': struktura i osobennosti funkcionirovaniya / T. V. Dashkevich // Innovacii: ot teorii k praktike / pod nauch. red.: A. M. Omel'yanyuka [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2019. – S. 79–84.
 10. Brestskij oblastnoj ispolnitel'nyj komitet. – URL: <http://brest-region.gov.by> (data obrashcheniya: 20.02.2019).
 11. Dashkevich, T. V. Osobennosti razvitiya predpriyatij toplivno-energeticheskogo kompleksa Respubliki Belarus' / T. V. Dashkevich // Ekonomika i upravlenie predprinimatel'skimi strukturami : sbornik materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Pskov, 18–19 dekabrya 2018 g. – Pskov : Pskovskij gosudarstvennyj universitet, 2019. – S. 22–28.
 12. Vnedrenie sbalansirovannoy sistemy pokazatelej / Horvath & Partners ; nauch. red. V. Tolkach ; per. s nem. – 2-e izd. – M. : Al'pina Biznes Buks, 2006. – 478 s.
 13. Gershun, A. Tekhnologii sbalansirovannogo upravleniya / A. Gershun, M. Gorskiy. – M. : Olimp-Biznes, 2005. – 416 s.
 14. Gorbashko, E. A. Koncepciya sbalansirovannoy sistemy pokazatelej i upravlenie kachestvom: na puti k integracii / E. A. Gorbashko. – M. : Standart i kachestvo, 2009. – 300 s.
 15. Dashkevich, T. V. Strategicheskoe upravlenie predpriyatiyami gazovoj promyshlennosti Respubliki Belarus' / T. V. Dashkevich // Sovremennye vyzovy ustojchivogo razvitiya biznesa: sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Zhitomir, 5–6 noyabrya 2020 g. / Zhitom. gos. tekhn. un-t. – Zhitomir, 2020. – S. 126–128.
 16. Kaplan, R. S. Sbalansirovannaya sistema pokazatelej. Ot strategii k dejstviyu. / R. S. Kaplan, D. P. Norton ; per. s angl. M. Pavlovoj. – 3-e izd., ispr. i dop. – M. : Olimp-Biznes, 2019. – 320 s.
 17. Kaplan, R. S. Sbalansirovannaya sistema pokazatelej. Ot strategii k dejstviyu / R. S. Kaplan, D. P. Norton ; per. s angl. – 2-e izd., ispr. i dop. – M. : Olimp-Biznes, 2005. – 320 s.
 18. Kaplan, R. S. Kak zastavit' rabotat' sbalansirovannuyu sistemu pokazatelej // Izmerenie rezul'tativnosti kompanii / R. S. Kaplan, D. P. Norton ; per. s angl. – M. : Al'pina Biznes Buks, 2006. – 220 s.
 19. Kaplan, R. S. Strategicheskie karty. Transformaciya nematerial'nyh aktivov v material'nye rezul'taty / R. S. Kaplan, D. P. Norton ; per. s angl. – M. : Olimp-Biznes, 2005. – 512 s.
 20. SWOT-analiz sbalansirovannoy sistemy pokazatelej. – URL: <http://www.sherpaconsulting.ru/statii/40.htm> (data obrashcheniya: 12.03.2020).

Материал поступил 30.04.2026, одобрен 06.06.2026, принят к публикации 08.06.2026

ПАРАДИГМА РЕГИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ: КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

В. В. Зазерская

*К. э. н., доцент, декан экономического факультета УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,
e-mail: zazerskaya@mail.ru*

Реферат

В статье представлена парадигма регионального развития, ориентированная на эффективную модель социально-экономического развития трансграничного региона и включающая совокупность инструментов, ведущих к образованию и совершенствованию взаимовыгодных связей, взаимосвязей и взаимодополнений между элементами регионального хозяйства, выстроенных в иерархической структуре. В современных условиях активизация экономической интеграции, уровень институционального развития влияет на экономический рост регионов. Рассмотрены системы институтов для регионов с переходной и развитой экономикой.

Экономическое развитие трансграничных регионов связано с ресурсной обеспеченностью, транзитными потоками и инновациями. Трансграничный регион определен как открытая мезоэкономическая система, в которой ресурсный потенциал и институциональная среда взаимодействуют с внешними интеграционными процессами, формируя устойчивую траекторию социально-экономического развития. Выделены тенденции и организационные структуры, определяющие развитие региональных экономик. К ним отнесены усиление трансграничной регионализации и интеграции, развитие трансграничных потоков и открытости экономики, цифровизация трансграничного взаимодействия, развитие транспортно-логистических систем, усложнение структуры экономических связей, неравномерность и асимметрия развития, усиление роли институциональной среды.

Развитие технологий и цифровизация меняет пространственную организацию территорий. Сокращение времени на доставку грузов уменьшает транспортные расходы. В то же самое время увеличивается потенциал пространства путем вовлечения в хозяйственный кругооборот новых видов деятельности, углубления территориального разделения труда, построения новых цепочек добавленной стоимости, теории пространственного развития для решения социально-экономических задач развития территории. Проведена систематизация подходов формирования трансграничных регионов, на основе которой определены взаимосвязанные факторы: агломерационные процессы, транспортно-логистическая инфраструктура, инновационные потоки, транзитный потенциал и рациональное размещение производительных сил. Разработана система принципов развития трансграничных регионов: принцип интеграционности, открытости, согласованности интересов, системности, пространственной сбалансированности, инфраструктурной обеспеченности, инновационности и цифровизации, институциональной устойчивости, взаимной выгоды, адаптивности. Смена парадигмы развития трансграничных регионов является частью глобального экономического процесса, связанного с усилением интеграции, цифровизации и пространственной трансформации экономики.

Ключевые слова: развитие, устойчивое развитие, трансграничный регион, парадигмы развития трансграничных регионов, принципы, граница, экономические связи.

REGIONAL DEVELOPMENT PARADIGM: CONCEPTUAL CHANGES

V. V. Zazerskaya

Abstract

This article presents a regional development paradigm focused on an effective model for the socioeconomic development of a cross-border region and incorporating a set of tools that foster and improve mutually beneficial connections, interrelations, and complementarities between elements of the regional economy, all structured in a hierarchical manner. In today's context, the intensification of economic integration and the level of institutional development influence regional economic growth. The article examines institutional systems for regions with transitional and developed economies.

The economic development of cross-border regions is linked to resource availability, transit flows, and innovation. A cross-border region is defined as an open mesoeconomic system in which resource potential and the institutional environment interact with external integration processes, shaping a sustainable trajectory of socioeconomic development. The article highlights trends and organizational structures that shape the development of regional economies. These include strengthening cross-border regionalization and integration, developing cross-border flows and economic openness, digitalization of cross-border interactions, development of transport and logistics systems, increasing complexity of the structure of economic ties, uneven and asymmetric development, and the strengthening role of the institutional environment.

Technological advancement and digitalization are changing the spatial organization of territories. Reducing freight delivery times reduces transportation costs. At the same time, the potential of space is increasing through the involvement of new activities in economic circulation, deepening the territorial division of labor, and building new value chains. This approach to spatial development is used to address the socioeconomic challenges of territorial development. A systematization of approaches to the formation of cross-border regions has been conducted, based on which interconnected factors have been identified: agglomeration processes, transport and logistics infrastructure, innovation flows, transit potential, and the rational distribution of productive forces. A system of principles for the development of cross-border regions has been developed: the principles of integration, openness, alignment of interests, systemic approach, spatial balance, infrastructure provision, innovation and digitalization, institutional sustainability, mutual benefit, and adaptability. The paradigm shift in the development of cross-border regions is part of a global economic process associated with increased integration, digitalization, and spatial transformation of the economy.

Keywords: development, sustainable development, cross-border region, cross-border region development paradigms, principles, border, economic ties.

Введение

Планирование развития региона осуществляется с учетом структурно-функциональной взаимосвязи хозяйственных подсистем в контексте систематизации процесса интеграции на основе развития структурных составляющих наиболее весомых функциональных взаимосвязей.

Рассматривая регион как мезоэкономическую систему в условиях трансграничности, важно определить влияние инте-

грационных эффектов на экономический рост. Интеграция социально-экономического потенциала региональных структур предполагает расширение партнерского сегмента отношений хозяйствующих субъектов в рыночной среде на основе конвергенции сетевого, кластерного, интеграционного подходов. Формирование многоканальных отношений хозяйствующих субъектов в экономике требует создания соответствующих институциональных условий.

Целью исследования является выявление основных направлений адаптации парадигмы регионального развития к условиям глобализации. Для эффективного регионального развития, снижения диспропорций разрабатывается региональная политика «в рамках двух отличающихся подходов: в виде политики, ориентированной на людей (обеспечение максимума возможностей мобильности), или политики, опирающейся на возможности мест» [1]. Именно вариант «политики, опирающейся на возможности мест», предложенный в 2009 г. Ф. Барки [2], более полно соответствует потребностям экономического и социального развития парадигмы региональной политики.

Ресурсно-институциональная парадигма развития

Активизация экономической интеграции заключается в построении сильных локальных взаимосвязей, мобилизации эндогенного потенциала региональной экономики и использовании его в качестве основного источника роста [3].

Уровень институционального развития влияет на экономический рост регионов с переходной экономикой сильнее, чем в регионах с развитой экономикой. Для регионов с переходной экономикой сложившаяся система институтов, качество институциональной среды оказывает большее влияние на экономический рост. Такая ситуация связана с процессом трансформации экономической системы. Регионы стремятся создать эффективные условия для ведения бизнеса и развития инновационной экосистемы, развития инфраструктуры, обеспечения прозрачности и предсказуемости экономической политики. В связи с чем здесь наиболее выражены регулятивные и финансовые институты, институты бизнеса. В развитых регионах поддерживают институты развития человеческого капитала и институт науки.

Интеграционные процессы значительно усложняют институциональную архитектуру трансграничных регионов. Ключевые группы институтов, влияющие на рост трансграничных регионов показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Ключевые группы институтов, определяющих развитие региональных систем

Институты	Функции	Влияние на рост
Правовые институты	Регламентация прав и обязанностей, защита прав собственности	Снижение транзакционных издержек
Регулятивные институты	Создание правил ведения бизнеса, антимонопольное регулирование	Увеличение конкуренции и эффективности
Институты человеческого капитала	Образование, здравоохранение, программы подготовки кадров	Рост производительности труда
Финансовые институты	Доступность кредитов, страхование, распределение рисков	Стимулирование инвестиций
Институты науки и инноваций	Исследовательские центры, технопарки, инновационная инфраструктура	Стимулирование научной и инновационной деятельности
Институты структурных трансформаций	Децентрализация, проектное управление, координация межрегиональных программ	Адаптация к изменениям, усиление интеграции

Примечание – Источник: собственная разработка.

Целью развития трансграничных регионов является эффективное использование пространственных факторов. Геополитические аспекты транснациональной регионализации и содержание формирующихся регионов выявляют основы для классификации регионов по геопространственным характеристикам: пространственному масштабу, геопространственной структуре. Экономическое развитие трансграничных регионов связано с ресурсной обеспеченностью, транзитными потоками и инновациями.

Изменения последних лет привели к изменению роли стран и регионов в мировой экономике. Трансформация политической и экономической обстановки, институциональной среды требует новых подходов к анализу экономического развития регионов. Глобализация вызвала интерес к регионализации и трансграничности. Формирование трансграничных регионов относится к области междисциплинарных исследований. Развитие технологий и цифровизация меняет пространственную организацию территорий. Сокращение времени на доставку грузов уменьшает транспортные расходы. В то же самое время увеличивается

потенциал пространства путем вовлечения в хозяйственный кругооборот новых видов деятельности, углубления территориального разделения труда, построения новых цепочек добавленной стоимости [4]. Развитие транспорта и международная торговля способствуют смещению акцента от «пространства мест» к «пространству потоков» [5], когда хозяйственная деятельность, инновации и факторы производства становятся мобильными и перемещаются за пределы государственных границ.

Потоки факторов производства и инноваций способствуют формированию наднациональных политических институтов [6]. Типология трансграничных регионов как инструмент стимулирования развития национальной экономики базируется на использовании транспортной инфраструктуры и пространственной организации факторов производства.

Факторы и закономерности оптимального размещения производительных сил определили ход эволюции теории пространственного развития для решения социально-экономических задач развития территории (таблица 2).

Таблица 2 – Концепции организации пространства

Название концепции	Представители	Сущность концепции
Концепция сетевых структур	А. Вебер, А. Леш, В. Лаундхардт, Й. фон Тюнен, В. Кристаллер, Т. С. Вертинская, Г. А. Яшева, В. С. Фатеев, А. А. Глузов [7]	Институциональный базис моделей развития, интеграционных образований основан на оптимальных пространственных пропорциях факторов производства. Создается модель конкурентоспособной, инвестиционно-привлекательной экономики, где регион выступает в качестве полноправного партнера и участника бизнеса
Агломерационная концепция	А. Вебер [8], А. Маршалл [9], Э. Гувер [10], А. В. Шмидт, В. С. Антонюк, Ю. В. Павлов, Г. А. Хмелева [11]	Способствует выравниванию уровня социально-экономического развития, размещения производительных сил и расселения на территории страны, повышению инфраструктурной обеспеченности
Концепция полюсов роста	Ф. Перру [12], Ж. Будвиль, П. Потье, Х. Р. Ласуэн, Дж. Фридман, Ф. А. Кожиева [13]	Пространственная неоднородность позволяет возникать полюсам роста, создавая цепную реакцию появления новых промышленных предприятий в регионе и стимулируя экономический рост на периферии
Теория кластеров	М. Портер [14]	Все отрасли промышленности региона взаимосвязаны, так как продукция одной отрасли используется для удовлетворения спроса другой. Кооперация между отраслями способствует установлению устойчивых связей для развития региональной экономики
Теория территориально-производственных комплексов и энерго-производственных циклов	Н. Н. Колосовский [69], М. К. Бандман [15]	Производственно-экономическая специализация определяется взаимосвязанными и взаимозависимыми отраслями, размещение которых в пределах данного региона приносит дополнительные экономические выгоды за счет использования общей инфраструктуры, трудовых ресурсов и энергетического потенциала

В последние годы доминирование теорий региональных политик, заложенных Р. Солоу, Г. Мюрдалем, А. О. Хиршманом, У. Ростоу, начинает ослабевать. Смена парадигмы регионального развития в сторону локального экономического развития произошла в середине 1980-х гг. под влиянием глобализации. Новые подходы, базирующиеся на эндогенном росте, новой экономической географии, институционализме подняли проблематику экономического развития и роста, в том числе в различных пространственных измерениях. Пространственная организация трансграничных регионов, как показывают концепции А. Вебера, А. Лёша, В. Кристаллера, Ф. Перру и М. Портера, определяется закономерностями оптимального размещения производительных сил, агломерацией, полюсами роста, кластерными связями и формированием территориально-производственных комплексов.

Глобализация акцентирует внимание на роли пространства, месторасположении, ресурсах как важных источников процветания и конкурентоспособности. Однако во многих национальных практиках сохраняется реактивный характер региональной политики, проявляющийся в программах помощи отстающим территориям [16].

Систематизация взглядов на формирование трансграничных регионов позволила определить перечень взаимосвязанных факторов: агломерационные процессы, транспортно-логистическая инфраструктура, инновационные потоки, транзитный потенциал и рациональное размещение производительных сил (рисунок 1).

1. Агломерационные факторы. Узловое размещение производств и сервисов способствует возникновению экономических цепочек. Агломерации повышают доступность услуг, рабочей силы и рынков сбыта, создают эффект внешних экономий и ускоряют передачу знаний.

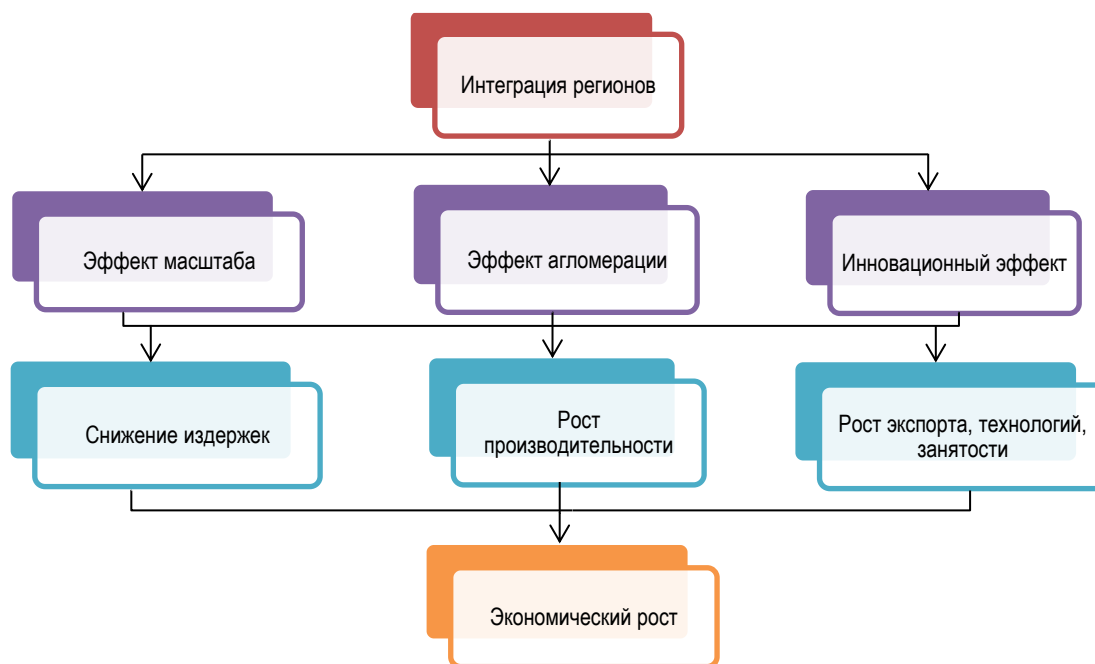


Рисунок 1 – Интеграционные эффекты экономического развития

Примечание – Источник: собственная разработка.

2. Транспортная инфраструктура. Наличие мультимодальных узлов, автодорог, железнодорожных линий и логистических центров определяет привлекательность территории для транзитных и экспортно-ориентированных проектов. Транспортный каркас коридоров № 2 и № 9 на территории Беларуси является основой для формирования коридорных экономик.

3. Инновационные потоки. Диффузия технологий идет через университеты, технопарки, совместные научно-производственные проекты и цепочки добавленной стоимости. Инновационная инфраструктура увеличивает добавленную стоимость локального производства.

4. Транзит. Интенсивность транзитных потоков увеличивает спрос на логистические услуги, стимулирует развитие сервисной экономики и приносит прямые доходы от предоставления услуг перевалки и хранения.

5. Размещение производительных сил. Рациональное размещение предприятий, учитывающее доступ к ресурсам, рабочей силе и рынкам, определяет характер специализации региона и его интеграцию в международные цепочки.

Стратегической целью регионального развития является создание возможностей для достижения высокого уровня и качества жизни населения на основе реализации личностного потенциала, рационального размещения производительных сил.

Структурно-функциональная взаимосвязь на макроуровне трансграничного региона (Республика Беларусь) рассматривается как горизонтальная и вертикальная систематизация процессов интеграции пространственно-распределённых экономических структур

в рамках СНГ и ЕАЭС. Такая взаимосвязь отражает взаимное и накопительное влияние ключевых комплексов, обладающих системными свойствами и выполняющих широкий спектр внешних и внутренних функций.

В данном контексте отдельные предприятия и отрасли включаются не только в национальную экономику, но и в трансграничные производственно-логистические и инновационные цепочки, формирующиеся в рамках интеграционных объединений. Их развитие определяется совокупностью факторов, включая инновационную активность, развитие логистической инфраструктуры, цифровую трансформацию экономики, а также динамику объёмов промышленного производства.

Эффективность взаимодействия и взаимодополнения отраслей на макроуровне требует выявления приоритетных направлений (доминант), которые обеспечивают устойчивость и конкурентоспособность региональной экономической системы [17]. В условиях интеграции СНГ и ЕАЭС такими доминантами выступают отрасли, формирующие основу промышленного роста, поддерживаемые цифровыми решениями, инновациями и развитой трансграничной логистикой.

Для повышения эффективности и предсказуемости развития трансграничного региона макроуровня рассмотрим эволюцию парадигмы развития и определим стратегию в формате сложившихся парадигмальных линий.

Ключевым условием устойчивого развития такого региона является наличие «ядра», так называемой совокупности базовых отраслей и центров экономической активности, адаптированных к особенностям региона и интеграционной среды. Это «ядро» формирует

Экономика

основу для развития производственных, логистических и инновационных связей, обеспечивая функционирование экономики в рамках общего экономического цикла интеграционного пространства.

Структурно-функциональные уровни трансграничного региона отражают, насколько эффективно взаимодействуют его подсистемы как по «горизонтали» (между странами и отраслями), так и по «вертикали» (между уровнями управления и экономики).

Таким образом, развитие региона определяется совокупностью ключевых факторов (детерминант), которые обеспечивают его устойчивость и рост в рамках интеграции. К ним относятся: согласованная

экономическая политика, уровень кооперации между странами, развитие инфраструктуры и способность системы адаптироваться к изменениям, что в итоге формирует основу для воспроизводства и долгосрочного развития трансграничных экономических процессов.

Оценка и анализ социально-экономического развития ТЭКР позволяют сформулировать новую парадигму как совокупность теоретических положений и основополагающих принципов регионального развития (рисунок 2). В современных условиях регионы приобретают субъектность, участвуя в глобальных экономических процессах и конкурируя за ресурсы и инвестиции.

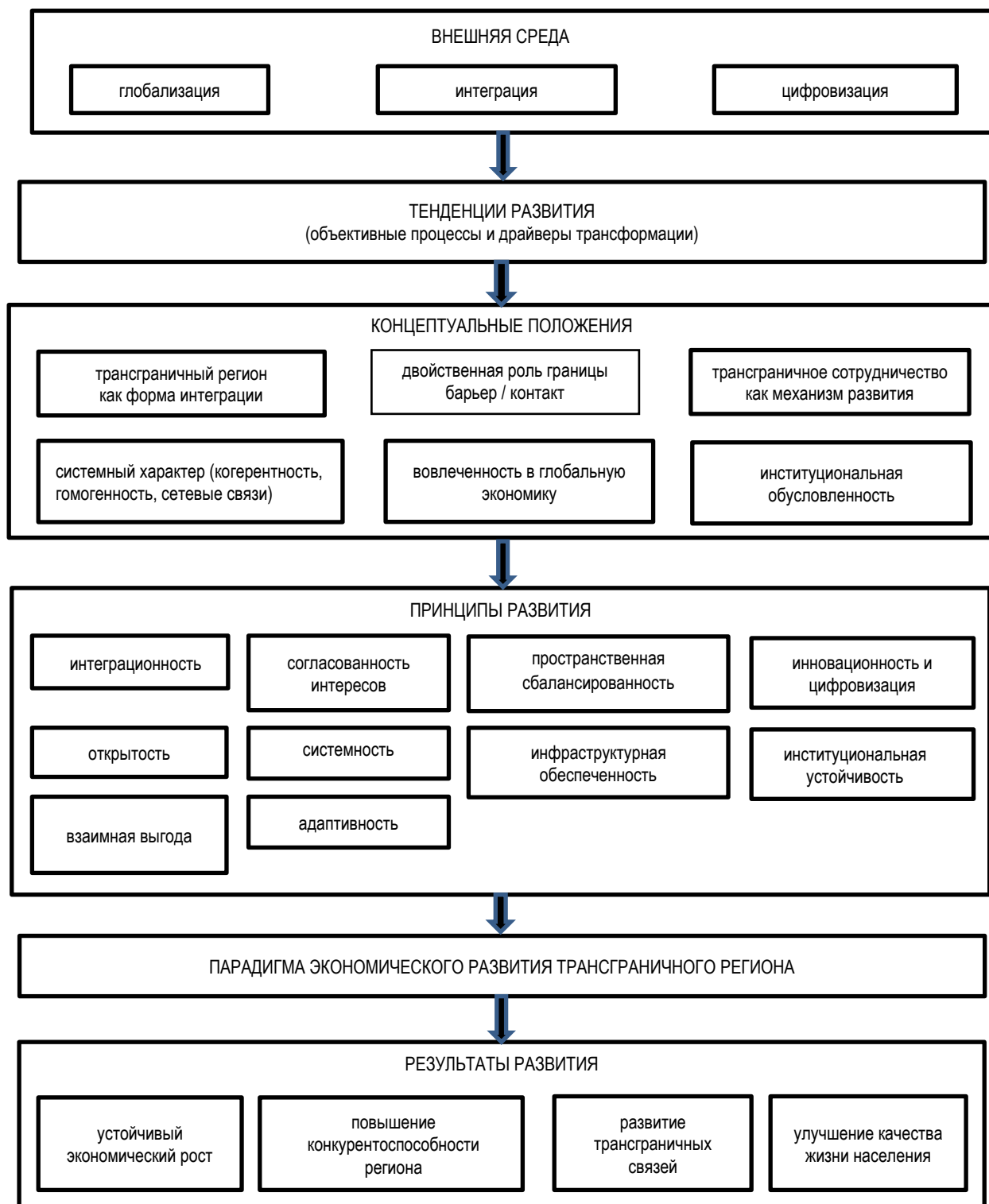


Рисунок 2 – Парадигма экономического развития ТЭКР

В этом аспекте трансграничный регион выступает:

- как когерентный регион, часть мирового экономического пространства, обладающий ресурсами для реализации экономических целей [18];
- часть транснационально-трансграничных систем, когда при расположении между двумя регионами-ядрами или полюсами роста в условиях экономической интеграции базисом социально-экономического развития становится рациональное размещение производительных сил и транзитный потенциал региона;
- субъект народнохозяйственного комплекса страны, аккумулирующий современные технологии регионального управления с целью достижения наилучшей структуры валового регионального продукта [19];
- часть национальной инновационной системы, обеспечивающая реализацию ее целевых показателей и направлений;
- субъект экономической интеграции и международного сотрудничества, участвующий в создании общей цифровой инфраструктуры и цифровых платформ; цифровизации ведущих экономических отраслей экономики и союзных рынков.

Экономическое развитие региона определяется эффективностью использования ресурсов, уровнем развития инфраструктуры, качеством человеческого капитала, степенью интеграции в международные связи.

Смена парадигмы развития трансграничных регионов является частью глобального экономического процесса, связанного с усилением интеграции, цифровизации и пространственной трансформации экономики. Нами выделены тенденции и институциональные структуры, определяющие развитие региональных экономик.

1. Усиление трансграничной регионализации и интеграции. Углубление интеграционных процессов между приграничными территориями расширяет институциональные формы сотрудничества и увеличивает число совместных проектов. Трансграничные регионы переходят от эпизодических взаимодействий к устойчивым системным связям, формируя когерентные экономические пространства. Это способствует более эффективному использованию ресурсов и синергии экономик соседних территорий. Интеграция становится ключевым фактором повышения конкурентоспособности регионов в глобальной экономике.

Данная тенденция проявляется:

- в расширении взаимодействия приграничных территорий и формировании трансграничных систем увеличивает возможности региона в мировом разделении труда;
- росте числа межрегиональных соглашений и программ сотрудничества для расширения экономического и межкультурного пространства;
- формировании устойчивых сетевых структур. Для сохранения конкурентных позиций регионального продукта и конкурентных преимуществ в части снижения издержек развиваются современные формы организации производственной деятельности (еврорегионы, кластеры, логистические сети);
- развитии трансграничных экономических коридоров как новой формы пространственной организации экономики.

2. Развитие трансграничных потоков и открытости экономики. В условиях глобализации наблюдается значительное увеличение трансграничного движения товаров, услуг, капитала, технологий и рабочей силы. Развитие цифровых каналов взаимодействия и снижение институциональных барьеров способствуют расширению внешнеэкономических связей. Так, например, трансграничная электронная торговля демонстрирует устойчивую динамику роста, достигая значительных объемов [20]. Усиление потоков приводит к росту взаимозависимости регионов и формированию единого экономического пространства, а именно:

- к увеличению трансграничного движения товаров, капитала, технологий и рабочей силы;
- расширению трансграничной торговли, включая электронную коммерцию;
- снижению барьеров и упрощению взаимодействия субъектов хозяйствования;
- росту взаимозависимости региональных экономик.

3. Цифровизация трансграничного взаимодействия. Цифровая трансформация выступает одним из ключевых драйверов развития трансграничных регионов, обеспечивая снижение транзакционных издержек и повышение эффективности взаимодействия субъектов. Расширение использования цифровых платформ, искусственного интеллекта и технологий анализа данных способствует развитию электронной торговли и управлению логистическими потоками. Статистические данные свидетельствуют о значительном росте пользователей интернета и цифровой инфраструктуры, что формирует основу для цифровой интеграции регионов [21, 22]. В долгосрочной перспективе цифровизация становится системообразующим фактором экономического роста. Происходит развитие цифровых платформ и электронной торговли, использование технологий (ИИ, IoT, аналитика) для управления потоками, формирование цифровых экосистем взаимодействия регионов, снижение транзакционных издержек и устранение пространственных барьеров.

4. Развитие транспортно-логистических систем. Развитие международных транспортных коридоров и логистических сетей способствует увеличению транзитного потенциала регионов. Транспортная система способна оказывать как стимулирующее, так и сдерживающее влияние на развитие [20]. Эффективная интеграция логистических систем в мировую экономику становится важным условием устойчивого роста. Факторами, влияющими на становление новой парадигмы, являются:

- усиление роли транспорта как ключевого фактора интеграции;
- формирование международных транспортных коридоров;
- развитие транзитного потенциала регионов;
- интеграция логистических систем в мировую экономику.

5. Усложнение структуры экономических связей. Современные трансграничные регионы характеризуются переходом от простых форм взаимодействия к сложным многоуровневым экономическим связям. Формируются интегрированные производственные цепочки, объединяющие предприятия разных стран в рамках единого процесса создания стоимости. Это усиливает межотраслевое взаимодействие и способствует развитию сетевых форм организации экономики. Усложнение связей повышает устойчивость регионов, но одновременно требует более высокого уровня координации и управления:

- переход от простых контактов к сложным многоуровневым взаимодействиям;
- формирование производственных цепочек и кооперационных связей;
- рост значения межотраслевого взаимодействия;
- развитие сетевых форм организации экономики.

6. Неравномерность и асимметрия развития. Одной из ключевых тенденций является усиление дифференциации в уровне социально-экономического развития приграничных территорий. Различия в ресурсном потенциале, инфраструктуре и институциональной среде приводят к формированию асимметричных моделей взаимодействия. В результате одни регионы выступают центрами роста, в то время как другие выполняют периферийные функции. Данная тенденция проявляется в уровне развития приграничных территорий, неравномерном распределении ресурсов и инфраструктуры, формировании центров роста и периферийных зон, усилении конкуренции между регионами.

Это требует разработки механизмов выравнивания и повышения сбалансированности пространственного развития.

7. Усиление роли институциональной среды. Формируются новые механизмы управления, включая соглашения, программы и совместные органы регулирования, а именно, происходит:

- развитие механизмов координации между странами;
- создание совместных институтов управления;
- гармонизация законодательства;
- повышение уровня институционализации трансграничных процессов.

Повышение уровня институционализации способствует снижению неопределенности и укреплению устойчивости экономических связей. В этих условиях институциональные факторы становятся ключевым условием эффективного функционирования трансграничных систем.

Данные закономерности определяют современную динамику экономического развития и требуют учета при формировании региональной политики. В аспекте новой парадигмы определены следующие базовые концептуальные положения трансграничного региона.

1. Трансграничный регион как форма пространственной интеграции.

Представляет собой систему взаимодействующих территорий разных государств, формирующуюся на основе устойчивых экономических, социальных и институциональных связей [20].

2. Двойственная природа границы (барьерная и контактная функции) [22].

Граница одновременно ограничивает и стимулирует развитие. При доминировании контактной функции усиливаются экономические связи, формируются интеграционные структуры и экономические коридоры.

3. Трансграничное сотрудничество как форма экономической интеграции реализуется через договорные отношения, совместные проекты, программы и институциональные структуры (еврорегионы, сети взаимодействия).

4. Системный характер трансграничных регионов.

В зависимости от уровня связей выделяются [20]:

- не взаимодействующие;
- слабо связанные (точечные контакты);
- когерентные (устойчивые связи);
- гомогенные (сходство характеристик).

5. Роль трансграничных регионов в глобализации.

Они выступают посредниками между национальной и мировой экономикой, обеспечивая движение товаров, капитала, технологий и рабочей силы.

6. Институциональная обусловленность развития.

Эффективность трансграничного взаимодействия определяется уровнем институционализации, согласованностью норм и механизмов управления.

Основой новой парадигмы регионального развития является инновационная экономика, базирующаяся на инновационном и цифровом производстве как результате реализации наукоемких технологий. Стратегическое управление развитием региона должно включать приоритетные направления, ориентированные на долгосрочную и краткосрочную перспективы. В качестве основополагающих принципов реализации новой парадигмы развития, связанной с современной ролью трансграничного региона в страновом и мировом экономическом пространстве, определены следующие.

1. Принцип интеграционности – означает развитие трансграничного региона на основе углубления экономических, социальных и институциональных связей между территориями.

2. Принцип открытости – рассматривает регион как открытую систему, включенную в глобальные экономические процессы и международное разделение труда.

3. Принцип согласованности интересов – характеризует возможность эффективного развития при координации стратегий, политик и интересов всех участников трансграничного взаимодействия.

4. Принцип системности – рассматривает трансграничный регион как целостную систему взаимосвязанных элементов (экономика, инфраструктура, население, институты).

5. Принцип пространственной сбалансированности – означает необходимость учета неравномерности развития и проработки мер по выравниванию социально-экономических диспропорций.

6. Принцип инфраструктурной обеспеченности – определяет развитие транспортной, логистической и цифровой инфраструктуры базовым условием интеграции.

7. Принцип инновационности и цифровизации – означает использование современных технологий для повышения конкурентоспособности трансграничных регионов.

8. Принцип институциональной устойчивости – определяет развитие системы институтов, обеспечивающих стабильность и предсказуемость взаимодействия.

9. Принцип взаимной выгоды – предполагает, что трансграничное сотрудничество должно обеспечивать экономические и социальные эффекты для всех участников.

10. Принцип адаптивности – определяет, что регион должен гибко реагировать на изменения внешней среды (глобализация, кризисы, технологические сдвиги).

Выводы

Таким образом, трансграничный регион представляет собой сложную интеграционную систему, развитие которой определяется сочетанием глобальных тенденций, институциональных условий и пространственных факторов. Выделенные концептуальные положения, направления и принципы позволяют сформировать методологическую основу для анализа и управления развитием таких регионов.

Список цитированных источников

1. Песцов, С. К. В поисках новой парадигмы регионального развития: зарубежный опыт и российская действительность / С. К. Песцов // Регионалистика. – 2018. – № 5. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/v-poiskah-novoy-paradigmy-regionalnogo-razvitiya-zarubezhnyy-opyt-i-rossiyskaya-deystvitelnost> (дата обращения: 15.05.2026).
2. Barca, F. An Agenda for a Reformed Cohesion Policy. A place-based approach to meeting European Union challenges and expectations : Independent Report Prepared at the Request of Danuta Hübner, Commissioner for Regional Policy / F. Barca. – [Brussels] : European Commission, 2009. – 29 p.
3. Amin, A. An Institutional Perspective on Regional Economic Development // International Journal of Urban and Regional Research. – 1999. – Vol. 23, № 2. – P. 365–378.
4. Зазерская, В. В. Трансграничная регионализация: типология регионов и пространственное планирование / В. В. Зазерская // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D, Экономические и юридические науки. – 2023. – № 3 (65). – С. 28–34. – DOI: 10.52928/2070-1632-2023-65-3-28-34.
5. Castells, M. The Rise of the Network Society / M. Castells. – London : Blackwell, 1994. – 597 p.
6. Арапов, С. В. Региональное управление и территориальное планирование / С. В. Арапов, А. А. Курочкина, Е. Е. Петрова. – Санкт-Петербург : РГГМУ, 2021. – 460 с.
7. Глумов, А. А. Производственные сетевые структуры в региональной экономике / А. А. Глумов // Региональная экономика: теория и практика. – 2018. – Т. 16, № 6. – С. 1097–1114. – DOI: 10.24891/re.16.6.1097.
8. Вебер, А. Теория размещения промышленности / А. Вебер. – М.-Л., 1926. – 223 с.
9. Marshall, A. Principles of Economics / A. Marshall. – London. 1910. – 795 p.
10. Hoover, E. An Introduction to Regional Economics / E. Hoover. – N. Y., 1971. – P. 26–49.
11. Павлов, Ю. В. Концепция региональной агломерационной политики / Ю. В. Павлов, Г. А. Хмелева // Экономика, предпринимательство и право. – 2023. – Т. 13, № 2. – С. 297–316. – DOI: 10.18334/epp.13.2.117169.
12. Perroux, F. Note on Concept of «Growth Poles» / F. Perroux // Regional Economics: Theory and Practice. New York – London, 1970. – P. 93–103.
13. Кожиева, Ф. А. Региональное развитие в контексте теории полюсов роста / Ф. А. Кожиева // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11-3. – С. 574–578.
14. Портер, М. Международная конкуренция: Конкурент. преимущества стран: пер. с англ. / М. Портер. – М. : Междунар. отношения, 1993. – 895 с.
15. Бандман, М. К. Территориально-производственные комплексы: теория и практика предплановых исследований / М. К. Бандман. – Новосибирск : Наука, 1980. – 256 с.
16. Where Is Regional Policy Going? Changing Concepts of Regional Policy : paper presented for discussion at the Twenty-Second Meeting of Sponsors of the European Research Center to be held at Ross Priory, Los Lomondside on 8 and 9 October 2001. – Glasgow : University of Strathclyde, 2001. – P. 13–15.
17. Смирнов, В. В. Парадигма и концепция эффективного социально-экономического развития региона / В. В. Смирнов // Регионалистика. – 2011. – № 2 (75). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/paradigma-i-kontseptsiya-effektivnogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-regiona> (дата обращения: 19.04.2026).

18. Колосовский, Н. Н. Основы экономического районирования / Н. Н. Колосовский. – М. : Госполитиздат, 1958. – 200 с.
19. Белякова, Е. В. Новая парадигма регионального развития / Е. В. Белякова // Проблемы современной экономики. – 2009. – № 2 (30). – URL: <https://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=2547> (дата обращения: 19.04.2026).
20. Ивуть, Р. Б. Теоретико-методологические основы экономического развития трансграничных регионов / Р. Б. Ивуть, В. В. Зазерская. – Минск : Право и экономика, 2025. – 238 с.
21. Зазерская, В. В. Опыт формирования и развития цифровой экономики в государствах ЕАЭС / В. В. Зазерская // Менеджмент и предпринимательство в парадигме устойчивого развития = Management and Entrepreneurship in the Sustainable Development Paradigm (MESDP–2023) : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 26 мая 2023 г. / Министерство науки и высшего образования Росс. Федерации [и др.] ; отв. за выпуск В. Е. Ковалев ; редкол.: А. Е. Плахин, И. Н. Ткаченко. – Екатеринбург : УрГЭУ, 2023. – С. 63–66.
22. Зазерская, В. В. Развитие цифровой экономики в странах Евразийского экономического союза: формирования институциональной среды / В. В. Зазерская // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Экономика. – 2023. – № 2. – С. 150–154.
23. Зазерская, В. В. Трансграничное сотрудничество в системе экономической безопасности страны / В. В. Зазерская // Современный мир и национальные интересы Республики Беларусь : электронный сборник научных статей / Государственный секретариат Совета Безопасности Респ. Беларусь, Мин-во образования Респ. Беларусь, Брестский гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; редкол.: М. В. Варакулина (отв. ред.) [и др.]. – Брест : БрГУ, 2022. – С. 299–302.
9. Marshall, A. Principles of Economics / A. Marshall. – London. 1910. – 795 p.
10. Hoover, E. An Introduction to Regional Economics / E. Hoover. – N. Y., 1971. – P. 26–49.
11. Pavlov, YU. V. Konceptiya regional'noj aglomeracionnoj politiki / YU. V. Pavlov, G. A. Hmeleva // Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo. – 2023. – T. 13, № 2. – S. 297–316. – DOI: 10.18334/epp.13.2.117169.
12. Perroux, F. Note on Concept of «Growth Poles» / F. Perroux // Regional Economics: Theory and Practice. New York – London, 1970. – R. 93–103.
13. Kozhieva, F. A. Regional'noe razvitie v kontekste teorii polyusov rosta / F. A. Kozhieva // Fundamental'nye issledovaniya. – 2015. – № 11-3. – S. 574–578.
14. Porter, M. Mezhdunarodnaya konkurenciya: Konkurent. preimushchestva stran: per. s angl. / M. Porter. – M. : Mezhdunar. otnosheniya, 1993. – 895 s.
15. Bandman, M. K. Territorial'no-proizvodstvennye komplekсы: teoriya i praktika predplanovykh issledovaniy / M. K. Bandman. – Novosibirsk : Nauka, 1980. – 256 s.
16. Where Is Regional Policy Going? Changing Concepts of Regional Policy : paper presented for discussion at the Twenty-Second Meeting of Sponsors of the European Research Center to be held at Ross Priory, Los Lomondside on 8 and 9 October 2001. – Glasgow : University of Strathclyde, 2001. – P. 13–15.
17. Smirnov, V. V. Paradigma i konceptiya effektivnogo social'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona / V. V. Smirnov // Regionologiya. – 2011. – № 2 (75). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/paradigma-i-kontseptsiya-effektivnogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-regiona> (data obrashcheniya: 19.04.2026).
18. Kolosovskij, N. N. Osnovy ekonomicheskogo rajonirovaniya / N. N. Kolosovskij. – M. : Gospolizdat, 1958. – 200 s.
19. Belyakova, E. V. Novaya paradigma regional'nogo razvitiya / E. V. Belyakova // Problemy sovremennoj ekonomiki. – 2009. – № 2 (30). – URL: <https://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=2547> (data obrashcheniya: 19.04.2026).
20. Ivut', R. B. Teoretiko-metodologicheskie osnovy ekonomicheskogo razvitiya transgranichnykh regionov / R. B. Ivut', V. V. Zazerskaya. – Minsk : Pravo i ekonomika, 2025. – 238 s.
21. Zazerskaya, V. V. Opyt formirovaniya i razvitiya cifrovoj ekonomiki v gosudarstvakh EAES / V. V. Zazerskaya // Menedzhment i predprinimatel'stvo v paradigme ustojchivogo razvitiya = Management and Entrepreneurship in the Sustainable Development Paradigm (MESDP–2023) : materialy VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Ekaterinburg, 26 maya 2023 g. / Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Ross. Federacii [i dr.] ; otv. za vypusk V. E. Kovalev ; redkol.: A. E. Plahin, I. N. Tkachenko. – Ekaterinburg : UrGEU, 2023. – S. 63–66.
22. Zazerskaya, V. V. Razvitie cifrovoj ekonomiki v stranah Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza: formirovaniya institucional'noj sredy / V. V. Zazerskaya // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika. – 2023. – № 2. – S. 150–154.
23. Zazerskaya, V. V. Transgranichnoe sotrudnichestvo v sisteme ekonomicheskoy bezopasnosti strany / V. V. Zazerskaya // Sovremennyy mir i nacional'nye interesy Respubliki Belarus' : elektronnyy sbornik nauchnykh statej / Gosudarstvennyy sekretariat Soveta Bezopasnosti Resp. Belarus', Min-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Brestskij gos. un-t im. A. S. Pushkina ; redkol.: M. V. Varakulina (otv. red.) [i dr.]. – Brest : BrGU, 2022. – S. 299–302.

References

Материал поступил 19.06.2026, одобрен 22.06.2026, принят к публикации 22.06.2026

УДК 330.567.2; 330.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОГНИТИВНЫХ ДОМАШНИХ ХОЗЯЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Е. А. Колопенко

Аспирант, ассистент кафедры экономической информатики, УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь, e-mail: e.kolopenko@bsuir.by

Реферат

Концепция репрезентативного агента все чаще подвергается критике и становится вопрос о моделировании более реалистичных реакций экономических агентов, в частности, такой неоднородной и неструктурированной социальной макрогруппы, как домашние хозяйства, особенно при «провалах» рынка, вызванных действиями частных предпринимателей или внешними для экономических агентов шоками. Актуальность изучения методологических и практических подходов к моделированию гетерогенных и не всегда рациональных домашних хозяйств обусловлена необходимостью их адаптации к институциональным трансформациям и решения связанных с ней задач прогнозирования и оценки последствий управленческих решений, с одной стороны, и стремительным развитием инструментов моделирования и прогнозирования социально-экономических процессов, с другой. В целях определения современных подходов к моделированию когнитивных домашних хозяйств в статье выполнен систематический обзор эмпирических исследований, сосредоточенных на конструировании агентно-ориентированных моделей, представленных в том числе домашними хозяйствами и нацеленных на имитацию их экономического поведения. На основе поиска в журнале «Journal of Artificial Societies and Social Simulation» и базе данных РИНЦ были отобраны 235 научных статей. Выбранные в последующем с учетом критериев включения и исключения 38 публикаций были распределены по категориям моделей в зависимости от (i) источника правил принятия решений, (ii) формы выдачи предпочтений, (iii) факторов протекания когнитивных процессов. Раскрыты отличительные характеристики данных групп моделей, описаны значение и возможное применение факторов психологических механизмов и ограничений по информационным ресурсам в агентно-ориентированных моделях.

Ключевые слова: экономическое поведение домашних хозяйств, агентно-ориентированное моделирование, ограниченная рациональность, систематический обзор.

SIMULATION OF THE ECONOMIC BEHAVIOR OF COGNITIVE HOUSEHOLDS USING THE AGENT-BASED APPROACH: SYSTEMATIC REVIEW

E. A. Kolopenko

Abstract

The concept of representative agent is increasingly being questioned and the issue of modeling more realistic reactions of economic agents, in particular, such heterogeneous and unstructured social macro groups as households is becoming relevant, especially in the context of crises caused by entrepreneurs' actions and external shocks. The relevance of the study of methodological and practical approaches to simulation of heterogeneous and not always rational households is due to the need for their adaptation to institutional changes and solving related problems on assessing the management decisions' consequences on the one hand and the rapid development of tools for modeling and forecasting socio-economic processes on the other. In order to identify modern approaches to the simulation of cognitive households, a systematic review of empirical articles focused on building agent-based models with households imitating their economic behavior was completed. Search in the journal «Journal of Artificial Societies and Social Simulation» and the RSCI database yielded 235 articles. 38 articles selected based on inclusion and exclusion criteria were categorized into categories depending on (i) the source of decision-making rules, (ii) the form of issuing preferences, (iii) the cognitive process factors. The distinctive characteristics of these groups are revealed, and the significance and possible application of the factors of psychological mechanisms and information limits in agent-based models are discussed.

Keywords: economic behavior of households, agent-based modeling, bounded rationality, systematic review.

Введение

Экономическая наука, в русле своего мейнстрима (основного течения) на современном этапе изучающая «человеческое поведение с точки зрения соотношения между целями и ограниченными средствами, которые имеют альтернативное использование» [1, с. 15], определяет домашние хозяйства, по меньшей мере, в четырех аспектах:

а) как макроэкономический субъект, формирующий предложение рабочей силы и спрос на товары и услуги, потребляющий часть получаемого дохода и сберегающий другую (кейнсианцы);

б) как совокупность атомарных экономических агентов, делающих на множестве благ выбор некоторых из них, обеспечивающий максимальное значение функции полезности в условиях наличия полных знаний и существующих бюджетных ограничений (неоклассики);

в) как совокупность коллективных экономических агентов, члены которых в том числе принимают совместные решения о распределении и использовании материальных ресурсов и времени, накоплении нематериального капитала (представители экономики домохозяйства);

г) как совокупность экономических агентов, члены которых действуют ограниченно рационально (представители поведенческой экономики и других гетеродоксальных направлений экономической науки).

Со времени «поворота» к методологическому индивидуализму (1870-е гг.), получившего название «маржиналистская революция», датируется история современной экономической теории. «Экономность» маржиналистской теории, достигаемая взаимосвязью идеального поведения Homo Economicus и рыночного равновесия, универсальностью метода (предельного анализа) и инструментов (дифференциального исчисления и других математических методов), способствовала образованию национальных экономических ассоциаций и мирового научного сообщества экономистов [2, с. 185].

Кроме рациональности, домашние хозяйства или индивидуумы наделялись свойством гомогенности, то есть множество идентичных рациональных субъектов с идентичными вкусами и идентичными исходными накопленными богатствами заменяется репрезентативным домашним хозяйством. В терминах теоремы Гормана это означает, что соответствующие различным потребителям «кривые Энгеля должны быть прямыми линиями, параллельными для всех потребителей при фиксированных ценах» [3, с. 70]. Названная предпосылка позволяет получить функцию совокупного спроса из решения оптимизационной задачи агрегированного домашнего хозяйства и анализировать ситуации, в которых не происходит значительного перераспределения дохода

или отсутствует большое расхождение в предельной склонности к потреблению у различных групп домохозяйств.

Эти упрощения позволяют широко применять математические методы и модели для повышения научной обоснованности постулатов экономической теории и выявления закономерностей функционирования социально-экономических систем. Кроме того, приведенное выше определение экономической науки, сформулированное Л. Роббинсом, позволило перенести логику экономического действия на все большее число сфер человеческой деятельности. С 1950–1960-е гг. математический аппарат стал использоваться для анализа социологических феноменов, таких как дискриминация и преступность, человеческого капитала, а с последней четверти XX в. домашнее хозяйство стали активно включать в экономические исследования в качестве объекта исследования. Так, в теории Г. Беккера домашнее хозяйство максимизирует полезность, извлекаемую не столько из купленных благ, сколько из благ (commodities), производимых домашним хозяйством с использованием рыночных благ, времени и нематериального капитала, причем такого рода блага включают детей, престиж и признание, здоровье, альтруизм, зависть и удовольствие [4, с. 23–24].

Недостатки данного подхода также известны – это избыточная абстрактность. Одним из первых на нереалистичность базовых предпосылок неоклассического направления и, в частности, на отсутствие у людей полного знания об экономике указал Ф. А. фон Хайек, мотивировав объяснение реальных практических ситуаций через действия и взаимодействия отдельных индивидов, обладающих лишь частичным знанием, следующим образом: «Вряд ли в мире существует что-либо, что не повлияло бы на решение, которое он [индивид] должен принять. Но ему не нужно знать обо всех событиях как таковых или всех их эффектах ... Тот факт, что для любого товара определена некоторая цена ..., дает решение, которое (и это возможно на концептуальном уровне) могло быть достигнуто единственным разумом, владеющим всей информацией, которая в действительно распределена среди всех людей, участвующих в процессе» [5, с. 525–526].

Нестабильность рынков, информационная асимметрия, а также необходимость объяснения окружающей действительности приводят к формированию микросооснований в макроэкономике. Агентно-ориентированное моделирование, как современный тип компьютерного имитационного моделирования, позволяет построить систему снизу-вверх. Модели этого класса представлены большим числом гетерогенных автономных агентов, взаимодействующих как друг с другом, так и с окружающей средой.

Одним из наиболее приоритетных направлений дальнейших исследований в рамках агентно-ориентированного моделирования и прогнозирования экономического поведения домашних хозяйств является наполнение моделей реалистичными, когнитивными агентами. Как отмечают В. Л. Макаров и А. Р. Бахтизин, «в отдельных случаях поведение индивидуумов действительно рационально ... Но при других условиях, под воздействием эмоций, в частности страха, переходящего в массовую панику, далекие от оптимальных действия людей могут вызвать обвалы на финансовых рынках, этническое насилие и другие негативные общественные явления» [6, с. 29]. Объяснение перечисленных явлений представляется неполным без учета не только и не столько текущего экономического, сколько когнитивных и социальных состояний индивидов. В рамках настоящей работы предпринимается попытка в первом приближении ответить на вопрос о том, какие способы в настоящее время используются для формализации процессов принятия экономических решений домашними хозяйствами.

Описание методики систематического обзора

Изучение накопленного исследовательского материала базируется на методологии систематического обзора, изложенной в работе [7, с. 136–137], в соответствии с которой отбор документов (оригинальных работ – статей из журналов) осуществлялся в два этапа. На первом этапе из архива номеров ведущего журнала в области искусственных обществ и социальных симуляций «Journal of Artificial Societies and Social Simulation» (JASSS) и базы данных РИНЦ отбираются публикации, содержащие различные грамматические формы терминов, характеризующих исследуемый феномен. Уточнить последний позволил последовательный поиск следующих сочетаний:

1) домашнее хозяйство & экономическое поведение & (потребление | сбережение | работа | бюджет) = household & economic behavior & (consumption | saving | labor | work | budget);

2) агентно-ориентированная/ое/ый модель/ моделирование/ подход = agent-based & (model/ing | simulation | approach).

Для того чтобы очертить границы экономического поведения и отделить его от других, «неэкономических» типов человеческого поведения, используется подход В. В. Радаева в данном отношении, который объединяет формальные признаки экономического действия (ограниченность ресурсов и наличие выбора) с признаком обеспечения жизнедеятельности [8, с. 21]. Всего было отобрано 235 наименований: 153 публикации из журнала JASSS и 82 – из базы данных РИНЦ.

На втором этапе отбор документов проводится с учетом критериев включения и исключения:

а) статья должна быть сфокусирована на разработке агентно-ориентированной модели, представленной, помимо прочих экономических агентов, домашними хозяйствами;

б) язык представления статьи – русский или английский, год публикации – не раньше 2016 г.;

в) представленные статьи должны методологически различаться; если в нескольких статьях позиции в моделировании базируются на общей методологии, то выбирается работа, описывающая поведение домашних хозяйств более детально, или общий использованный источник.

В итоговую выборку вошли 38 документов, 33 и 5 документов из журнала JASSS и базы данных РИНЦ соответственно.

Результаты обзора

Анализ моделей из отобранных документов позволил выделить три классификационных признака: источник критериев (правил) принятия решений, форму выдачи предпочтений, подход к формализации когнитивных процессов. Существующее множество агентно-ориентированных моделей, представленных агентами-домохозяйствами, может быть проиллюстрировано в виде следующей концептуальной схемы (рисунок 1).

Следует отметить, что процедуры принятия решений во всех рассмотренных моделях, исходя из объекта исследования, учитывают главным образом экономические стимулы индивидов. Однако признак обеспечения жизнедеятельности, взятый за один из элементов экономического поведения, непременно приводит к учету контекста (прежде всего социального), в котором делается выбор. В этом случае мы можем полагать, что решения на текущем шаге симуляции через изменение свойств окружающей среды воздействуют на решения, генерируемые агентами в будущем, что согласуется с теорией экономического поведения совокупности людей. Поэтому, если обратное не оговаривается, процедуры принятия решений домашними хозяйствами в явном виде учитывают социальные элементы.

Действия могут ограничиваться, определяться параметрами эксперимента и характеристиками агентов. В первом случае имеются экзогенно заданные критерии принятия решений. Так, при использовании модели, настроенной на имитацию функционирования электроэнергетической системы, пользователь задает ежегодный темп прироста совершенно неэластичного спроса на электроэнергию, на который с учетом случайной компоненты агенты увеличивают потребление на каждом шаге имитации, но может и оценить удовлетворенность потребителей в отсутствие адаптивного поведения и при уменьшении спроса в ответ на ценовые сигналы о будущем дефиците в электроснабжении [9]. В модификации модели «Кейнса и Шумпетера» (K+S) все домашние хозяйства потребляют весь свой доход и желают быть трудоустроенными, что указывает на их однородность в части потребительского и трудового поведения [10]. В модели распространения мер по защите от наводнений в Лондоне все агенты обязаны застраховать дом от наводнения, а процент желающих инвестировать в защитные меры и процент учитывающих риск наводнения при покупке дома являются экспертными оценками [11]. С другой стороны, в течение имитации обновляются значения характеристик агентов. Например, использование механизма формирования семей делает имитацию таких действий, как покупка жилья, максимально приближенной к реальности [12], в противовес экзогенному заданию процента семей, выходящих на рынок, на каждом шаге имитации [13]. Большинство рассмотренных моделей основаны на эндогенно определяемых критериях принятия решений.

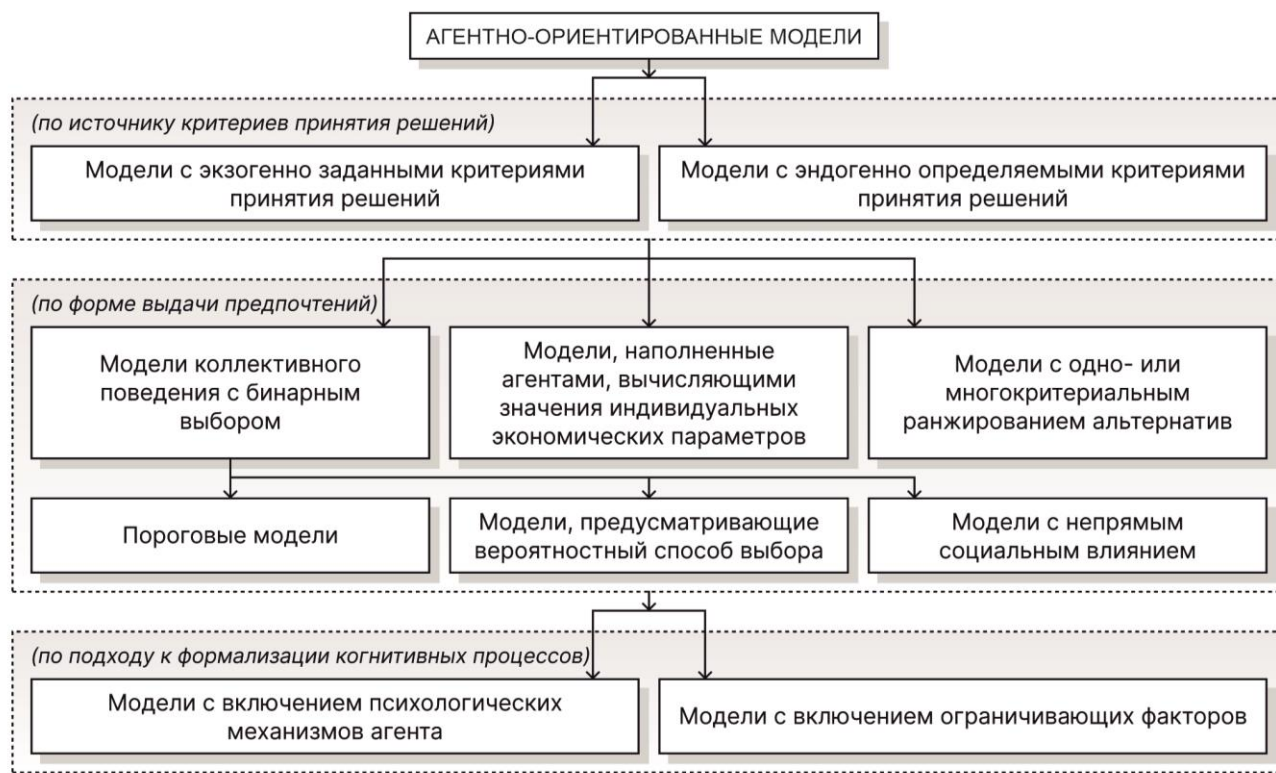


Рисунок 1 – Концептуальный взгляд на агентно-ориентированные модели экономического поведения домашних хозяйств
Примечание – Источник: собственная разработка.

Модели коллективного поведения с бинарным выбором предполагают выбор из двух взаимоисключающих альтернатив: исходного состояния (статус-кво) и нового состояния. Механизмы, которые обеспечивают отклонение от статус-кво, обосновывают индивидуальными «порогами», индивидуальной вероятностью выбора альтернативы и социальным влиянием. В пороговых моделях агент принимает соответствующее решение только после того, как определенное число или доля агентов выберут эту альтернативу [14, с. 1422]. В моделях, предусматривающих вероятностный способ выбора, вероятность выбора агентом нового состояния зависит от числа сделавших его агентов. Наглядным примером различия данных подходов является мультиплексная сеть из двух слоев в модели распространения новой сельскохозяйственной культуры [15], где первый слой определяет отношения родства, второй – отношения соседства. Вероятность высаживания новой культуры зависит от количества агентов-родственников, выращивающих ее, но из-за различий в режимах полива новой и традиционной культур агент вынужден высадить новую культуру, когда доля выращивающих ее агентов-соседей достигнет порога. Концепция социального влияния предоставляет более гибкий инструментальный по сравнению с первыми двумя подходами и выражается, как правило, в том, что воспринимаемая полезность альтернативы тем больше, чем выше статус, меньше удаленность в пространстве и времени и больше число агентов, выбравших ее [16, с. 344].

В моделях, наполненных агентами, вычисляющими значения индивидуальных экономических параметров, таких как доход, потребление, поведенческих функций, действия агентов, как правило, сводятся к решению задачи оптимизации. Здесь необходимо отдельно оговориться о синтезе агентно-ориентированного подхода, с одной стороны, и подхода таблиц «затраты – выпуск» или подхода общего равновесия, с другой. В агентно-ориентированной межрегиональной модели «затраты – выпуск», разработанной авторским коллективом ИЗОПП СО РАН под руководством В. И. Сулосова, домохозяйства выбирают доли потребления, делают заказы по «пакетам» (цена, количество товара), корректируют информацию о ценах, выходят на рынок труда в поисках работы в разрезе секторов действу-

ющей нормативной модели [17, с. 119–120]. Т. С. Новикова и А. А. Цыплаков, значительно расширив социальный блок, добавили в индивидуальную полезность общественные блага (в качестве эндогенной переменной, в качестве экзогенного множителя их уровень используется, например, в работе [18]) и скорректировали ее в соответствии с понижающим коэффициентом социальной незащищенности. В контексте оптимизации территориальной социальной политики на базе индивидуальных полезностей вычисляется функция общественного благосостояния [19, с. 18–19]. Ряд исследователей принимают попытки интеграции вычислимых моделей общего равновесия [20] или динамических стохастических моделей общего равновесия [21] с агентно-ориентированными моделями. По сравнению с данной группой моделей, агенты в моделях с одно- или многокритериальным ранжированием альтернатив являются близорукими и выбирают альтернативу, дающую максимальное значение многокритериальной функции полезности.

Если классифицировать различные направления использования агентно-ориентированных моделей на основании форм выдачи предпочтений, то можно увидеть следующую картину (таблица 1).

Поскольку «никакое влияние внешних факторов ..., в том числе социальных, на поведение индивида не осуществляется без участия личных психологических механизмов последнего» [22, с. 31], чтобы описать, как процесс принятия решений кодируется в агентно-ориентированных моделях, целесообразно выделить факторы психологических механизмов и ограничивающие факторы принятия решений. Их краткие операциональные определения и способы их введения в агентно-ориентированные модели сведены в таблицу 2.

Таким образом, первой движущей силой являются теоретические концепции социальной психологии и поведенческой экономики. Подходы к объяснению человеческого поведения чрезвычайно разнообразны, однако в агентно-ориентированном моделировании широкое распространение получили теория запланированного поведения, теория социальных сетей и теория фреймов. Если на теоретическом уровне отмечается важность этих концепций, то при конструировании моделей ряд исследователей опираются на постулаты соответствующей теории частично.

Таблица 1 – Классификация направлений использования агентно-ориентированных моделей на основании форм выдачи предпочтений

Направления использования		
моделей коллективного поведения с бинарным выбором	моделей, наполненные агентами, вычисляющими значения индивидуальных экономических параметров	моделей с одно- или многокритериальным ранжированием альтернатив
а) диффузия инноваций; б) тепловая модернизация жилых домов; в) использование (в том числе совместное) возобновляемых источников энергии; г) статусное потребление; д) согласование интересов социальных групп; е) миграция	а) выбор потребительской корзины, содержащей набор товаров и услуг; б) выбор портфеля для инвестиций; в) распределение ресурсов или времени	а) потребительское поведение на рынке товаров и услуг, рынке жилья; б) деловые сети; в) выбор состояния занятости

Примечание – Источник: собственная разработка на основе изучения эмпирических исследований.

В теории запланированного поведения И. Айзена (1991) намерение возникает под воздействием трех концептов:

а) установок – личной оценки действия в шкале благоприятное – неблагоприятное;

б) субъективных норм – оценки того, насколько с точки зрения индивида то или иное действие санкционировано обществом;

в) воспринимаемого поведенческого контроля – представления индивида о том, насколько легко или сложно будет совершить намеренное действие [23, с. 188].

При синтезе теории запланированного поведения и агентно-ориентированного моделирования могут учитываться субъективные нормы, но исключаться воспринимаемый поведенческий контроль [24–26], что на концептуальном уровне согласуется с более ранней (1975) теорией обоснованного действия М. Фишбейна и И. Айзена. Х. Мейлдер и Т. Филатова, приняв во внимание все перечисленные концепты теории запланированного поведения, сравнили программные реализации теории в агентно-ориентированных моделях. Их воспринимаемый поведенческий контроль ограничен по материальным ресурсам, из-за чего редуцируется к фактическому поведенческому контролю, и включен в модель двумя способами: в форме фильтра (агенты будут определять полезность установки солнечных панелей и статус-кво, только если их доход превышает пороговое значение – случайное число или экономический критерий) и в форме одного из критериев (вместе с факторами установок и субъективных норм) функции полезности [27]. Переходу от намерения к действию в компьютерных моделях внимания уделено значительно меньше (см., например, [28–29]).

Идея о том, что межличностные сети воздействуют на экономические действия, и наличие эмпирического материала формирует основу для более реалистичного моделирования воздействия референтных групп агентов: членов домашних хозяйств, соседей, коллег, знакомых. В моделях двумерных клеточных автоматах, где пространство представлено решеткой, а агенты – клетками, состояния которых меняются в зависимости от состояния окружения, ближайшими соседями для каждой клетки считаются ближайшие клетки, имеющие общую сторону (окрестность Неймана, 4 соседа) или вершину (окрестность Мура, 8 соседей) с исходной. В некоторых задачах является обоснованным расширение свойства локальности с помощью включения дальних соседей – как правило, четырех клеток, выбранных случайным образом [30, с. 1474]. Для создания социальных сетей могут применяться достаточно простые эмпирические правила, учитывающие расстояние между потенциальными участниками сети [31], в дополнении к расстоянию – схожесть их экономических, культурных и социальных состояний [32], и специальные модели, например, модель эффекта «мир тесен» Дж. Клейнберга [33]. Сила воздействия участников различных сетей может изменяться в ходе имитации (см., например: [34], в части использования статических сетей для членов домашних хозяйств и друзей и динамической – для знакомых) и варьироваться в зависимости от типа межличностных отношений и моделируемого поведения.

Воздействие всей популяции агентов в силу его автоматичности хорошо иллюстрируется на примере статусного потребления, а также согласования интересов. В работе [35] характеристики нового образа жизни – демонстративная и скрытая формы благополучия – выбираются с помощью двумерного нормального распределения с отрицательным коэффициентом корреляции и центрами, соответствующими текущему демонстративному благополучию в среднем по всем агентам и среднему

демонстративному благополучию, умноженному на коэффициент наклона прямой регрессии, проходящей через главную ось эллипса равной вероятности. В модели [36], настроенной на имитацию влияния неравенства в распределении доходов и богатства на финансовую стабильность, автономное потребление равняется квантилю порядка 0,2 распределения доходов: ни одно домохозяйство не желает отставать от других. В работе [37] на примере конфликта интересов фермеров при экспроприации земель показано, что эволюционная теория игр также вписывается в агентно-ориентированный подход.

Теория фреймов целей, активно использующаяся в моделях с бинарным выбором и ранжированием альтернатив, была предложена З. Линденбергом (2001) [38]. В рамках данной теории цель одного из трех типов: гедонистическая («чувствовать себя лучше»), получения выгоды («увеличить имеющиеся ресурсы или прибыль, которую они производят»), нормативная («действовать надлежащим образом») – определяет, какие убеждения, установки, знания являются значимыми для ее достижения, через ментальную рамку или фрейм цели [38, с. 652–654, 656–659]. После эту теорию применили для исследования проэкологического поведения [39]. Сначала, как правило, для каждого агента вероятностным способом выбираются веса ценностей, нормированные к единице. Среди них можно выделить две группы. Во-первых, это эгоцентрические ценности, к которым относятся ценности эгоизма и гедонизма – увеличение индивидуальных ресурсов и чувственное удовлетворение соответственно. Вторую группу образовали самотрансцендентные ценности: проэкологические (защита окружающей среды), альтруистические (обеспечение социального благополучия), нормативные (конформизм). Далее выбирается альтернатива с максимальным значением многокритериальной функции полезности, получаемой из значений критериев (например, сбережений от экономии энергии или периода окупаемости, изменения теплового комфорта, сокращения выбросов CO₂, нагрузки на генерирующие мощности электроэнергетической системы, доли референтных агентов, совершивших намеренное действие и т. д.) с весами соответствующих ценностей [24–25, 27]. В других моделях для каждого агента выбирается фрейм цели, направляющий поведение в терминах дерева решений. Это объясняет, например, почему одни потребители выбирают случайный бытовой прибор, другие – наиболее энергоэффективный, третьи – наиболее дешевый [40]. Подход на основе ценностей также применяется для вычисления индивидуальных экономических параметров, как, например, количества рабочих часов, затрачиваемых на производство общественных благ, частных благ и досуг, в зависимости от базовых ценностей по Ш. Шварцу [41].

Каждый человек располагает историей и памятью, которые влияют на его поведение и которые, хотя и учитываются, например, при формировании воспринимаемого поведенческого контроля, в контексте данной статьи рассматриваются отдельно. К хорошо формализуемым и потому распространенным процедурам с использованием памяти относятся следующие: формирование ожиданий, формирование доверия в деловых сетях и накопление клиентского опыта, извлечение из памяти похожих ситуаций при принятии решений. Первый пункт приводит к рациональным ожиданиям в классических макроэкономических моделях и к эвристикам (адаптивным ожиданиям) – в агентно-ориентированных [42–43]. Второй пункт подразумевает коррекцию действий опытом взаимодействий [44–45]. Актуальным направлением реализации третьего пункта является технология Retrieval-Augmented Generation для создания долговременной памяти [46].

Поведенческие основания, как один из факторов психологического характера, представляют собой концепции (феномены) поведенческой экономики [47, с. 54–57]. Например, когда предельная склонность к потреблению для текущего дохода превышает предельную склонность к потреблению для текущего богатства [36], действует ментальный учет [47, с. 56].

Вторая движущая сила экономических действий в агентно-ориентированных моделях – ограничивающие факторы, под которыми в настоящей работе понимаются ограничения по информационным ресурсам: ограниченная видимость и транзакционные издержки поиска. Ограниченная видимость предполагает, что не все имеющие возможность (в некоторых ситуациях и желающие), например, купить товар или услугу, приобрести жилье или устроиться на работу приобретут некоторое благо, станут обладателями новой жилплощади или трудоустроятся из-за неосведомленности о существующих (в случае множественного выбора –

и доступных) возможностях. На рынках товаров данный фактор рассматривается чаще всего в контексте диффузии инноваций [48]. Рынок недвижимости выделен среди других рынков активов ввиду его неэффективности, поскольку агенты-домохозяйства могут прибегнуть к услугам риэлторов, которые выбирают заданное число произвольных домов, соответствующих максимальной готовности агента-домохозяйства платить [49], в противоположность моделям аукциона [50] или в некоторой степени моделям с переговорами [51]. Поиск необходимой информации продолжится до тех пор, пока предельная полезность дополнительных усилий, затрачиваемых на поиск, не сравняется с предельными издержками (транзакционными) этого усилия [52, с. 1281]. Формализация этого принципа в агентно-ориентированных моделях также предполагает, что ожидания агентов (*reservation utility*) относительно альтернатив (например, предложений о работе) уменьшаются по мере поиска [53] (таблица 2).

Таблица 2 – Возможные способы формализации когнитивных процессов домашних хозяйств в агентно-ориентированных моделях

Фактор принятия решения агентом	Сущность	Значение в агентно-ориентированном моделировании экономического поведения домашних хозяйств
Факторы психологических механизмов		
Воспринимаемый поведенческий контроль	Субъективное восприятие легкости или сложности совершения интересующего действия, формируемое на базе опыта (индивида и социального окружения) совершения аналогичных действий и информационных потоков	Может быть введен в модель в качестве барьера для возникновения намерения, требующего больше вычислительных ресурсов, или как один из критериев многокритериальной функции полезности, то есть как часть намерения
Социальное воздействие	Воспринимаемое или фактическое социальное воздействие в части совершения действия со стороны референтных групп агентов (членов домашнего хозяйства, соседей, коллег и пр.) или всей популяции агентов	Возможно использование для разграничения влияния различных социальных микрогрупп, в которые входит индивид, на соответствующие формы его экономического поведения (например, семьи – на пищевое поведение, соседей – на удовлетворение витальных потребностей, связанных с обеспечением комфортных условий проживания и т. д.)
Фрейм цели	Склонность индивида принимать решения на основе убеждений, установок, знаний, которые являются для него (нее) ситуационно значимыми в смысле достижения цели	Может использоваться для задания «архетипа» агента через придание весов критериям полезности альтернатив
Память	Способность индивида запоминать информацию о своих прошлых состояниях, характеристиках окружающей среды, взаимодействиях с другими агентами, прежде всего описание событий и результаты действий	Необходимо учитывать как то, что запас знаний индивида опосредует изменения в поведении, так и их поступление из различных по степени убедительности потоков (предыдущие ситуации выбора, объективные знания об окружающей среде, рекламные кампании, нарративы)
Поведенческие основания	Факторы отклонения поведения когнитивных агентов в моделях от поведения рационального агента, предписываемого неоклассикой в своих теоретических моделях	Могут быть добавлены к стандартным экономическим концептам, а именно при учете воздействия внешних по отношению к совокупности агентов-домохозяйств факторов, прежде всего, изменения фирмами ценовой политики и стратегии маркетинга
Ограничивающие факторы		
Ограниченная видимость	Неравномерное распространение информации о ситуации выбора среди агентов одного типа	Следует учитывать, что индивиды не осуществляют оптимальный выбор, а выбирают удовлетворительный вариант
Транзакционные издержки поиска	Затраты ресурсов и времени, связанные с поиском информации, которая движется отдельно от объекта	Блокирующий эффект данного фактора следует учитывать по причине и для более правдоподобного учета неоптимального распределения активов, особенно в ситуациях выбора из множества вариантов

Примечание – Источник: собственная разработка на основе изучения эмпирических исследований.

Другой взгляд на флуктуации в поведении агентов приводит к использованию свойств стохастичности в дополнении к представленным в моделях источникам гетерогенности [54–55]. Например, функция полезности потребителя может включать случайную компоненту, выбор альтернативы с максимальной многокритериальной полезностью может не являться достоверным событием (если вероятность выбора альтернативы пропорциональна ее ожидаемой полезности) и др.

Заключение

В результате когнитивного картирования текстов 38 эмпирических исследований разработана классификация 7 групп агентно-ориентированных моделей первого (высшего) уровня, имитирующих экономическое поведение домашних хозяйств, на основе трех классификационных признаков: источника критериев принятия решений, формы выдачи предпочтений, подхода к формализации когнитивных процессов. Факторы принятия решений агентами-домохозяйствами описаны с позиций их разделения на факторы психологических ме-

ханизмов и ограничивающие (информационные) факторы. Изучение проблематики наполнения агентно-ориентированных моделей когнитивными агентами приводит к необходимости формализации поведенческого акта с учетом трех ментальных барьеров: (1) информационной асимметрии, (2) когнитивного состояния агента, (3) бюджетных ограничений агента. Поведенческое намерение зачастую возникает до того, как альтернативы получают «ценник», причем агент должен быть осведомлен о возможности совершения намеченного действия, что ни интуитивно, ни аналитически не вызывает возражений.

Агентно-ориентированное моделирование, позволяющее на микроуровне учитывать многоступенчатость процесса совершения экономических действий и неоднородность агентов в когнитивных терминах, как представляется, является перспективным подходом в рамках изучения социально-экономических явлений и процессов в условиях институциональных трансформаций различной природы, а именно для моделирования их воздействия на массовые экономические решения.

Список цитированных источников

- Robbins, L. An Essay on the Nature and Significance of Economic Science / L. Robbins. – 1st ed., reprinted. – Auburn : Ludwig von Mises Institute, 2007. – 141 p.
- История экономических учений : учеб. пособие / под ред. В. Автономова, О. Ананьина, Н. Макашевой. – М. : ИНФРА-М, 2002. – 784 с.
- Gorman, W. M. Community Preference Fields / W. M. Gorman // *Econometrica*. – 1953. – Vol. 21, No. 1. – P. 63–80.
- Becker, G. S. A Treatise on the Family / G. S. Becker. – Enl. ed. – Cambridge : Harvard University Press, 1991. – 424 p.
- Hayek, F. A. The Use of Knowledge in Society / F. A. Hayek // *The American Economic Review*. – 1945. – Vol. 35, No. 4. – P. 519–530.
- Макаров, В. Л. Современные инструменты моделирования социально-экономических процессов / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин // *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития*. – 2024. – № 1 (76). – С. 21–32. – DOI: 10.52897/2411-4588-2024-1-21-32.
- Раицкая, Л. К. Обзор как перспективный вид научной публикации, его типы и характеристики / Л. К. Раицкая, Е. В. Тихонова // *Научный редактор и издатель*. – 2019. – Т. 4, № 3–4. – С. 131–139. – DOI: 10.24069/2542-0267-2019-3-4-131-139.
- Радаев, В. В. Что такое «экономическое действие»? / В. В. Радаев // *Экономическая социология*. – 2002. – Т. 3, № 5. – С. 18–25.
- An Energy Systems Modelling Tool for the Social Simulation Community / L. A. Bollinger, M. J. van Blijswijk, G. P. J. Dijkema, I. Nikolic // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2016. – Vol. 19, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.2971.
- Finance and Market Concentration Using Agent-Based Modeling: Evidence from South Korea / Y. Seo, Z. Altiner, S. Lee [et al.] // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2025. – Vol. 28, Iss. 3. – DOI: 10.18564/jasss.5710.
- An Agent-Based Model of Flood Risk and Insurance / J. Dubbelboer, I. Nikolic, K. Jenkins, J. Hall // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2017. – Vol. 20, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3135.
- ReMoTe-S. Residential Mobility of Tenants in Switzerland: An Agent-Based Model / A. Pagani, F. Ballestrazzi, E. Massaro, C. R. Binder // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2022. – Vol. 25, Iss. 2. – DOI: 10.18564/jasss.4752.
- Furtado, B. A. A Simple Agent-Based Spatial Model of the Economy: Tools for Policy / B. A. Furtado, I. D. R. Eberhardt // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2016. – Vol. 19, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.3071.
- Granovetter, M. Threshold Models of Collective Behavior / M. Granovetter // *American Journal of Sociology*. – 1978. – Vol. 83, No. 6. – P. 1420–1443.
- Xiong, H. Identifying Mechanisms Underlying Peer Effects on Multiplex Networks / H. Xiong, D. Payne, S. Kinsella // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2018. – Vol. 21, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.3797.
- Latané, B. The Psychology of Social Impact / B. Latané // *American Psychologist*. – 1981. – Vol. 36, No. 4. – P. 343–356. – DOI: 10.1037/0003-066X.36.4.343.
- Агент-ориентированная многорегиональная модель «затраты–выпуск» российской экономики / В. И. Сулов, Д. А. Доможиров, Н. М. Ибрагимов [и др.] // *Экономика и математические методы*. – 2016. – Т. 52, № 1. – С. 112–131.
- Кузьмин, И. С. Применение агент-ориентированного подхода для моделирования эффектов от различных налоговых режимов / И. С. Кузьмин // *Искусственные общества*. – 2025. – Т. 20, № 2. – DOI: 10.18254/S207751800034521-2.
- Новикова, Т. С. Разработка социальной политики на основе сочетания агент-ориентированного и межотраслевого подходов / Т. С. Новикова, А. А. Цыплаков // *Журнал Новой экономической ассоциации*. – 2021. – № 4 (52). – С. 12–36. – DOI: 10.31737/2221-2264-2021-52-4-1.
- Бахтизин, А. Р. Гибридные методы моделирования общего экономического равновесия с использованием агент-ориентированных моделей : автореф. дис. ... д-ра эконом. наук : 08.00.13 / Бахтизин Альберт Рауфович ; Центр. эконом.-мат. ин-т РАН. – М., 2008. – 49 с.
- Серков, Л. А. Объединение агентного подхода и подхода общего равновесия для анализа влияния теневого сектора на российскую экономику / Л. А. Серков, С. С. Красных // *Компьютерные исследования и моделирование*. – 2020. – Т. 12, № 3. – С. 669–684. – DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-3-669-684.
- Тамбовцев, В. Л. Концепт укоренённости в теории и эмпирических исследованиях / В. Л. Тамбовцев // *Вопросы теоретической экономики*. – 2022. – № 4. – С. 25–45. – DOI: 10.52342/2587-7666VTE_2022_4_25_45.
- Ajzen, I. The theory of planned behavior / I. Ajzen // *Organizational Behavior and Human Decision Processes*. – 1991. – Vol. 50, Iss. 2. – P. 179–211. – DOI: 10.1016/0749-5978(91)90020-T.
- An Agent-Based Model of Electricity Consumer: Smart Metering Policy Implications in Europe / J. Vasiljevska, J. Douw, A. Mengolini, I. Nikolic // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2017. – Vol. 20, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3150.
- Krebs, F. An Empirically Grounded Model of Green Electricity Adoption in Germany: Calibration, Validation and Insights into Patterns of Diffusion / F. Krebs // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2017. – Vol. 20, Iss. 2. – DOI: 10.18564/jasss.3429.
- An Agent-Based Model to Simulate Meat Consumption Behaviour of Consumers in Britain / A. Scalco, J. I. Macdiarmid, T. Craig [et al.] // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2019. – Vol. 22, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.4134.
- Muelder, H. One Theory – Many Formalizations: Testing Different Code Implementations of the Theory of Planned Behaviour in Energy Agent-Based Models / H. Muelder, T. Filatova // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2018. – Vol. 21, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.3855.
- Hailegiorgis, A. An Agent-Based Model of Rural Households' Adaptation to Climate Change / A. Hailegiorgis, A. Crooks, C. Cioffi-Revilla // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2018. – Vol. 21, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.3812.
- Egner, L. E. Effect of Policy Implementation on Energy Retrofit Behavior and Energy Consumption in a Simulated Neighborhood / L. E. Egner, C. Klöckner // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2022. – Vol. 25, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.4936.
- Шмидт, Ю. Д. Моделирование межрегиональных миграционных потоков клеточными автоматами / Ю. Д. Шмидт, Н. В. Ивашина, Г. П. Озерова // *Компьютерные исследования и моделирование*. – 2020. – Т. 12, № 6. – С. 1467–1483. – DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-6-1467-1483.
- Understanding the Effects of China's Agro-Environmental Policies on Rural Households' Labor and Land Allocation with a Spatially Explicit Agent-Based Model / Y. Wang, Q. Zhang, S. Sannigrahi [et al.] // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2021. – Vol. 24, Iss. 3. – DOI: 10.18564/jasss.4589.
- Friege, J. Exploring Homeowners' Insulation Activity / J. Friege, G. Holtz, É. J. L. Chappin // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2016. – Vol. 19, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.2941.
- Moglia, M. An Agent-Based Model of Residential Energy Efficiency Adoption / M. Moglia, A. Podkalicka, J. McGregor // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2018. – Vol. 21, Iss. 3. – DOI: 10.18564/jasss.3729.
- Identifying Personal and Social Drivers of Dietary Patterns: An Agent-Based Model of Dutch Consumer Behavior / N. Davis, B. Dermody, M. Koetse, G. van Voorn // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2024. – Vol. 27, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.5020.
- Thron, C. Lifestyle Tradeoffs and the Decline of Societal Well-Being: An Agent-Based Model / C. Thron // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2016. – Vol. 19, Iss. 2. – DOI: 10.18564/jasss.3024.
- Fischer, T. Can Redistribution by Means of a Progressive Labor Income-Taxation Transfer System Increase Financial Stability? / T. Fischer // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2017. – Vol. 20, Iss. 2. – DOI: 10.18564/jasss.3405.
- Conflicts Induced by Different Responses to Land Expropriation Among the Farmers Involved During Urbanization in China / H. Bao, X. Wu, H. Wang [et al.] // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2019. – Vol. 22, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3931.

38. Lindenberg, S. Social Rationality versus Rational Egoism / S. Lindenberg // *Handbook of Sociological Theory* / ed. J. H. Turner. – New York, 2001. – Ch. 29. – P. 635–668. – DOI: 10.1007/0-387-36274-6_29.
39. Lindenberg, S. Normative, Gain and Hedonic Goal Frames Guiding Environmental Behavior / S. Lindenberg, L. Steg // *Journal of Social Issues*. – 2007. – Vol. 63, Iss. 1. – P. 117–137. – DOI: 10.1111/j.1540-4560.2007.00499.x.
40. Gotts, N. M. Experiments with a Model of Domestic Energy Demand / N. M. Gotts, J. G. Polhill // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2017. – Vol. 20, Iss. 3. – DOI: 10.18564/jasss.3467.
41. Schwartz Human Values and the Economic Performance / M. Czupryna, K. Growiec, B. Kamiński, P. Oleksy // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2024. – Vol. 27, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.5023.
42. D'Orazio, P. From Micro Behaviors to Macro Dynamics: An Agent-Based Economic Model with Consumer Credit / P. D'Orazio, G. Giulioni // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2017. – Vol. 20, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3260.
43. An Agent-Based Approach to Integrated Assessment Modelling of Climate Change / M. Czupryna, C. Franzke, S. Hokamp, J. Scheffran // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2020. – Vol. 23, Iss. 3. – DOI: 10.18564/jasss.4325.
44. Contract Farming in the Mekong Delta's Rice Supply Chain: Insights from an Agent-Based Modeling Study / H. K. Nguyen, R. Chiong, M. Chica [et al.] // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2019. – Vol. 22, Iss. 3. – DOI: 10.18564/jasss.4008.
45. Kowalski, L. Comparing Spatial-Interaction and Hybrid Agent-Based Modelling Approaches: An Application to Location Analysis of Services / L. Kowalski // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2019. – Vol. 22, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3899.
46. Zhang, S. GPLab: A Generative Agent-Based Framework for Policy Simulation and Evaluation / S. Zhang, Z. Peng, Y. Ren // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2026. – Vol. 29, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.5933.
47. Дершень, В. Концепции поведенческой экономики в маркетинге / В. Дершень, В. Пархименко // *Наука и инновации*. – 2022. – № 3. – С. 53–59. – DOI: 10.29235/1818-9857-2022-3-53-59.
48. Pasimeni, F. Community-Based Adoption and Diffusion of Micro-Grids: Analysis of the Italian Case with Agent-Based Model / F. Pasimeni // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2019. – Vol. 22, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3950.
49. Yun, T.-S. Housing Market Agent-Based Simulation with Loan-To-Value and Debt-To-Income / T.-S. Yun, I.-C. Moon // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2020. – Vol. 23, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.4410.
50. An Agent Based Model of a Thinly Traded Land Market in an Urbanizing Region / Y. Chen, E. Irwin, C. Jayaprakash, K. J. Park // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2021. – Vol. 24, Iss. 2. – DOI: 10.18564/jasss.4518.
51. Furtado, B. A. PolicySpace2: Modeling Markets and Endogenous Public Policies / B. A. Furtado // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2022. – Vol. 25, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.4742.
52. Wheaton, W. C. Vacancy, Search, and Prices in a Housing Market Matching Model / W. C. Wheaton // *Journal of Political Economy*. – 1990. – Vol. 98, No. 6. – P. 1270–1292.
53. Kant, J.-D. WorkSim: An Agent-Based Model of Labor Markets / J.-D. Kant, G. Ballot, O. Goudet // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2020. – Vol. 23, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.4396.
54. Calisti, R. Promoting Sustainable Food Consumption: An Agent-Based Model About Outcomes of Small Shop Openings / R. Calisti, P. Proietti, A. Marchini // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2019. – Vol. 22, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3901.
55. Fonteijn, H. M. J. DARTS: Evolving Resilience of the Global Food System to Production and Trade Shocks / H. M. J. Fonteijn, P. A. J. van Oort, G. M. Hengeveld // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2024. – Vol. 27, Iss. 2. – DOI: 10.18564/jasss.5307.
56. Istorija ekonomicheskikh uchenij : ucheb. posobie / pod red. V. Avtonomova, O. Anan'ina, N. Makashevoj. – M. : INFRA-M, 2002. – 784 s.
57. Gorman, W. M. Community Preference Fields / W. M. Gorman // *Econometrica*. – 1953. – Vol. 21, No. 1. – P. 63–80.
58. Becker, G. S. A Treatise on the Family / G. S. Becker. – Enl. ed. – Cambridge : Harvard University Press, 1991. – 424 p.
59. Hayek, F. A. The Use of Knowledge in Society / F. A. Hayek // *The American Economic Review*. – 1945. – Vol. 35, No. 4. – P. 519–530.
60. Makarov, V. L. Sovremennye instrumenty modelirovaniya social'no-ekonomicheskikh processov / V. L. Makarov, A. R. Bahtizin // *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya*. – 2024. – № 1 (76). – S. 21–32. – DOI: 10.52897/2411-4588-2024-1-21-32.
61. Raickaya, L. K. Obzor kak perspektivnyj vid nauchnoj publikacii, ego tipy i harakteristiki / L. K. Raickaya, E. V. Tihonova // *Nauchnyj redaktor i izdatel'*. – 2019. – T. 4, № 3–4. – S. 131–139. – DOI: 10.24069/2542-0267-2019-3-4-131-139.
62. Radaev, V. V. CHto takoe «ekonomicheskoe dejstvie»? / V. V. Radaev // *Ekonomicheskaya sociologiya*. – 2002. – T. 3, № 5. – S. 18–25.
63. An Energy Systems Modelling Tool for the Social Simulation Community / L. A. Bollinger, M. J. van Blijswijk, G. P. J. Dijkema, I. Nikolic // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2016. – Vol. 19, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.2971.
64. Finance and Market Concentration Using Agent-Based Modeling: Evidence from South Korea / Y. Seo, Z. Altiner, S. Lee [et al.] // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2025. – Vol. 28, Iss. 3. – DOI: 10.18564/jasss.5710.
65. An Agent-Based Model of Flood Risk and Insurance / J. Dubbelboer, I. Nikolic, K. Jenkins, J. Hall // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2017. – Vol. 20, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3135.
66. ReMoTe-S. Residential Mobility of Tenants in Switzerland: An Agent-Based Model / A. Pagani, F. Ballestrazzi, E. Massaro, C. R. Binder // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2022. – Vol. 25, Iss. 2. – DOI: 10.18564/jasss.4752.
67. Furtado, B. A. A Simple Agent-Based Spatial Model of the Economy: Tools for Policy / B. A. Furtado, I. D. R. Eberhardt // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2016. – Vol. 19, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.3071.
68. Granovetter, M. Threshold Models of Collective Behavior / M. Granovetter // *American Journal of Sociology*. – 1978. – Vol. 83, No. 6. – P. 1420–1443.
69. Xiong, H. Identifying Mechanisms Underlying Peer Effects on Multiplex Networks / H. Xiong, D. Payne, S. Kinsella // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2018. – Vol. 21, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.3797.
70. Latané, B. The Psychology of Social Impact / B. Latané // *American Psychologist*. – 1981. – Vol. 36, No. 4. – P. 343–356. – DOI: 10.1037/0003-066X.36.4.343.
71. Agent-orientirovannaya mnogoregional'naya model' «zatraty-vypusk» Rossijskoj ekonomiki / V. I. Suslov, D. A. Domozhirov, N. M. Ibragimov [i dr.] // *Ekonomika i matematicheskie metody*. – 2016. – T. 52, № 1. – S. 112–131.
72. Kuz'min, I. S. Primenenie agent-orientirovannogo podhoda dlya modelirovaniya effektivov ot razlichnyh nalogovyh rezhimov / I. S. Kuz'min // *Iskusstvennye obshchestva*. – 2025. – T. 20, № 2. – DOI: 10.18254/S207751800034521-2.
73. Novikova, T. S. Razrabotka social'noj politiki na osnove sochetaniya agent-orientirovannogo i mezhotraslevogo podhodov / T. S. Novikova, A. A. Cyplakov // *Zhurnal Novoj ekonomicheskoy associacii*. – 2021. – № 4 (52). – S. 12–36. – DOI: 10.31737/2221-2264-2021-52-4-1.
74. Bahtizin, A. R. Gibridnye metody modelirovaniya obshchego ekonomicheskogo ravnovesiya s ispol'zovaniem agent-orientirovannykh modelej : avtoref. dis. ... d-ra ekonom. nauk : 08.00.13 / Bahtizin Al'bert Raufovich ; Centr. ekonom.-mat. int. RAN. – M., 2008. – 49 s.
75. Serkov, L. A. Ob'edinenie agentnogo podhoda i podhoda obshchego ravnovesiya dlya analiza vliyaniya tenevogo sektora na Rossijskuyu ekonomiku / L. A. Serkov, S. S. Krasnyh // *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. – 2020. – T. 12, № 3. – S. 669–684. – DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-3-669-684.

References

1. Robbins, L. An Essay on the Nature and Significance of Economic Science / L. Robbins. – 1st ed., reprinted. – Auburn : Ludwig von Mises Institute, 2007. – 141 p.

22. Tambovcev, V. L. Koncept ukorenyonnosti v teorii i empiricheskikh issledovaniyah / V. L. Tambovcev // Voprosy teoreticheskoy ekonomiki. – 2022. – № 4. – S. 25–45. – DOI: 10.52342/2587-7666VTE_2022_4_25_45.
23. Ajzen, I. The theory of planned behavior / I. Ajzen // Organizational Behavior and Human Decision Processes. – 1991. – Vol. 50, Iss. 2. – P. 179–211. – DOI: 10.1016/0749-5978(91)90020-T.
24. An Agent-Based Model of Electricity Consumer: Smart Metering Policy Implications in Europe / J. Vasiljevska, J. Douw, A. Mengolini, I. Nikolic // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2017. – Vol. 20, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3150.
25. Krebs, F. An Empirically Grounded Model of Green Electricity Adoption in Germany: Calibration, Validation and Insights into Patterns of Diffusion / F. Krebs // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2017. – Vol. 20, Iss. 2. – DOI: 10.18564/jasss.3429.
26. An Agent-Based Model to Simulate Meat Consumption Behaviour of Consumers in Britain / A. Scalco, J. I. Macdiarmid, T. Craig [et al.] // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2019. – Vol. 22, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.4134.
27. Muelder, H. One Theory – Many Formalizations: Testing Different Code Implementations of the Theory of Planned Behaviour in Energy Agent-Based Models / H. Muelder, T. Filatova // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2018. – Vol. 21, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.3855.
28. Hailegiorgis, A. An Agent-Based Model of Rural Households' Adaptation to Climate Change / A. Hailegiorgis, A. Crooks, C. Cioffi-Revilla // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2018. – Vol. 21, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.3812.
29. Egner, L. E. Effect of Policy Implementation on Energy Retrofit Behavior and Energy Consumption in a Simulated Neighborhood / L. E. Egner, C. Klöckner // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2022. – Vol. 25, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.4936.
30. SHmidt, YU. D. Modelirovanie mezhhregional'nykh migracionnykh potokov kletochnymi avtomatami / YU. D. SHmidt, N. V. Ivashina, G. P. Ozerova // Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie. – 2020. – T. 12, № 6. – S. 1467–1483. – DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-6-1467-1483.
31. Understanding the Effects of China's Agro-Environmental Policies on Rural Households' Labor and Land Allocation with a Spatially Explicit Agent-Based Model / Y. Wang, Q. Zhang, S. Sannigrahi [et al.] // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2021. – Vol. 24, Iss. 3. – DOI: 10.18564/jasss.4589.
32. Friege, J. Exploring Homeowners' Insulation Activity / J. Friege, G. Holtz, É. J. L. Chappin // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2016. – Vol. 19, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.2941.
33. Moglia, M. An Agent-Based Model of Residential Energy Efficiency Adoption / M. Moglia, A. Podkalicka, J. McGregor // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2018. – Vol. 21, Iss. 3. – DOI: 10.18564/jasss.3729.
34. Identifying Personal and Social Drivers of Dietary Patterns: An Agent-Based Model of Dutch Consumer Behavior / N. Davis, B. Dermody, M. Koetse, G. van Voorn // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2024. – Vol. 27, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.5020.
35. Thron, C. Lifestyle Tradeoffs and the Decline of Societal Well-Being: An Agent-Based Model / C. Thron // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2016. – Vol. 19, Iss. 2. – DOI: 10.18564/jasss.3024.
36. Fischer, T. Can Redistribution by Means of a Progressive Labor Income-Taxation Transfer System Increase Financial Stability? / T. Fischer // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2017. – Vol. 20, Iss. 2. – DOI: 10.18564/jasss.3405.
37. Conflicts Induced by Different Responses to Land Expropriation Among the Farmers Involved During Urbanization in China / H. Bao, X. Wu, H. Wang [et al.] // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2019. – Vol. 22, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3931.
38. Lindenberg, S. Social Rationality versus Rational Egoism / S. Lindenberg // Handbook of Sociological Theory / ed. J. H. Turner. – New York, 2001. – Ch. 29. – P. 635–668. – DOI: 10.1007/0-387-36274-6_29.
39. Lindenberg, S. Normative, Gain and Hedonic Goal Frames Guiding Environmental Behavior / S. Lindenberg, L. Steg // Journal of Social Issues. – 2007. – Vol. 63, Iss. 1. – P. 117–137. – DOI: 10.1111/j.1540-4560.2007.00499.x.
40. Gotts, N. M. Experiments with a Model of Domestic Energy Demand / N. M. Gotts, J. G. Polhill // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2017. – Vol. 20, Iss. 3. – DOI: 10.18564/jasss.3467.
41. Schwartz Human Values and the Economic Performance / M. Czupryna, K. Growiec, B. Kamiński, P. Oleksy // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2024. – Vol. 27, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.5023.
42. D'Orazio, P. From Micro Behaviors to Macro Dynamics: An Agent-Based Economic Model with Consumer Credit / P. D'Orazio, G. Giulioni // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2017. – Vol. 20, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3260.
43. An Agent-Based Approach to Integrated Assessment Modelling of Climate Change / M. Czupryna, C. Franzke, S. Hokamp, J. Scheffran // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2020. – Vol. 23, Iss. 3. – DOI: 10.18564/jasss.4325.
44. Contract Farming in the Mekong Delta's Rice Supply Chain: Insights from an Agent-Based Modeling Study / H. K. Nguyen, R. Chiong, M. Chica [et al.] // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2019. – Vol. 22, Iss. 3. – DOI: 10.18564/jasss.4008.
45. Kowalski, L. Comparing Spatial-Interaction and Hybrid Agent-Based Modelling Approaches: An Application to Location Analysis of Services / L. Kowalski // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2019. – Vol. 22, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3899.
46. Zhang, S. GPLab: A Generative Agent-Based Framework for Policy Simulation and Evaluation / S. Zhang, Z. Peng, Y. Ren // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2026. – Vol. 29, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.5933.
47. Dershen', V. Konceptii povedencheskoj ekonomiki v marketinge / V. Dershen', V. Parhimenko // Nauka i innovacii. – 2022. – № 3. – S. 53–59. – DOI: 10.29235/1818-9857-2022-3-53-59.
48. Pasimeni, F. Community-Based Adoption and Diffusion of Micro-Grids: Analysis of the Italian Case with Agent-Based Model / F. Pasimeni // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2019. – Vol. 22, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3950.
49. Yun, T.-S. Housing Market Agent-Based Simulation with Loan-To-Value and Debt-To-Income / T.-S. Yun, I.-C. Moon // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2020. – Vol. 23, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.4410.
50. An Agent Based Model of a Thinly Traded Land Market in an Urbanizing Region / Y. Chen, E. Irwin, C. Jayaprakash, K. J. Park // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2021. – Vol. 24, Iss. 2. – DOI: 10.18564/jasss.4518.
51. Furtado, B. A. PolicySpace2: Modeling Markets and Endogenous Public Policies / B. A. Furtado // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2022. – Vol. 25, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.4742.
52. Wheaton, W. C. Vacancy, Search, and Prices in a Housing Market Matching Model / W. C. Wheaton // Journal of Political Economy. – 1990. – Vol. 98, No. 6. – P. 1270–1292.
53. Kant, J.-D. WorkSim: An Agent-Based Model of Labor Markets / J.-D. Kant, G. Ballot, O. Goudet // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2020. – Vol. 23, Iss. 4. – DOI: 10.18564/jasss.4396.
54. Calisti, R. Promoting Sustainable Food Consumption: An Agent-Based Model About Outcomes of Small Shop Openings / R. Calisti, P. Proietti, A. Marchini // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2019. – Vol. 22, Iss. 1. – DOI: 10.18564/jasss.3901.
55. Fonteijn, H. M. J. DARTS: Evolving Resilience of the Global Food System to Production and Trade Shocks / H. M. J. Fonteijn, P. A. J. van Oort, G. M. Hengeveld // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2024. – Vol. 27, Iss. 2. – DOI: 10.18564/jasss.5307.

Материал поступил 27.03.2026, одобрен 06.04.2026,
принят к публикации 06.04.2026

УДК 338.27

ПОНЯТИЙНО-КАТЕГОРИАЛЬНЫЙ АППАРАТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ: СИСТЕМАТИЗАЦИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ И АВТОРСКИЙ ПОДХОД**А. А. Королёва***Аспирант кафедры экономической безопасности экономического факультета, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: arina.koroleva.657@gmail.com***Реферат**

В статье представлен критический анализ понятийно-категориального аппарата энергетической безопасности на основе 40 определений, отобранных из русскоязычных и зарубежных научных источников, официальных документов и аналитических отчетов международных организаций за период с 1976 по 2023 год. Цель исследования заключается в систематизации существующих подходов к определению энергетической безопасности, выявлении их ключевых преимуществ и методологических недостатков, а также в разработке универсального определения, ориентированного на удовлетворение потребностей интеграционных объединений, в частности Евразийского экономического союза (ЕАЭС). Методологическую основу работы составили классификационный анализ и построение матрицы соответствия по двум независимым основаниям: характеру угроз (геополитические, экономические, технические, экологические) и методологическому подходу (дескриптивные, нормативные, аналитические). Проведенный анализ позволил выявить наиболее разработанные и, напротив, лакунарные области в существующем понятийном аппарате. Установлено, что экономические определения, несмотря на их широкую распространенность и признание важности ценовых и рыночных аспектов, представлены исключительно дескриптивным типом и не содержат ни четких нормативных критериев приемлемого уровня цен или энергозатрат, ни аналитических механизмов, объясняющих причинно-следственные связи между экономическими процессами и энергетической безопасностью. На основе выявленных методологических пробелов разработано авторское определение энергетической безопасности, интегрирующее дескриптивный, нормативный и аналитический компоненты и учитывающее специфику интеграционных объединений, включая различное положение стран-экспортеров и импортеров энергии. Предложенное определение может служить методологической основой для построения системы количественной оценки и мониторинга энергетической безопасности в рамках ЕАЭС.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, классификация определений, характер угроз, методологический подход, матрица соответствия, ЕАЭС.

CONCEPTUAL AND CATEGORICAL APPARATUS OF ENERGY SECURITY: SYSTEMATIZATION, CLASSIFICATION AND AUTHOR'S APPROACH**A. A. Koroleva****Abstract**

The article presents a critical analysis of the conceptual and categorical framework of energy security based on 40 definitions selected from Russian and foreign scientific sources, official documents, and analytical reports of international organizations covering the period from 1976 to 2023. The aim of the study is to systematize existing approaches to defining energy security, identify their key strengths and methodological weaknesses, and develop a universal definition oriented to the needs of integration unions, in particular the Eurasian Economic Union (EAEU). The methodological basis of the research includes classification analysis and the construction of a correspondence matrix based on two independent criteria: the nature of threats (geopolitical, economic, technical, environmental) and the methodological approach (descriptive, normative, analytical). The analysis revealed both the most developed and, conversely, lacunar areas in the existing conceptual framework. It was found that economic definitions, despite their wide prevalence and recognition of the importance of price and market aspects, are represented exclusively by the descriptive type and contain neither clear normative criteria for acceptable price levels or energy costs, nor analytical mechanisms explaining the causal relationships between economic processes and energy security. Based on the identified methodological gaps, the author's definition of energy security is developed, integrating descriptive, normative and analytical components and taking into account the specifics of integration unions, including the different positions of energy-exporting and energy-importing countries. The proposed definition can serve as a methodological basis for constructing a system of quantitative assessment and monitoring of energy security within the EAEU.

Keywords: energy security, classification of definitions, nature of threats, methodological approach, correspondence matrix, EAEU.

Введение

Энергетическая безопасность и ее аспекты являются одним из основных дискурсов современной экономической науки. Как отметил Л. Честер, «концепция энергетической безопасности по своей сути неуловима, потому что она полисемична по своей природе, способна вмещать множество измерений и принимать различные характеристики в зависимости от страны, временного горизонта или источника энергии, к которому она применяется» [1].

Теоретико-методологический анализ понятия энергетической безопасности

Определение энергетической безопасности является критически важным аспектом для ее достижения, ведь без четко очерченных границ данного понятия невозможно реализовать дальнейшие меры по укреплению и повышению энергетической безопасности как отдельного региона, так и межгосударственных объединений. Именно

для интеграционных объединений, таких как ЕАЭС, проблема многообразия существующих определений и расплывчатости понятия энергетической безопасности имеет особую остроту. В рамках ЕАЭС крайне важным является определить единую энергетическую политику, что не является возможным без формирования универсального понятия энергетической безопасности.

Таким образом, целью данной работы является анализ существующих определений энергетической безопасности, их систематизация, выявление ключевых преимуществ и недостатков, а также разработка универсального определения, ориентированного на удовлетворение потребностей единого экономического пространства.

Эмпирическую базу исследования составили 40 понятий энергетической безопасности как из русскоязычных, так и из зарубежных источников. Выборка определений охватывает период с 1976 по 2023 гг. В ходе работы были также использованы классификационный анализ и построение матрицы.

Основу для классификации составило разделение определений по характеру угроз, было выделено четыре типа: геополитические угрозы (внешние угрозы, физический доступ, зависимость от поставок), экономические угрозы (стоимость, состояние рынка, экономическая доступность), технические (надежность сетевой инфраструктуры, ИТ-безопасность) и экологические угрозы (устойчивость энергии). Подобная классификация позволяет ответить на ключевой вопрос о происхожде-

нии основных дестабилизирующих аспектов и, таким образом, позволит определить четкие рамки понятия энергетической безопасности.

Основной и самой многочисленной группой являются геополитические определения. Они акцентируют внимание на обеспеченности страны энергетическими ресурсами вне зависимости от поставок из других стран, геополитической обстановки. В таблице 1 представлены определения, отнесенные к данной категории:

Таблица 1 – Анализ определений энергетической безопасности геополитической категории

Автор	Определение	Преимущества	Недостатки
Энергетическая стратегия России	Энергетическая безопасность – состояние защищенности страны, ее граждан, общества, государства, экономики от угроз надежному топливно- и энергообеспечению. Эти угрозы определяются как внешними (геополитическими, макроэкономическими, конъюнктурными) факторами, так и собственным состоянием и функционированием энергетического сектора страны [2]	Включает в себя широкий спектр угроз: секторальные, макроэкономические проблемы с акцентом на геополитику. Признание двойственной природы угроз	Отсутствуют критерии измерения уровня защищенности и иерархия угроз
Постановление Совета Министров Республики Беларусь	Энергетическая безопасность – состояние защищенности граждан, общества, государства, экономики от угроз дефицита в обеспечении их потребностей в энергии экономически доступными энергетическими ресурсами приемлемого качества, от угроз нарушения бесперебойности энергоснабжения [3]	Четко выделены два основных фактора: бесперебойность поставок и достаточность ресурсов	Нет детализации о «приемлемом» качестве энергии, не учитывает долгосрочную перспективу энергетической устойчивости
P. Roberts	Энергетическая безопасность – возможность отвечать требованиям спроса, производить требуемое количество топлива и электричества и поставлять их по приемлемым ценам в страны, которым это требуется для обеспечения функционирования экономики, нормальных условий существования населения и защиты национальных границ [4]	Подчеркивает связь энергетической безопасности с тремя основными социальными структурами (общество, экономика, оборона)	Понятие акцентирует внимание скорее на производителе энергии, чем на потребителе или регулирующей структуре. Нет детализации о «приемлемости» цен
К. С. Зыков	Энергетическая безопасность России – это такое состояние общества и экономики, которое позволяет на основе эффективного использования топливно-энергетического потенциала поддерживать необходимый для социально-экономического развития страны уровень энергопотребления, оптимальный с точки зрения коммерческих критериев уровень экспорта на мировые энергетические рынки, а также достаточный для интересов России и стран СНГ уровень взаимодействия с ТЭК стран Содружества [5]	Определение подходит для стран-экспортеров энергии, так как учитывает оптимальный уровень экспорта. Также сделан акцент на взаимодействии с соседствующими странами, что также актуально для стран-членов ЕАЭС	Оценка энергетической безопасности сильно привязана к интересам экспортера и не учитывает безопасность импортирующих стран
А. И. Татаркин	Энергетическая безопасность – регулируемая система надежного и безопасного движения топливно-энергетических ресурсов и сопутствующих факторов производства в глобальном масштабе, обеспечивающая устойчивое экономическое и социальное развитие в мире [6]	Сделан акцент на системности подхода и необходимости внутреннего регулирования для достижения энергетической безопасности	Данное определение является чрезмерно широким, сложно имплементировать на практике из-за того, что отсутствуют конкретные комментарии о регулировании энергетической безопасности
Указ Президента Российской Федерации	Энергетическая безопасность – состояние защищенности экономики и населения страны от угроз национальной безопасности в сфере энергетики, при котором обеспечивается выполнение предусмотренных законодательством Российской Федерации требований к топливно- и энергоснабжению потребителей, а также выполнение экспортных контрактов и международных обязательств Российской Федерации [7]	Подчеркнута связь между выполнением внешних обязательств и внутренней безопасностью государства	Ориентация на защиту интересов страны-экспортера
Н. Н. Сергеев	Энергетическая безопасность – это не столько экономическая категория, сколько политическая, определяющая национальные интересы страны [8]	Сделан акцент на важности политической стратегии при реализации энергетической безопасности	Не учтены экономические, экологические, технические и прочие аспекты
M. Willrich	Энергетическая безопасность – это гарантия достаточных поставок энергии, позволяющих стране функционировать во время войны [9]	Задан четкий стандарт нормы – возможность функционировать даже в военное время	Не учтены интересы поставщиков, домохозяйств, социума
J. Jewell, E. Brutschin	Энергетическая безопасность – это отсутствие угроз и способность государств и системных операторов реагировать на угрозы [10]	Подчеркивает два аспекта: статический (отсутствие угроз) и динамический (способность реагировать на появляющиеся угрозы)	Неприменимо практически из-за недостижимости ситуации полного отсутствия угроз

Продолжение таблицы 1

Автор	Определение	Преимущества	Недостатки
L. Chester	Концепция энергетической безопасности по своей сути неуволнима, потому что она полисемична по своей природе, способна вмещать множество измерений и принимать различные характеристики в зависимости от страны, временного горизонта или источника энергии, к которому она применяется [1]	Подчеркивается причина отсутствия единого универсального определения и важность существования множества подходов	Не дает ни экономических, ни геополитических рамок для определения понятия энергетической безопасности, только подчеркивает множественность подходов
L. Chester	Энергетическая безопасность относится к беспрепятственному и непрерывному доступу к источникам энергии, разнообразию источников, независимости от конкретного географического региона для поставок энергии, изобилию источников энергии, некоторой форме энергетической самодостаточности и/или энергоснабжению, способному выдерживать внешние шоки [11]	Включает как статические аспекты (разнообразие источников энергии), так и динамические (способность выдерживать шоки). Богатый набор характеристик, особенно важных для импортеров энергии	Нет иерархии характеристик, практически неприменимо из-за невозможности многих стран достичь самодостаточности
C. Winzer	Энергетическая безопасность ассоциируется с энергетической независимостью, разнообразием энергии, надежностью поставок или защитой бедных слоев населения от волатильности цен на энергию [12]	Упоминается социальная защита бедных слоев населения, подчеркивает возможность использования понятия в разных контекстах	Не является практикоориентированным определением, разнородные аспекты перечислены без связи
J. Knox-Hayes, M. A. Brown, B. K. Sovacool, Y. Wang	Энергетическая безопасность – это контекстно-зависимый политический феномен [13]	Подчеркивает роль политики и контекста (культуры, страны) в вопросе оценки энергетической безопасности	Нет уточнения о факторах зависимости или об изменяемых категориях в зависимости от контекста
B. Barton, C. Redgwell, A. Ronne, D. N. Zillman	Для стран-импортеров энергетическая безопасность заключается в обеспечении адекватных поставок топлива; для стран-производителей – в безопасности спроса; для всех – включает надежность доставки и физическую безопасность объектов [14]	Дает возможность оценить энергетическую безопасность с разных позиций: с точки зрения страны-экспортера, импортера или для обеих категорий стран	Не подчеркнута связь между тремя разными позициями, что затрудняет реализацию такой стратегии на практике
W. L. Kohl	Сущность энергетической безопасности – это гарантия способности доступа к энергетическим ресурсам, необходимым для продолжения развития национальной мощи [15]	Акцентирует внимание на том, для чего нужна реализация энергетической безопасности – национальном развитии, что позволяет учесть только самые необходимые факторы при формировании энергетической повестки	Не учтены внутренние аспекты, такие как энергоснабжение населения и экономики
D. Mara	Энергетическая безопасность – это состояние, при котором государство может удовлетворять свои энергетические потребности, не подвергаясь значительному ущербу от внешних сбоях или внутренних отказов [16]	Введено пороговое значение – понятие «значительного ущерба», что позволяет четче разделить состояние энергетической безопасности и наличие явных угроз	Автор не конкретизирует энергетические потребности государства, также понятие «значительного ущерба» требует дополнительной оценки и классификации

Примечание – Источник: авторская разработка на основе [1–16].

Проанализировав приведенные выше определения, можно сделать вывод о том, что основным достоинством геополитических определений является то, что они подчеркивают связь международных отношений и национального суверенитета, что является важным моментом в контексте интеграционных объединений, таких как ЕАЭС. При этом в большинстве случаев геополитические определения делают акцент на самом первом этапе реализации энергетической безопасности – физической доступности энергоресурсов, без которой невозможно реализовать дальнейшие шаги в данной сфере. Однако главным недостатком геополитической категории

можно назвать отсутствие акцента на внутренних аспектах энергетической безопасности: цене и ее доступности, техническом состоянии инфраструктуры, политическом регулировании и пр.

Следующей группой являются экономические определения, которые фокусируются на стабильности рынка энергии, доступности энергии и регулировании цен. Также основным вопросом в данной категории является функционирование экономики и ее развитие при определенных энергетических издержках, которые предполагается минимизировать. Определения, относящиеся к группе экономических угроз, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Анализ определений энергетической безопасности экономической категории

Автор	Определение	Преимущества	Недостатки
International Energy Agency	Энергетическая безопасность – это уверенность в том, что энергия будет иметься в распоряжении в том количестве и того качества, которые требуются при данных экономических условиях [17]	Данное определение учитывает динамику и изменения в экономических условиях, также соотносит количество и качество энергии с экономическими условиями, что предполагает гибкость	Не учтена значимость внешних угроз, что является важной частью обеспечения «уверенности» в наличии энергии
A. B. Баитов	Энергетическая безопасность понимается как состояние защищенности личности, общества, государства, экономики от угроз нарушения обоснованных потребностей в энергии, энергетических ресурсах при нормальных и чрезвычайных обстоятельствах и угроз нарушения бесперебойного энергоснабжения при экономически разумных, обоснованных ценах на топливно-энергетические ресурсы [18]	Учтена разница между нормальными и чрезвычайными ситуациями, подчеркивается, что в ситуации кризиса энергетические потребности могут отличаться	Данное определение является малоприменимым на практике, так как отсутствует конкретизация понятия «обоснованности»

Продолжение таблицы 2

Автор	Определение	Преимущества	Недостатки
П. В. Шестопалов	Энергетическая безопасность – способность топливно-энергетического комплекса страны на основе эффективного использования внутренних и внешних ресурсов обеспечивать устойчивое развитие экономики страны, надежное энергоснабжение субъектов хозяйственной деятельности и населения в настоящее время и в перспективе, а также способность реализовывать свою стратегию на мировом рынке [19]	Учеными как внутренние, так и внешнеэкономические аспекты, что особенно важно для стран-экспортеров. Энергетическая безопасность рассматривается как статическая, так и динамическая категория	Автор фокусируется в основном на ТЭК, т. е. стороне предложения, и не учитывает спрос и поведение потребителей
Л. Л. Грязнов	Энергетическая безопасность рыночной экономики – это обеспеченность экономики ТЭР по стоимости, при которой, с одной стороны, возможно воспроизводство в отраслях ТЭК, а, с другой стороны – когда в основных отраслях национальной экономики производится положительная добавленная стоимость [20]	Определение делает акцент на связи цены энергии с возможностью создания добавленной стоимости, что является классическим макроэкономическим подходом	В связи с невозможностью рассчитать «стоимость, позволяющую воспроизводство» определение сложно применить в энергетической политике
L. Gitelman	Энергетическая безопасность – это сложная категория, которая выражает способность топливно-энергетического комплекса региона поставлять на внутренний рынок необходимое количество и ассортимент энергоресурсов по стабильным и разумным ценам; своевременно смягчать неожиданные колебания спроса на топливно-энергетические ресурсы; обеспечивать бесперебойное энергоснабжение и параметры энергоносителей в реальном времени [21]	Подчеркивается важность обеспечения энергетической безопасности именно на региональном уровне, что крайне важно для ЕАЭС. Также рассматривается динамический аспект энергетической безопасности – смягчение колебаний	Фокус внимания направлен только на сторону предложения без учета спроса и потребностей рынка
Т. А. Бурменко	Энергетическая безопасность представляет собой динамичное, многомерное понятие, которое включает в себя не только физическую безопасность объектов производства энергии, но и безопасность экономической составляющей энергетического рынка [22]	Автор признает многомерность и динамичность понятия энергетической безопасности, также разделяет физическую и экономическую безопасность, что является важным для дальнейшего анализа	Определение носит обзорный характер и не описывает конкретные факторы, влияющие на обеспечение энергетической безопасности
B. Barton, C. Redgwell, A. Ronne, D. N. Zillman	Энергетическая безопасность – это состояние, при котором нация и все или большинство ее граждан и предприятий имеют доступ к достаточным энергетическим ресурсам по разумным ценам в обозримом будущем, свободный от серьезного риска крупных сбоев в обслуживании [23]	Четко определены главные бенефициары (граждане, предприятия, нация), также учтен риск сбоев, что делает определение более практически ориентированным	Свобода от риска является практически недостижимой
M. Wilrich	Энергетическая безопасность – это гарантия адекватных поставок энергии для поддержания национальной экономики на нормальном уровне [24]	Предполагает введение закрепленной нормы, что упрощает оценку энергетической безопасности	Нормальный уровень экономики требует дополнительного определения и фиксации
International Energy Agency	Энергетическая безопасность – это бесперебойная доступность источников энергии по доступной цене [25]	Выделены два ключевых аспекта: экономический в виде доступности цены и физический в виде бесперебойности	Фактор качества энергии при обеспечении ее бесперебойного доступа не учтен
B. K. Sovacool, M. A. Brown	Энергетическая безопасность – это состояние, при котором страна может удовлетворять свои текущие и будущие энергетические потребности надежно, по доступным ценам и без негативных социальных или экологических последствий [26]	Автор включает временную перспективу, упоминая будущие энергетические потребности	Производство энергии без каких-либо негативных последствий является недостижимым, что делает такой подход малоприменимым на практике
M. Radovanović	Энергетическая безопасность – это непрерывная доступность энергии в разнообразных формах, в достаточных количествах и по разумным ценам, с учетом экологической устойчивости [27]	Автор подчеркивает важный аспект диверсификации энергии, а также непрерывность ее поставок	Понятие «достаточного количества» энергии требует дополнительного определения и оценки для более практически ориентированного подхода
H. Zhao	Энергетическая безопасность – это состояние, при котором потребности страны в энергии удовлетворяются без ущерба для ее национальной безопасности, экономической стабильности или качества окружающей среды [28]	Определение подчеркивает связь между национальной безопасностью, экономикой и экологией, подобный интегральный подход позволяет учесть все важнейшие факторы оценки энергетической безопасности	Достижение потребностей страны в энергии без какого-либо ущерба для трех описанных автором сфер является малодостижимым на практике

Примечание – Источник: авторская разработка на основе [17–28].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что основным преимуществом экономических определений является их высокая конвертируемость в четкий набор факторов и операционную схему по их реализации. Также основные факторы, описанные в экономических определениях (цены, издержки, добавленную стоимость) можно измерить количественно, что упрощает процесс оценки энергетической безопасности. Несмотря на это, подобные определения не учитывают внешнеэкономические факторы и чаще всего требуют

доработки в вопросе возможности их реализации на практике и достижимости.

Следующей группой являются технические определения, которые акцентируют свое внимание на надежности сетей, ИТ-безопасности и способности энергетических систем выдерживать внешние атаки и сбои. Данная категория является самой малочисленной, что обусловлено новизной данной категории. Определения, отнесенные в группу технических угроз, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Анализ определений энергетической безопасности технической категории

Автор	Определение	Преимущества	Недостатки
A. Cherp, J. Jewell	Энергетическая безопасность – это низкая уязвимость жизненно важных энергетических систем [29]	Авторы применяют инновационный подход, акцентируя внимание не на угрозах, а на уязвимостях	Понятие «жизненно важных систем» требует дополнительных пояснений и классификации
International Energy Agency	Энергетическая безопасность – это способность электроэнергетической системы обеспечивать бесперебойную доступность электроэнергии, выдерживая и восстанавливаясь после возмущений и непредвиденных обстоятельств [30]	Определение вводит важное понятие устойчивости как возможности выдерживать сбои и восстанавливаться	Данный подход применим только для электроэнергетики и не распространяется на прочие энергоносители
C. Winzer	Энергетическая безопасность означает обеспечение того, чтобы энергетические системы могли выдерживать сбои и восстанавливаться после них, независимо от того, вызваны ли они стихийными бедствиями, техническими неполадками или действиями человека [31]	Указывает на разнонаправленность вероятных причин сбоя, также утверждает о важности устойчивости энергосистем	Данное определение не является практикоориентированным, так как крайне трудно оценить способность выдерживать сбои до их наступления
C. Winzer	Энергетическая безопасность – это управление рисками для энергетических систем, включая технические риски, человеческие риски и природные риски [32]	Инновационный подход, предполагающий не просто избегание рисков, а их классификацию и активный риск-менеджмент	Автор не предоставляет приемлемый уровень рисков для каждой категории

Примечание – Источник: авторская разработка на основе [29–32].

Таким образом, технические определения предполагают определенные параметры надежности, что является крайне важным с точки зрения измеримости и оценки энергетической безопасности. Также в данной группе чаще встречаются инновационные подходы к определению энергетической безопасности и ее достижению путем не просто избегания угроз, а возможностью их выдерживать и ими управлять. Главным недостатком технических определений является их узкая направ-

ленность, что делает их непригодными для комплексной оценки энергетической безопасности.

Группа экологических определений включает в себя понятия, акцентирующие внимание на устойчивом развитии, экологических ограничениях и стандартах качества окружающей среды. Подобные определения позволяют оценить природные возможности добычи ресурсов и рациональность их использования. Понятия, относящиеся к группе экологических, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Анализ определений энергетической безопасности экологической категории

Автор	Определение	Преимущества	Недостатки
О. А. Хлопов	Энергетическая безопасность в новых условиях не только означает ресурсное обеспечение, но и является основой для экономического роста, включая наличие современных энергетических технологий, учет экологических приоритетов [33]	Определение учитывает фактор энергетического перехода, также связывает между собой основные факторы энергетической безопасности: экономический рост, экологию и технологии	Описательный характер определения не позволяет выявить критерии для оценки энергетической безопасности
L. H. Lye, Jin Song	Энергетическая безопасность – это состояние, достигаемое, когда страна может минимизировать уязвимость к сбоям в поставках ресурсов, иметь доступ к надежной энергии по разумным или рыночным ценам и потреблять ресурсы, которые наименее вредят окружающей среде и способствуют устойчивому развитию [34]	Интегральный характер определения позволяет связать между собой три важных компонента для достижения энергетической безопасности: экологичность, доступность и минимизацию уязвимости	Понятие «наименее вредящие ресурсы» требует дополнительной трактовки и классификации для большей достижимости на практике
B. K. Sovacool, I. Mukherjee	Энергетическая безопасность включает справедливое предоставление доступных, надежных, эффективных, экологически безопасных, активно управляемых и социально приемлемых энергетических услуг конечным потребителям [35]	Данное определение является одним из самых полных по объему описанных аспектов: учтен широкий спектр требований из разных категорий (экономической, социальной, экологической и пр.)	За счет большого набора требований достижение энергетической безопасности является практически невозможным для большинства стран
B. Kruijt, D. P. van Vuuren, H. J. M. de Vries	Энергетическая безопасность имеет четыре основных аспекта: доступность (непрерывность поставок), доступность (геополитическая), экономическая доступность и приемлемость (экологическая и социальная) [36]	В определении используется классическая структура «4А», ставшая основой для построения многих систем оценки и зарекомендовавшая себя как рабочий инструмент для построения систем показателей	Классический подход требует современной интерпретации и доработки с поправкой на недавно появившиеся направления (например, технологический аспект)

Продолжение таблицы 4

Автор	Определение	Преимущества	Недостатки
A. Azzuni, C. Breyer	Энергетическая безопасность – это многомерная концепция, охватывающая доступность (наличие ресурсов), доступность (геополитический доступ), экономическую доступность и приемлемость (экологическое и социальное одобрение) [37]	Авторы интегрируют концепцию «4А» в единое определение, учитывающее основные классические аспекты энергетической безопасности	Отсутствует иерархия или приоритет между аспектами, что усложняет оценку
A. Azzuni, C. Breyer	Энергетическая безопасность охватывает четырнадцать измерений: доступность, разнообразие, стоимость, технологии и эффективность, местоположение, временные рамки, устойчивость, окружающая среда, здоровье, культура, грамотность, занятость, политика и военные аспекты [38]	Определение охватывает наиболее широкий перечень факторов, также затрагивает временные рамки, может быть ценным для академического анализа	Достижение четырнадцати показателей одновременно является практически недостижимым, такие факторы как грамотность и культура оказывают косвенное влияние и не являются необходимыми при оценке
APERC	Энергетическая безопасность – это бесперебойная физическая доступность энергии по цене, которая является доступной, при соблюдении экологических требований [39]	Так как определение разработано для практического применения оно является легко конвертируемым в четкий набор операционных задач	Понятие «экологические требования» требует дополнительной трактовки в связи с большим количеством как региональных, так и международных экологических нормативов
K. Nakatani	Энергетическая безопасность – это результат сложных взаимодействий между геополитическими, экономическими, техническими, психологическими и экологическими факторами [40]	Автор подчеркивает комплексность и важность взаимодействия множества факторов для достижения энергетической безопасности	Не уточняется каким именно должен быть результат взаимодействия и как именно должны взаимодействовать между собой описанные факторы

Примечание – Источник: авторская разработка на основе [33–40].

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что именно экологические определения являются наиболее точной репрезентацией современных тенденций в области энергетики: они подчеркивают сложность взаимодействий множества факторов для достижения энергетической безопасности и акцентируют внимание на соблюдении экологических требований, однако не позволяют собрать четкий и понятный набор количественных характеристик для оценки энергетической безопасности.

Для создания матрицы определений было использовано второе основание для классификации: методологический подход, что позволило понять, каким образом авторы конструируют свое определение и какой инструментарий применяется чаще всего. Для данной классификации были выбраны следующие группы.

- **Дескриптивные определения** – имеют описательный характер и предполагают перечисление определенных характеристик. Данная группа задает концептуальные рамки и ключевые характеристики.
- **Нормативные определения** – задают четко описанные критерии и стандарты, которым должна соответствовать та или иная

категория для достижения энергетической безопасности. Такие определения наиболее имплементируемы в практическом поле за счет конкретных ориентиров.

- **Аналитические определения** – предполагают не классическую концепцию избегания угроз, а рассматривают вопросы рисков, их регулирования, выявления уязвимостей и быстрой реакции энергетической системы на угрозы и сбои. Подобные определения являются наиболее важными для построения систем оценки энергетической безопасности за счет инновационного подхода и акцента на механизм защиты энергетической системы.

Для построения матрицы соответствия были использованы две описанные ранее категории, сопоставление которых позволило наглядно оценить распределение определений по пересечению оснований. Столбцы матрицы представляют собой категории характера угрозы, строки – распределение в зависимости от методологического подхода. Ячейки матрицы заполнены номерами определений в соответствии со списком источников. Полученные результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Матрица распределения определений энергетической безопасности по группам

По характеру угроз	Геополитические	Экономические	Технические	Экологические
По методическому подходу				
Дескриптивные	Энергетическая стратегия России [2] Постановление Совета Министров Республики Беларусь [3] P. Roberts [4] K. C. Зыков [5] Указ Президента Российской Федерации [7] M. Willrich [24] M. Willrich [9] L. Chester [11] B. Barton [14] W. L. Kohl [15]	IEA [17] A. B. Баитов [18] П. В. Шестопалов [19] Л. Л. Грязнов [20] Energies [21] T. A. Бурменко [22] B. Barton [23] M. Willrich [9] IEA [25] B. K. Sovacool, M. A. Brown [26] M. Radovanović [27] H. Zhao [28]	IEA [30]	L. H. Lye, Jin Song [34] APERC [39]
Нормативные	A. И. Татаркин [6] Н. Н. Сергеев [8]			O. A. Хлопов [33] B. K. Sovacool, I. Mukherjee [35] B. Krut et al. [36] A. Azzuni, C. Breyer [37] A. Azzuni, C. Breyer [38]

Продолжение таблицы 5

По характеру угроз	Геополитические	Экономические	Технические	Экологические
По методическому подходу				
Аналитические	J. Jewell, E. Brutschin [10] L. Chester [1] C. Winzer [12] J. Knox-Hayes et al. [13] D. Mara [16]		A. Cherp, J. Jewell [29] C. Winzer [31] C. Winzer [32]	K. Nakatani [40]

Примечание – Источник: авторская разработка.

Проведенный анализ позволяет выявить ряд ключевых наблюдений. Во-первых, наиболее многочисленными категориями являются дескриптивные определения геополитической и экономической категорий. Это связано с тем, что классическим подходом к оценке энергетической безопасности долгое время являлось именно описание экономических связей и внешних факторов, именно поэтому к данной категории относится большинство определений государственных регуляторных органов.

Во-вторых, технические определения являются самой немногочисленной категорией и представлены в основном аналитическим подходом. Это обусловлено как новизной подхода, так и доминированием геополитического и экономического дискурсов в попытке определения энергетической безопасности. Распространенность аналитического подхода в данной категории говорит о прикладном характере технических определений, что вполне может быть имплементировано регуляторами для составления новых нормативов и определений энергетической безопасности.

В-третьих, можно заметить, что экономические определения представлены только дескриптивной категорией, что означает как отсутствие четко очерченного понятия нормы экономических показателей, так и отсутствия глубоко понимая причинно-следственных связей в вопросе влияния экономических процессов на энергетическую повестку.

Таким образом, несмотря на то, что экономический подход является одной из классических методик определения энергетической безопасности, полученный анализ матрицы соответствия указывает на значительный пробел в применении разнообразных методологических подходов. Именно поэтому особо важной задачей является разработка универсального определения энергетической безопасности, способного учесть как существующие методологические проблемы, так и современные тенденции. Ключевыми принципами в разработке определения стали:

- методологическая интеграция (совмещение дескриптивного, нормативного, аналитического компонентов для достижения максимального покрытия основных вопросов определения энергетической безопасности);
- практикоориентированность (определение должно быть легко конвертируемо в набор количественных характеристик и служить основой для построения системы показателей);
- специфика интеграционных объединений (определение должно быть применимо для страновых объединений, а также учитывать как стран-экспортеров энергии, так и импортеров).

Объединяя три ключевых принципа, можно предположить следующее определение.

Энергетическая безопасность в экономическом измерении – это ситуация, в которой обеспечивается физическая и техническая доступность энергии для всех категорий потребителей по ценам, составляющим социально приемлемую долю в структуре расходов потребителя и позволяющим сохранить положительную добавленную стоимость в ключевых отраслях экономики, а защищенность от внешних и внутренних угроз достигается через гибкость политики, ценовое регулирование и повышение энергоэффективности.

Заключение

Таким образом, проведенный анализ позволил систематизировать понятийно-категориальный аппарат, выявить преимущества и недостатки основных групп определений, построить матрицу соответствия и на ее основе выявить ведущие методологические направления в определении энергетической безопасности. Одним

из таких направлений является экономическая категория, которая, несмотря на академическую распространенность, оказалась поверхностно проработанной на аналитическом и нормативном уровнях. Разработанное авторское определение позволило восполнить обнаруженный пробел и применить интегрированный подход в попытке объединить методологические подходы.

Список цитированных источников

1. Chester, L. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature / L. Chester // *Energy Policy*. – 2010. – Vol. 38, № 2. – P. 888.
2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 нояб. 2009 г., № 1715-п. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94054 (дата обращения: 08.03.2026).
3. Об утверждении концепции энергетической безопасности Республики Беларусь : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 23 дек. 2015 г. № 1084 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21501084> (дата обращения: 08.03.2026).
4. Roberts, P. Определение / P. Roberts // *Энергетическая безопасность: определение понятия и сущность* / П. В. Шестопалов // *Проблемы экономики и юридической практики*. – 2012. – № 5. – С. 67.
5. Зыков, К. С. Энергетическая безопасность как составляющая экономического развития России / К. С. Зыков // *Экономическая и энергетическая безопасность регионов России : материалы Междунар. науч.-практ. конф.* – Пермь, 2003. – Ч. 1. – С. 68.
6. Татаркин, А. И. Энергетика и экономическая безопасность регионов России / А. И. Татаркин, А. А. Куклин, А. Л. Мызин. – М.: Экономика, 2007. – С. 67.
7. Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации : Указ Президента Росс. Федерации, 13 мая 2019 г., № 216. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201905140010> (дата обращения: 08.03.2026).
8. Сергеев, Н. Н. Формирование системы энергетической безопасности Российской Федерации / Н. Н. Сергеев // *Вестник АГТУ*. – 2016. – № 1. – С. 14.
9. Willrich, M. International energy issues and options / M. Willrich // *Annual Review of Energy*. – 1976. – Vol. 1. – P. 749. – URL: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.eg.01.110176.003523> (date of access: 08.03.2026).
10. Jewell, J. The geopolitics of energy transitions / J. Jewell, E. Brutschin // *The Handbook of Energy Geography* / ed. by K. Hancock, J. Allison. – Oxford : Oxford University Press, 2021. – P. 38.
11. Chester, L. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature / L. Chester // *Energy Policy*. – 2010. – Vol. 38, № 2. – P. 887.
12. Winzer, C. Conceptualizing energy security / C. Winzer // *Energy Policy*. – 2012. – Vol. 46. – P. 36.
13. Knox-Hayes, J. Understanding public attitudes toward energy security in Japan and the United States / J. Knox-Hayes, M. A. Brown, B. K. Sovacool, Y. Wang // *Energy Policy*. – 2013. – Vol. 61. – P. 121.
14. Energy Security: Managing Risk in a Dynamic Legal and Regulatory Environment / B. Barton, C. Redgwell, A. Ronne, D. N. Zillman. – Oxford : Oxford University Press, 2004. – P. 462–464. – URL: <https://global.oup.com/academic/product/energy-security-9780199271610> (date of access: 08.03.2026).

15. Kohl, W. L. National security and energy / W. L. Kohl // Encyclopedia of Energy. – Amsterdam : Elsevier, 2004. – P. 195.
16. The place of energy security in the national security framework: an assessment approach / D. Mara, S. Nate, A. Stavitsky, G. Kharlamova // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 2. – P. 658.
17. International Energy Agency / IEA. – URL: <https://www.iea.org/topics/energy-security> (date of access: 08.03.2026).
18. Баитов, А. В. Энергетическая безопасность России в условиях рыночных отношений / А. В. Баитов, В. В. Великороссов, А. М. Карякин. – М. : Книжный мир, 2012. – С. 68.
19. Шестопапов, П. В. Энергетическая безопасность как составляющая национальной безопасности государства / П. В. Шестопапов // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. – 2014. – № 5. – С. 69.
20. Грязнов, Л. Л. Тезисы по энергокризису / Л. Л. Грязнов // Экологические системы. – 2002. – № 2. – С. 68.
21. Energy Security: New Threats and Solutions // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 6. – P. 2869. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/6/2869> (date of access: 08.03.2026).
22. Бурменко, Т. А. Понятие «энергетическая безопасность» в работах иностранных ученых / Т. А. Бурменко // Управление экономическими системами: малое предпринимательство в условиях новых вызовов : сб. ст. – Чита : ЗабГУ, 2019. – С. 41.
23. Energy Security: Managing Risk in a Dynamic Legal and Regulatory Environment / B. Barton, C. Redgwell, A. Ronne, D. N. Zillman. – Oxford : Oxford University Press, 2004. – P. 5. – URL: <https://global.oup.com/academic/product/energy-security-9780199271610> (date of access: 08.03.2026).
24. Willrich, M. International energy issues and options / M. Willrich // Annual Review of Energy. – 1976. – Vol. 1. – P. 749. – URL: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.eg.01.110176.003523> (date of access: 08.03.2026).
25. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023 / IEA. – Paris, 2023. – P. 27. – URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (date of access: 08.03.2026).
26. Sovacool, B. K. Competing dimensions of energy security: An international perspective / B. K. Sovacool, M. A. Brown // Annual Review of Environment and Resources. – 2010. – Vol. 35, № 1. – P. 79.
27. Radovanović, M. Energy security / M. Radovanović // Sustainable Energy Management. – 2nd ed. – Boston : Academic Press, 2023. – P. 281.
28. Zhao, H. Energy security / H. Zhao // The Economics and Politics of China's Energy Security Transition. – Amsterdam : Elsevier, 2019. – P. 10.
29. Cherp, A. The concept of energy security: Beyond the four As / A. Cherp, J. Jewell // Energy Policy. – 2014. – Vol. 75. – P. 417. – DOI: 10.1016/j.enpol.2014.09.005.
30. International Energy Agency. Electricity Security: IEA Definition / IEA. – Paris, 2022. – URL: <https://www.iea.org/topics/electricity-security> (date of access: 08.03.2026).
31. Winzer, C. Conceptualizing energy security / C. Winzer // Energy Policy. – 2012. – Vol. 46. – P. 38.
32. Winzer, C. Conceptualizing energy security / C. Winzer // Energy Policy. – 2012. – Vol. 46. – P. 40.
33. Хлопов, О. А. Энергетическая безопасность в условиях энергетического перехода / О. А. Хлопов // Власть. – 2023. – Т. 31, № 5. – С. 258.
34. Lye, L. H. Energy security outlook / L. H. Lye, Jin Song // Energy Security: Managing Risk in a Dynamic Legal and Regulatory Environment / ed. by B. Barton [et al.]. – Oxford : Oxford University Press, 2004. – 486 p.
35. Sovacool, B. K. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach / B. K. Sovacool, I. Mukherjee // Energy. – 2011. – Vol. 36, № 8. – P. 5344.
36. Indicators for energy security / B. Kruijt, D. P. van Vuuren, H. J. M. de Vries, H. Groenenberg // Energy Policy. – 2009. – Vol. 37, № 6. – P. 2167.
37. Azzuni, A. Definitions and dimensions of energy security: A literature review / A. Azzuni, C. Breyer // WIREs Energy and Environment. – 2018. – Vol. 7, № 1. – P. 5.
38. Azzuni, A. Definitions and dimensions of energy security: A literature review / A. Azzuni, C. Breyer // WIREs Energy and Environment. – 2018. – Vol. 7, № 1. – P. 12.
39. APERC (Asia Pacific Energy Research Centre). A Quest for Energy Security in the 21st Century. – Tokyo : APERC, 2007. – P. 12. – URL: <https://aperc.or.jp/publications/reports/2007> (date of access: 08.03.2026).
40. Nakatani, K. Analyzing energy security / K. Nakatani // Energy Security: Managing Risk in a Dynamic Legal and Regulatory Environment / ed. by B. Barton [et al.]. – Oxford : Oxford University Press, 2004. – 486 p.

References

1. Chester, L. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature / L. Chester // Energy Policy. – 2010. – Vol. 38, № 2. – P. 888.
2. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda : utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 13 noyab. 2009 g., № 1715-r. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94054 (data obrashcheniya: 08.03.2026).
3. Ob utverzhdenii koncepcii energeticheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus' : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus' ot 23 dek. 2015 g. № 1084 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21501084> (data obrashcheniya: 08.03.2026).
4. Roberts, P. Opredelenie / P. Roberts // Energeticheskaya bezopasnost': opredelenie ponyatiya i sushchnost' / P. V. Shestopalov // Problemy ekonomiki i yuridicheskoy praktiki. – 2012. – № 5. – S. 67.
5. Zykov, K. S. Energeticheskaya bezopasnost' kak sostavlyayushchaya ekonomicheskogo razvitiya Rossii / K. S. Zykov // Ekonomicheskaya i energeticheskaya bezopasnost' regionov Rossii : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – Perm', 2003. – CH. 1. – S. 68.
6. Tatarkin, A. I. Energetika i ekonomicheskaya bezopasnost' regionov Rossii / A. I. Tatarkin, A. A. Kuklin, A. L. Myzin. – M. : Ekonomika, 2007. – S. 67.
7. Ob utverzhdenii Doktriny energeticheskoy bezopasnosti Rossijskoj Federacii : Ukaz Prezidenta Ross. Federacii, 13 maya 2019 g., № 216. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201905140010> (data obrashcheniya: 08.03.2026).
8. Sergeev, N. N. Formirovanie sistemy energeticheskoy bezopasnosti Rossijskoj Federacii / N. N. Sergeev // Vestnik AGTU. – 2016. – № 1. – S. 14.
9. Willrich, M. International energy issues and options / M. Willrich // Annual Review of Energy. – 1976. – Vol. 1. – P. 749. – URL: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.eg.01.110176.003523> (date of access: 08.03.2026).
10. Jewell, J. The geopolitics of energy transitions / J. Jewell, E. Brutschin // The Handbook of Energy Geography / ed. by K. Hancock, J. Allison. – Oxford : Oxford University Press, 2021. – P. 38.
11. Chester, L. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature / L. Chester // Energy Policy. – 2010. – Vol. 38, № 2. – P. 887.
12. Winzer, C. Conceptualizing energy security / C. Winzer // Energy Policy. – 2012. – Vol. 46. – P. 36.
13. Knox-Hayes, J. Understanding public attitudes toward energy security in Japan and the United States / J. Knox-Hayes, M. A. Brown, B. K. Sovacool, Y. Wang // Energy Policy. – 2013. – Vol. 61. – P. 121.
14. Energy Security: Managing Risk in a Dynamic Legal and Regulatory Environment / B. Barton, C. Redgwell, A. Ronne, D. N. Zillman. – Oxford : Oxford University Press, 2004. – P. 462–464. – URL: <https://global.oup.com/academic/product/energy-security-9780199271610> (date of access: 08.03.2026).
15. Kohl, W. L. National security and energy / W. L. Kohl // Encyclopedia of Energy. – Amsterdam : Elsevier, 2004. – P. 195.
16. The place of energy security in the national security framework: an assessment approach / D. Mara, S. Nate, A. Stavitsky, G. Kharlamova // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 2. – P. 658.

17. International Energy Agency / IEA. – URL: <https://www.iea.org/topics/energy-security> (date of access: 08.03.2026).
18. Baitov, A. V. Energeticheskaya bezopasnost' Rossii v usloviyah rynochnykh otnoshenij / A. V. Baitov, V. V. Velikorossov, A. M. Karyakin. – M.: Knizhnyj mir, 2012. – S. 68.
19. SHestopalov, P. V. Energeticheskaya bezopasnost' kak sostavlyayushchaya nacional'noj bezopasnosti gosudarstva / P. V. SHestopalov // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo social'no-ekonomicheskogo universiteta. – 2014. – № 5. – S. 69.
20. Gryaznov, L. L. Tezisy po energokrizisu / L. L. Gryaznov // Ekologicheskie sistemy. – 2002. – № 2. – S. 68.
21. Energy Security: New Threats and Solutions // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 6. – P. 2869. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/6/2869> (date of access: 08.03.2026).
22. Burmenko, T. A. Ponyatie «energeticheskaya bezopasnost'» v rabotah inostrannykh uchenykh / T. A. Burmenko // Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: maloe predprinimatel'stvo v usloviyah novykh vyzovov: sb. st. – CHita: ZabGU, 2019. – S. 41.
23. Energy Security: Managing Risk in a Dynamic Legal and Regulatory Environment / B. Barton, C. Redgwell, A. Ronne, D.N. Zillman. – Oxford: Oxford University Press, 2004. – P. 5. – URL: <https://global.oup.com/academic/product/energy-security-9780199271610> (date of access: 08.03.2026).
24. Willrich, M. International energy issues and options / M. Willrich // Annual Review of Energy. – 1976. – Vol. 1. – P. 749. – URL: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.eg.01.11017.6.003523> (date of access: 08.03.2026).
25. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023 / IEA. – Paris, 2023. – P. 27. – URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (date of access: 08.03.2026).
26. Sovacool, B. K. Competing dimensions of energy security: An international perspective / B. K. Sovacool, M. A. Brown // Annual Review of Environment and Resources. – 2010. – Vol. 35, № 1. – P. 79.
27. Radovanović, M. Energy security / M. Radovanović // Sustainable Energy Management. – 2nd ed. – Boston: Academic Press, 2023. – P. 281.
28. Zhao, H. Energy security / H. Zhao // The Economics and Politics of China's Energy Security Transition. – Amsterdam: Elsevier, 2019. – P. 10.
29. Cherp, A. The concept of energy security: Beyond the four As / A. Cherp, J. Jewell // Energy Policy. – 2014. – Vol. 75. – P. 417. – DOI: 10.1016/j.enpol.2014.09.005.
30. International Energy Agency. Electricity Security: IEA Definition / IEA. – Paris, 2022. – URL: <https://www.iea.org/topics/electricity-security> (date of access: 08.03.2026).
31. Winzer, C. Conceptualizing energy security / C. Winzer // Energy Policy. – 2012. – Vol. 46. – P. 38.
32. Winzer, C. Conceptualizing energy security / C. Winzer // Energy Policy. – 2012. – Vol. 46. – P. 40.
33. Hlopov, O. A. Energeticheskaya bezopasnost' v usloviyah energeticheskogo perekhoda / O. A. Hlopov // Vlast'. – 2023. – T. 31, № 5. – S. 258.
34. Lye, L. H. Energy security outlook / L. H. Lye, Jin Song // Energy Security: Managing Risk in a Dynamic Legal and Regulatory Environment / ed. by B. Barton [et al.]. – Oxford: Oxford University Press, 2004. – 486 p.
35. Sovacool, B. K. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach / B. K. Sovacool, I. Mukherjee // Energy. – 2011. – Vol. 36, № 8. – P. 5344.
36. Indicators for energy security / B. Krut, D. P. van Vuuren, H. J. M. de Vries, H. Groenenberg // Energy Policy. – 2009. – Vol. 37, № 6. – P. 2167.
37. Azzuni, A. Definitions and dimensions of energy security: A literature review / A. Azzuni, C. Breyer // WIREs Energy and Environment. – 2018. – Vol. 7, № 1. – P. 5.
38. Azzuni, A. Definitions and dimensions of energy security: A literature review / A. Azzuni, C. Breyer // WIREs Energy and Environment. – 2018. – Vol. 7, № 1. – P. 12.
39. APERC (Asia Pacific Energy Research Centre). A Quest for Energy Security in the 21st Century. – Tokyo: APERC, 2007. – P. 12. – URL: <https://aperc.or.jp/publications/reports/2007> (date of access: 08.03.2026).
40. Nakatani, K. Analyzing energy security / K. Nakatani // Energy Security: Managing Risk in a Dynamic Legal and Regulatory Environment / ed. by B. Barton [et al.]. – Oxford: Oxford University Press, 2004. – 486 p.

Материал поступил 08.04.2026, одобрен 06.05.2026, принят к публикации 07.05.2026

УДК 656.1/5; 005; 656.073.9; 338.35; 338.1

ВЛИЯНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ НАЦЕНКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТОРГОВОГО ДИСБАЛАНСА В СИСТЕМЕ ТОРГОВЛИ ДОБАВЛЕННОЙ СТОИМОСТЬЮ

Д. Н. Месник

*К. э. н., доцент, доцент кафедры маркетинга, УО «Белорусский государственный экономический университет», Минск, Беларусь,
e-mail: metelskiy.d308@gmail.com*

Реферат

Настоящее исследование посвящено анализу взаимосвязи между транспортной наценкой и формированием торгового дисбаланса в торговле добавленной стоимостью между участниками транспортно-логистических цепочек. В статье рассматривается влияние организационной сложности мультимодальных и интермодальных перевозок на ценообразование транспортных услуг и, как следствие, на распределение валовой добавленной стоимости в глобальных цепочках поставок. Представлены результаты эмпирического исследования корреляционной связи между транспортной наценкой и ключевыми параметрами международной торговли – стоимостью транспортных услуг, объемами экспорта и импорта. Методологической основой исследования выступает параметрическая модель линейного типа, позволяющая оценить предельные эффекты каждого из рассматриваемых факторов. Статистическая значимость полученных результатов подтверждена с использованием коэффициентов корреляции Пирсона и множественного коэффициента детерминации. Установлено, что рост стоимости транспортных услуг и объемов экспорта сопровождается увеличением транспортной наценки, тогда как расширение импортных потоков оказывает сдерживающее влияние на ее динамику. Определено оптимальное (экстремальное) значение транспортной наценки для услуг сухопутного и трубопроводного транспорта, превышение которого приводит к снижению конкурентоспособности транспортных услуг и сокращению объемов перевозок. Результаты исследования имеют практическое значение для формирования тарифной политики транспортных предприятий и могут быть использованы при разработке мер экономической политики, направленных на оптимизацию участия национальных экономик в глобальных цепочках добавленной стоимости, а также при оценке реального вклада транспортно-логистического сектора в создание валовой добавленной стоимости. В контексте концепции торговли добавленной стоимостью (TiVA), разработанной ОЭСР совместно с ВТО, полученные данные позволяют скорректировать представления о структуре торгового баланса транзитных экономик с учетом логистического компонента.

Ключевые слова: экспорт, импорт, транспортная наценка, торговый дисбаланс, добавленная стоимость, логистика, глобальные цепочки поставок, корреляционно-регрессионный анализ.

THE IMPACT OF THE TRANSPORT MARK-UP ON THE FORMATION OF TRADE IMBALANCE IN THE VALUE-ADDED TRADING SYSTEM

D. N. Mesnik

Abstract

This study analyses the relationship between the transport mark-up and the formation of trade imbalances in the value-added trading system among participants of transport and logistics chains. The article examines the impact of the organisational complexity of multimodal and intermodal transportation on the pricing of transport services and, consequently, on the distribution of gross value added in global supply chains. The results of an empirical study of the correlation between the transport mark-up and the key parameters of international trade – the cost of transport services, export and import volumes – are presented. The methodological basis of the study is a parametric linear model that allows one to assess the marginal effects of each of the factors under consideration. The statistical significance of the results is confirmed using Pearson correlation coefficients and the multiple coefficient of determination. It is established that an increase in the cost of transport services and export volumes is accompanied by a rise in the transport mark-up, while the expansion of import flows exerts a restraining effect on its dynamics. The optimal (extremal) value of the transport mark-up for land and pipeline transport services is determined, beyond which the competitiveness of transport services declines and freight volumes decrease. The findings have practical relevance for the formation of tariff policies of transport enterprises and can be used in the development of economic policy measures aimed at optimising the participation of national economies in global value chains, as well as in assessing the real contribution of the transport and logistics sector to gross value added creation. In the context of the Trade in Value Added (TiVA) concept developed by the OECD in conjunction with the WTO, the data obtained allow for a more accurate understanding of the structure of the trade balance of transit economies, taking into account the logistics component.

Keywords: export, import, transport mark-up, trade imbalance, value added, logistics, global supply chains, correlation and regression analysis.

Введение

Современная система международной торговли характеризуется возрастающей сложностью логистических процессов и фрагментацией производственных цепочек [1, 2]. В условиях глобализации экономики традиционные методы измерения внешнеторговых потоков, основанных на валовой стоимости экспорта и импорта, не отражают реального вклада отдельных экономик в создание стоимости конечной продукции [3, 4]. Концепция торговли добавленной стоимостью, разработанная Организацией экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) совместно со Всемирной торговой организацией (ВТО), позволяет проводить более точную оценку участия стран в глобальных производственных сетях [5, 6].

Методология торговли добавленной стоимостью основывается на построении глобальных таблиц межотраслевого баланса, позволяющих отслеживать потоки промежуточных товаров и услуг между

странами и идентифицировать добавленную стоимость, созданную в каждой экономике [7]. В отличие от традиционных торговых статистик, система торговли добавленной стоимостью учитывает, что до 80 % стоимости экспортируемых товаров может формироваться за пределами страны экспортера [8, 9]. Как отмечают Johnson и Noguera, торговые дисбалансы, измеренные в терминах добавленной стоимости, существенно отличаются от дисбалансов, рассчитанных на основе валовых торговых потоков [10].

База данных торговли добавленной стоимостью содержит 46 показателей по 64 странам мира и включает индикаторы, характеризующие вовлеченность национальных экономик в глобальные цепочки добавленной стоимости [5, 11]. Ключевыми показателями являются: доля отечественной добавленной стоимости в экспорте, доля иностранной добавленной стоимости в экспорте, индексы прямого и обратного участия в глобальных цепочках [12].

Наиболее часто свершаются при транспортировке грузов в международном сообщении мультимодальные и интермодальные перевозки [13]. Интермодальные перевозки определяются как транспортировка грузов в одной и той же грузовой единице или транспортном средстве с использованием последовательно нескольких видов транспорта без перегрузки самого груза при смене вида транспорта [14, 15]. Мультимодальные перевозки предполагают перевозку груза по единому транспортному документу, но с возможностью перегрузки [14].

Исследования показывают, что интермодальная логистическая сеть обеспечивает более низкие удельные затраты и меньшие простои по сравнению с традиционными способами транспортировки [15, 16]. Однако организация таких перевозок требует высокой координации между различными видами транспорта (автомобильный, железнодорожный, морской, воздушный, трубопроводный) и в значительной степени зависит от профессиональной компетенции персонала транспортных предприятий [13, 17]. По данным Anderson и van Wincoop, совокупные торговые издержки для развитых стран в адваторном эквиваленте составляют около 170 %, при этом транспортные расходы формируют значительную долю данных издержек [18].

В свою очередь, рассматривая транспортную наценку в структуре ценообразования, следует отметить, что транспортная наценка представляет собой дополнительную стоимость, включаемую в цену товара для покрытия транспортных издержек и обеспечения рентабельности транспортно-логистических операций [19]. В структуре импортной цены транспортная наценка формируется наряду с таможенными платежами, ввозными пошлинами и торговой надбавкой импортера [20, 21]. По данным ЮНКТАД, глобальная средняя адваторная фрахтовая ставка составляет около 10,8 % от стоимости FOB, при этом для развивающихся стран, не имеющих выхода к морю, данный показатель достигает 12,6 % [22].

Методология исследования

Настоящее исследование основывается на гипотезе о существовании функциональной зависимости между транспортной наценкой (TrH) и параметрами международной торговли [23]. Базовая модель представлена в виде

$$TrH = f(X, EX, IM), \quad (1)$$

где X – стоимость транспортных услуг, EX – объем экспорта, IM – объем импорта.

Указанные переменные оказывают комплексное воздействие не только на размер транспортной наценки, но и на динамику валовой добавленной стоимости (ВДС) в транспортно-логистическом секторе [13, 24]:

$$ВДС = q(TrH, X, EX, IM). \quad (2)$$

Эмпирическое исследование проводилось методом пошагового варьирования значений независимых переменных с постоянными приращениями:

- стоимость транспортных услуг (X) – шаг и изменения 3 %;
- объем экспорта (EX) – шаг изменения 10 %;
- объем импорта (IM) – шаг изменения 5 %.

Такая параметризация позволяет учесть различную степень волатильности рассматриваемых показателей в условиях международной торговли [18, 25]. Более высокий шаг варьирования для экспорта отражает повышенную изменчивость внешнеторговых потоков под влиянием конъюнктурных и структурных факторов [26].

Для выполнения статистически значимых взаимосвязей применялся корреляционно-регрессионный анализ [23, 27]. Оценивались парные коэффициенты корреляции между транспортной наценкой и каждой из независимых переменных, а также множественный коэффициент детерминации для комплексной модели.

С методологической точки зрения последовательность анализа может быть представлена следующим образом: на первом этапе строятся диаграммы рассеяния с наложением трендовой линии, что позволяет предварительно выявить наличие и направление связи [27]. На втором этапе рассчитываются коэффициенты корреляции Пирсона, которые служат критерием статистической значимости и тесноты линейной зависимости. На третьем этапе формируется

регрессионная модель, в рамках которой оцениваются параметры $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, интерпретируемые как предельные эффекты соответствующих факторов [23]. Такой поэтапный подход обеспечивает логическую непрерывность исследования – от качественного визуального анализа к количественной оценке связей и далее – к экономической интерпретации полученных результатов.

Результаты исследования

В целях количественной оценки влияния стоимости транспортных услуг, объемов экспорта и импорта на величину транспортной наценки была использована параметрическая модель линейного типа, задающая функциональную зависимость [23]:

$$TrH = \alpha X + \beta EX - \gamma IM + \delta, \quad (3)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – параметры модели, интерпретируемые как предельные эффекты соответствующих факторов.

Такое задание функции позволяет, с одной стороны, отразить прямую пропорциональную зависимость транспортной наценки от стоимости оказываемых услуг и масштаба экспортных операций, а с другой стороны – учесть потенциально компенсирующее влияние импорта, приводящее к перераспределению добавленной стоимости между участниками внешнеэкономической деятельности [10, 12]. Выбор линейной формы на начальном этапе исследования методологически оправдан, поскольку обеспечивает интерпретируемость параметров модели и возможность дальнейшего усложнения спецификации (включения квадратичных и перекрестных членов) по мере накопления эмпирических данных [27].

Для каждого фактора была построена частная зависимость при фиксированных значениях остальных переменных, что позволяет визуально и аналитически оценить вклад отдельного показателя в формирование транспортной наценки. Для анализа чувствительности строятся частные зависимости:

$TrH(X)$ при фиксированных $EX = EX_0, IM = IM_0$;

$TrH(EX)$ при фиксированных $X = X_0, IM = IM_0$;

$TrH(IM)$ при фиксированных $X = X_0, EX = EX_0$.

Каждая из указанных зависимостей графически представлена в виде диаграммы рассеяния с наложенной линейной регрессионной кривой на плоскостях « $TrH - X$ », « $TrH - EX$ », « $TrH - IM$ ». Это позволяет одновременно наблюдать дисперсию эмпирических значений и аппроксимирующую тенденцию. При этом точечные наблюдения сгруппированы вдоль регрессионной прямой, а величина наклона отражает предельный эффект соответствующей переменной [23].

График зависимости $TrH = f(X)$ отражает, как изменение стоимости единицы транспортных услуг трансформируется в дополнительную транспортную наценку. Положительный наклон регрессионной прямой на графике трактуется как свидетельство того, что повышение тарифов на перевозку напрямую капитализируется в росте транспортной наценки, усиливая перераспределение добавленной стоимости в пользу транспортно-логистического сектора (рисунок 1) [4, 13]. Как подчеркивает Hummels, транспортные издержки играют особенно значительную роль в изменении относительных цен между экспортёрами и в определении двусторонних вариаций в торговле [25].

График $TrH = f(EX)$ позволяет оценить, в какой мере расширение экспортных поставок сопровождается увеличением транспортной маржи (рисунок 2).

Чем выше наклон регрессионной зависимости, тем более выраженным является эффект масштаба: прирост экспортных объемов ведет к пропорциональному либо сверхпропорциональному увеличению транспортной наценки [26]. В условиях глобальных цепочек добавленной стоимости это означает, что экспортноориентированные экономики с развитой транспортной инфраструктурой способны аккумулировать значительную долю добавленной стоимости именно за счет логистического компонента [9, 28]. Для Республики Беларусь доля валовой добавленной стоимости по транспортной деятельности в структуре ВВП составила в 2024 г. 5,1 %, а на транспортные услуги приходится около 50 % объема экспорта услуг страны [17, 29].

На графике $TrH = f(IM)$ особый интерес представляет знак и величина наклона (рисунок 3).

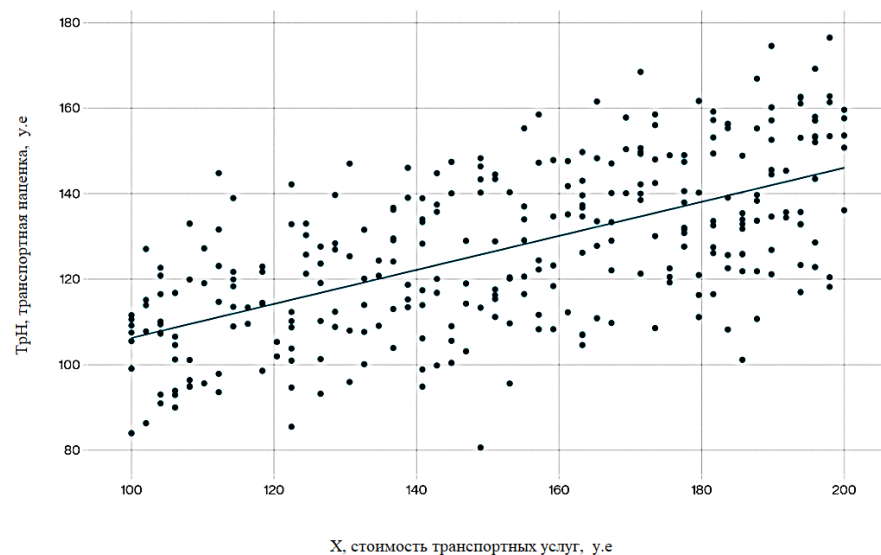


Рисунок 1 – Зависимость транспортной наценки от стоимости транспортных услуг

Примечание – Собственная разработка.

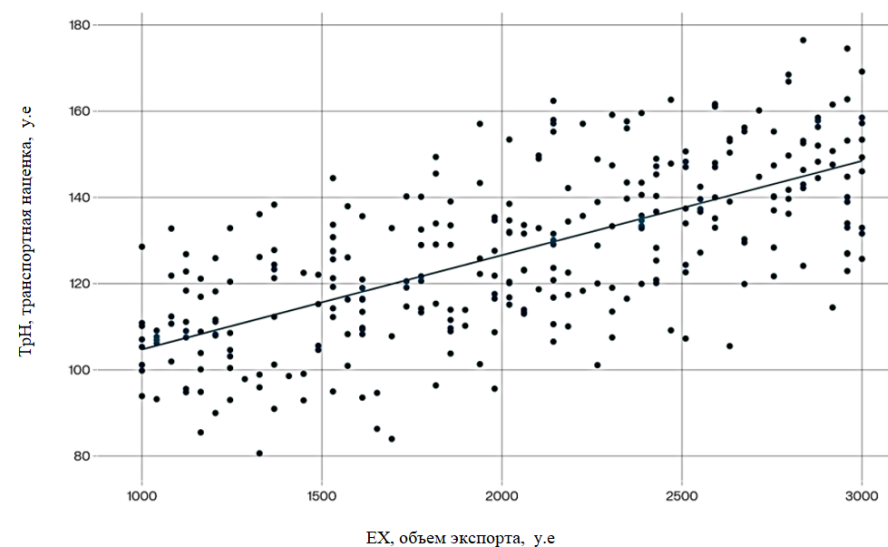


Рисунок 2 – Зависимость транспортной наценки от объема экспорта

Примечание – Собственная разработка.

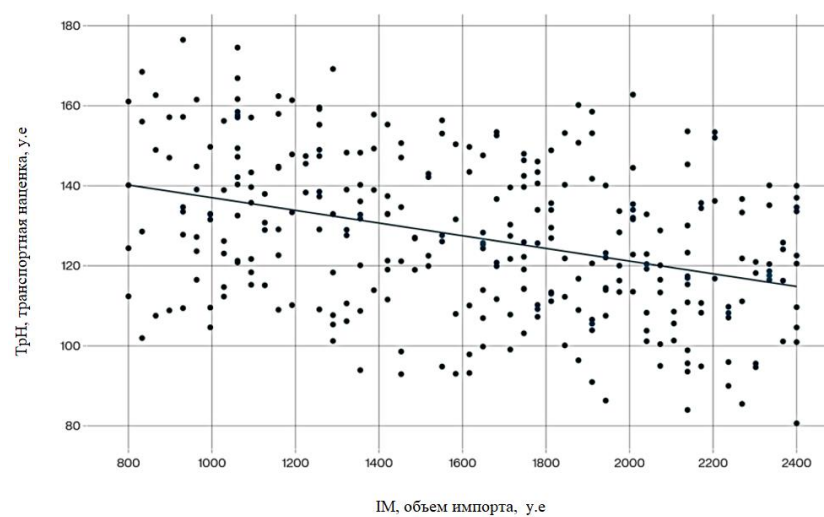


Рисунок 3 – Зависимость транспортной наценки от объема импорта

Примечание – Собственная разработка.

Отрицательный наклон может интерпретироваться как проявление конкурентного давления импортных поставок на уровень транспортной наценки: при росте импортных объемов перевозчики вынуждены оптимизировать тарифную политику, сдерживая рост или даже сокращая маржу для сохранения конкурентоспособности [19, 25]. Это, в свою очередь, влияет на перераспределение валовой добавленной стоимости между импортерами, перевозчиками и конечными потребителями [10].

Для количественной оценки тесноты связи между транспортной наценкой и факторами используются парные коэффициенты Пирсона:

$$\begin{aligned} r_{TrH,X} &= \frac{cov(TrH,X)}{\sigma_{TrH} \cdot \sigma_X}, \\ r_{TrH,EX} &= \frac{cov(TrH,EX)}{\sigma_{TrH} \cdot \sigma_{EX}}, \\ r_{TrH,IM} &= \frac{cov(TrH,IM)}{\sigma_{TrH} \cdot \sigma_{IM}}. \end{aligned}$$

На данных линейной модели получены значения коэффициентов Пирсона: для стоимости услуг – $r = 0,62$; для объема экспорта – $r = 0,68$; для объема импорта – $r = -0,37$. С экономической точки зрения полученные коэффициенты корреляции служат количественной мерой чувствительности транспортной наценки к изменению соответствующих факторов в рамках принятой спецификации модели [23, 27]. В совокупности с результатами регрессионного анализа они позволяют не только подтвердить наличие статистически значимых связей, но и интерпретировать их с позиции формирования валовой добавленной стоимости и торгового дисбаланса в системе торговли добавленной стоимостью [5, 10].

Оценка тесноты связи между транспортной наценкой и объясняющими переменными на основе коэффициента корреляции Пирсона принимает значения в интервале от -1 до 1 , где значения, близкие к 1 , свидетельствуют о сильной прямой линейной связи, близкие к -1 – о сильной обратной линейной зависимости, а значения, близкие к нулю, – об отсутствии выраженной линейной связи [27].

Теснота связи оценена с использованием коэффициента корреляции Пирсона, значения которого по модулю в диапазоне от $0,6$ до $0,7$ интерпретируется как наличие сильной линейной зависимости между транспортной наценкой и соответствующим фактором при заданной структуре модели. Это означает умеренную сильную прямую связь транспортной наценки с стоимостью транспортных услуг и экспортом и отрицательную связь с импортом в рамках настоящего исследования [23].

В контексте исследования это означает, что высокие положительные значения $r_{TrH,X}$ и $r_{TrH,EX}$ интерпретируются как эмпирическое подтверждение того, что рост стоимости транспортных услуг и масштабов экспорта сопровождается увеличением транспортной наценки. Отрицательное значение $r_{TrH,IM}$, напротив, может указывать на то, что при увеличении импортных поставок происходит частичное нивелирование транспортной наценки за счет наращивания конкуренции и перераспределения маржи [10, 25, 30].

Построенные графические зависимости и рассчитанные коэффициенты корреляции целесообразно рассматривать не изолированно, а как элементы единой аналитической конструкции, направленной на объяснение механизма формирования транспортной наценки в контексте торговли добавленной стоимостью [5, 12]. В указанной логике графики выполняют иллюстративно диагностическую функцию, позволяя визуально идентифицировать характер связи (прямой, обратный, линейный, нелинейный), тогда как корреляционные и регрессионные показатели обеспечивают количественную калибровку выявленных зависимостей [23, 27].

Анализ результатов исследования продемонстрировал наличие статистически значимой корреляционной связи между транспортной наценкой и всеми рассматриваемыми составляющими (X, EX, IM) [23]. Наиболее тесная связь выявлена между транспортной наценкой и стоимостью транспортных услуг, что согласуется с теоретическими предпосылками о прямой зависимости наценки от себестоимости оказываемых услуг [13, 19].

Установлено, что увеличение стоимости транспортных услуг на 3% приводит к соответствующему росту транспортной наценки, при этом эластичность данной зависимости варьируется в зависимости от типа перевозок [22, 25]. Для сухопутного и трубопроводного транспорта наблюдается более выраженная реакция транспортной наценки на изменение базовых параметров по сравнению с морскими и воздушными перевозками [30, 31].

Ключевым результатом исследования стало определение экстремума функции транспортной наценки – критического значения TrH_{max} , до которого целесообразно увеличивать транспортную наценку для услуг сухопутного и трубопроводного транспорта [13]. Повышение данного порога приводит к снижению конкурентоспособности транспортных услуг и уменьшению объемов перевозок, что негативно сказывается на совокупной валовой добавленной стоимости в секторе [17, 28].

Математически оптимальное значение транспортной наценки может быть определено из условия: $\frac{\partial VDC}{\partial TrH} = 0$. При выполнении условия второй производной $\frac{\partial^2 VDC}{\partial TrH^2} < 0$. Что гарантирует наличие локального максимума функции валовой добавленной стоимости [23].

Установление корреляционной зависимости между транспортной наценкой и параметрами внешней торговли имеет непосредственное влияние на формирование торгового дисбаланса в системе торговли добавленной стоимостью [5, 10]. Повышение транспортных издержек приводит к перераспределению добавленной стоимости в пользу транспортно-логистических операторов, что может искажать реальную картину участия стран производителей в создании стоимости конечной продукции [9, 12]. Как отмечается в работе Koopman, Wang и Wei, корректная декомпозиция валового экспорта на компоненты добавленной стоимости необходима для устранения эффекта «двойного счета» в международной торговой статистике [7].

В условиях интермодальных и мультимодальных перевозок данный эффект усиливается за счет накопления наценок на каждом этапе транспортировки [14, 15, 16]. Для транзитных экономик, специализирующихся на предоставлении логистических услуг, это создает дополнительную добавленную стоимость, которая должна учитываться при расчете показателей в торговле добавленной стоимостью [5, 29]. По данным обзоров ЮНКТАД, волатильность фрахтовых ставок в 2022–2024 гг. стала «новой нормой», что существенно влияет на структуру транспортных издержек в глобальных цепочках поставок [30].

Полученные результаты подтверждают высказанное в начале исследования утверждение о том, что организация мультимодальных, интермодальных и унимодальных перевозок представляет собой сложный процесс, эффективность которого в основном зависит от профессиональной компетенции работников транспортных предприятий [13, 17]. Сложность планирования и координации различных видов транспорта непосредственно отражается в структуре транспортных издержек и, соответственно, в размере транспортной наценки [16, 19].

Выявленная тесная корреляция между транспортной наценкой и параметрами международной торговли свидетельствует о существенной роли транспортно-логистического фактора в формировании торгового дисбаланса в системе торговли добавленной стоимостью [5, 10, 12]. Это имеет важные практические импликации для экономической политики, особенно для стран с развитой транспортной инфраструктурой и значительными объемами транзитных перевозок [17, 28, 29].

Определение оптимального значения транспортной наценки для сухопутного и трубопроводного транспорта позволяет транспортным предприятиям балансировать между максимизацией прибыли и поддержанием конкурентоспособности услуг [13]. Превышение критического порога TrH_{max} может привести к переориентации грузопотоков на альтернативные маршруты или виды транспорта, что в долгосрочной перспективе негативно влияет на развитие транспортной деятельности [25, 26]. Как показывают данные по транспортной сфере Республики Беларусь, экспорт транспортных услуг в 2024 г. составил $4,5$ млрд \$, увеличившись на $19,6\%$ по сравнению с 2023 г., что подтверждает значимость оптимизации тарифной политики [29].

Заключение

Настоящее исследование подтверждает значимость транспортно-логистического фактора в формировании добавленной стоимости в системе международной торговли. Сложность организации мультимодальных и интермодальных перевозок, зависимость от профессиональной компетенции персонала транспортных предприятий, а также выявленная тесная корреляция между транспортной наценкой и параметрами внешней торговли свидетельствуют о необходимости комплексного подхода к управлению ценообразованием в транспортно-логистическом секторе.

Содержательной особенностью проведенного исследования является трактовка транспортной наценки как ключевого передаточно-го звена между логистическими параметрами внешнеторговых потоков и формированием торгового дисбаланса в системе торговли добавленной стоимостью. Введение в модель переменных X , EX , IM и последующий анализ их влияния на TrH позволяет показать, что именно через изменение транспортной наценки реализуется значительная часть перераспределения валовой добавленной стоимости между странами – участниками глобальных цепочек поставок.

Графики зависимостей и коэффициенты тесноты связи демонстрируют, что рост стоимости транспортных услуг и экспорта, как правило, сопровождается увеличением транспортной маржи, тогда как расширение импортных потоков может иметь сдерживающий эффект на динамику TrH . В терминах системы торговли добавленной стоимостью это означает, что часть добавленной стоимости, которая в традиционной статистике приписывается странам-производителям, в действительности аккумулируется в транспортно-логистическом звене и должна быть корректно отражена при анализе торгового баланса в измерении добавленной стоимости, а не валовой цены.

Тем самым построенные графики и формализованные коэффициенты тесноты связи выполняют двойственную функцию: с одной стороны, они учитывают представление о внутренней структуре транспортных издержек и механизмов формирования наценки; с другой стороны – служат эмпирической основой для последующего анализа торгового дисбаланса в системе торговли добавленной стоимостью и выработки рекомендаций по оптимизации тарифной и логистической политики.

Определение оптимального значения транспортной наценки для различных видов транспорта является важным инструментом обеспечения конкурентоспособности национальной транспортной системы и максимизации вклада транспортной деятельности в валовую добавленную стоимость экономики. Полученные результаты могут быть использованы при разработке транспортной и внешнеэкономической политики, а также в практической деятельности транспортно-логистических предприятий.

Список цитированных источников

1. Торговля добавленной стоимостью (TIVA). – URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/stats/documents/ece/ces/ge.20/2018/mtg3/NatWS/1.2_OECD_long_RU.pdf (дата обращения: 08.03.2026).
2. Измерение внешней торговли в терминах добавленной стоимости, 5–6 декабря 2013, Париж. – URL: <https://globalcentre.hse.ru/newsletter3.4> (дата обращения: 08.03.2026).
3. OECD Data Explorer. – URL: [https://data-explorer.oecd.org/?fs\[0\]=Topic%2C1%7CEconomy%23ECO%23%7CShort-term%20economic%20statistics%23ECO_STS%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=54](https://data-explorer.oecd.org/?fs[0]=Topic%2C1%7CEconomy%23ECO%23%7CShort-term%20economic%20statistics%23ECO_STS%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=54) (date of access: 08.03.2026).
4. Россия выпадает из глобальной цепочки добавленной стоимости. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/2330759> (дата обращения: 10.03.2026).
5. Guide to OECD Trade in Value Added (TIVA) Indicators, 2025 edition. – URL: <https://stats.oecd.org/wbos/fileview2.aspx?IDFile=2143f34e-6feb-41a9-abaf-cb52132608c4> (date of access: 10.03.2026).
6. ВТО опубликовала новые статистические данные по глобальным цепочкам добавленной стоимости. – URL: <https://rsvp.ru/events/news/vto-opublikovala-novye-statisticheskie-dannye-po-globalnym-tsepochkam-dobavlennoy-stoimosti---27188> (дата обращения: 08.03.2026).
7. Koopman, R. Tracing Value-Added and Double Counting in Gross Exports / R. Koopman, Wang Zhi, Wei Shang-Jin // *American Economic Review*. – 2014. – Vol. 104 (2). – P. 459–94. – DOI: 10.1257/aer.104.2.459.
8. Об утверждении Методики по формированию системы таблиц «Затраты – Выпуск»: постановление Национального статистического комитета Республики Беларусь от 24 декабря 2021 г. № 108 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=T22104927r> (дата обращения: 15.10.2023).
9. Кондратьев, В. Б. Отрасли и сектора глобальной экономики: особенности и тенденции развития / В. Б. Кондратьев. – М. : Международные отношения, 2015. – 448 с.
10. Johnson, R. C. Accounting for intermediates: Production sharing and trade in value added / R. C. Johnson, G. Noguera // *Journal of International Economics*, Elsevier. – 2012. – Vol. 86 (2). – P. 224–236. – DOI: 10.1016/j.jinteco.2011.10.003.
11. Trade in value-added. – URL: <https://www.oecd.org/en/topics/sub-issues/trade-in-value-added.html#access> (date of access: 10.03.2026).
12. Рогатных, Е. Глобальные цепочки добавленной стоимости и их влияние на развитие национальной экономики / Е. Рогатных // *Мировое и национальное хозяйство*. – 2016. – № 4 (39). – URL: https://mirec.mgimo.ru/2016/2016-04/globalnyye-tsepochki-dobavlennoy-stoimosti-i-ikh-vliyaniye-na-razvitiye-natsionalnoy-ekonomiki?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (дата обращения: 10.03.2026).
13. Месник, Д. Н. Развитие транспортно-логистической системы в условиях формирования инновационной экономики / Д. Н. Месник. – Минск : БНТУ, 2023. – 284 с.
14. Intermodal transport in the international market. – URL: <https://www.railsider.com/en/intermodal-transport-in-the-international-market> (date of access: 10.03.2026).
15. Intermodal: How Multimodal Freight Movement Strengthens Modern Supply Chains. – URL: <https://www.stgusa.com/news-notice/intermodal> (date of access: 10.03.2026).
16. Beresford, A. K. C. A Critical Review of a Holistic Model Used for Assessing Multimodal Transport Systems / A. K. C. Beresford, R. Banomyong, S. Pettit // *Logistics*. – 2021. – Vol. 5 (1). – DOI: 10.3390/logistics5010011.
17. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. / Национальная комиссия по устойчивому развитию Республики Беларусь; редкол.: Я. М. Александрович [и др.]. – Минск : Юнипак, 2014. – 132 с.
18. Anderson, J. E. Trade Costs / J. E. Anderson, E. van Wincoop // *Journal of Economic Literature*. – 2004. – Vol. 42 (3). – P. 691–751. – DOI: 10.1257/0022051042177649.
19. Деятельность МАРТ. – URL: <https://mart.gov.by/activity/tsenovaya-politika> (дата обращения: 08.03.2026).
20. О применении постановления Совета Министров Республики Беларусь от 19 октября 2022 г. № 713 : письмо Министерства антимонопольного регулирования и торговли Республики Беларусь от 12 апреля 2025 г. № 03-02-11/356K // Padatak.by. – URL: https://padatak.by/articles/taxation_of_enterpruiter/comments/30868 (дата обращения: 08.03.2026).
21. Учетная политика организации в 2026 году // Главный Бухгалтер. – URL: <https://www.gb.by/aktual/ucetnaya-politika-organizacii-v-2026-god> (дата обращения: 10.03.2026).
22. Developing a global transport costs dataset for international trade / O. Hoffmeister, R. Halim, N.-J. Lazarou [et al.]. – Geneva : UNCTAD, 2022. – 58 p. – URL: https://unctad.org/system/files/official-document/serp-2022d5_en.pdf (date of access: 10.03.2026).
23. Хайтбаев, В. А. Оценка влияния транспортно-логистической системы на ресурсосбережение, ключевые региональные экономические показатели и экономическую устойчивость / В. А. Хайтбаев, Е. В. Черняев // *Мир транспорта*. – 2024. – Т. 22, № 2. – С. 102–117. – DOI: 10.30932/1992-3252-2024-22-2-12.
24. Rodrigue, J.-P. Global Logistics Costs by Function and Mode, 2018 / J.-P. Rodrigue // *The Geography of Transport Systems* / J.-P. Rodrigue. – 6th ed. – New York : Routledge, 2024. – Ch. 7 : Trade, logistics, and freight distribution. – 402 p. – DOI: 10.4324/9781003343196.
25. Hummels, D. Transportation Costs and International Trade in the Second Era of Globalization / D. Hummels // *Journal of Economic Perspectives*. – 2007. – Vol. 21 (3). – P. 131–154. – URL: <https://pubs.aeaweb.org/doi/pdfplus/10.1257/jep.21.3.131> (date of access: 10.03.2026).
26. Hummels, D. Transportation Costs and Adjustments to Trade. – URL: <https://business.purdue.edu/faculty/hummels/papers/Transportation%20Costs%20and%20Adjustments%20to%20Trade.pdf> (date of access: 10.03.2026).
27. Бурдин, С. С. Применение корреляционно-регрессионного анализа для оценки влияния экспорта автотранспортных средств на ВВП / С. С. Бурдин, Д. Ю. Ильенко, Н. О. Мелик-Асланова. – URL: <https://www.e-rej.ru/Articles/2019/Buridin.pdf> (дата обращения: 10.03.2026).

28. Ястреб, Т. А. Экспорт транспортных услуг Республики Беларусь: современное состояние и перспективы / Т. А. Ястреб // Актуальные проблемы теории и практики таможенного дела в условиях международной экономической интеграции : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Респ. Беларусь, Минск, 25 марта 2020 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Г. Шадурийский (отв. ред.) [и др.] – Минск : БГУ, 2020. – С. 139–148. – URL: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/249144/1/139-148.pdf> (дата обращения: 10.03.2026).
 29. Как сработала транспортная сфера в Беларуси в 2024 году // Thinktanks. – URL: <https://thinktanks.pro/publication/2025/02/15/kak-srabortala-transportnaya-sfera-v-belarusi-v-2024-godu.html> (дата обращения: 10.03.2026).
 30. Review of Maritime Transport 2023. – URL: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023> (date of access: 10.03.2026).
 31. Staying the course in turbulent waters. – URL: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2025> (date of access: 10.03.2026).
- References**
1. Torgovlya dobavlennoj stoimost'yu (TIVA). – URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/stats/documents/ece/ces/ge.20/2018/mtg3/NatWS/1.2_OECD_long_RU.pdf (data obrashcheniya: 08.03.2026).
 2. Izmerenie vneshnej torgovli v terminah dobavlennoj stoimosti, 5–6 dekabrya 2013, Parizh. – URL: <https://globalcentre.hse.ru/newsletter3.4> (data obrashcheniya: 08.03.2026).
 3. OECD Data Explorer. – URL: [https://data-explorer.oecd.org/?fs\[0\]=Topic%2C1%7CEconomy%23ECO%23%7CShort-term%20economic%20statistics%23ECO_STS%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=54](https://data-explorer.oecd.org/?fs[0]=Topic%2C1%7CEconomy%23ECO%23%7CShort-term%20economic%20statistics%23ECO_STS%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=54) (date of access: 08.03.2026).
 4. Rossiya vypadaet iz global'noj cepochki dobavlennoj stoimosti. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/2330759> (data obrashcheniya: 10.03.2026).
 5. Guide to OECD Trade in Value Added (TIVA) Indicators, 2025 edition. – URL: <https://stats.oecd.org/wbos/fileview2.aspx?IDFile=2143f34e-6feb-41a9-abaf-cb52132608c4> (date of access: 10.03.2026).
 6. VTO opublikovala novye statisticheskie dannye po global'nym cepochkam dobavlennoj stoimosti. – URL: <https://rspb.ru/events/news/vto-opublikovala-novye-statisticheskie-dannye-po-globalnym-tsepochkam-dobavlennoj-stoimosti-27188> (data obrashcheniya: 08.03.2026).
 7. Koopman, R. Tracing Value-Added and Double Counting in Gross Exports / R. Koopman, Wang Zhi, Wei Shang-Jin // American Economic Review. – 2014. – Vol. 104 (2). – P. 459–94. – DOI: 10.1257/aer.104.2.459.
 8. Ob utverzhdenii Metodiki po formirovaniyu sistemy tablic «Zatraty – Vypusk» : postanovlenie Nacional'nogo statisticheskogo komiteta Respubliki Belarus' ot 24 dekabrya 2021 g. № 108 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=T22104927p> (data obrashcheniya: 15.10.2023).
 9. Kondrat'ev, V. B. Otrastli i sektora global'noj ekonomiki: osobennosti i tendencii razvitiya / V. B. Kondrat'ev. – M. : Mezhdunarodnye otnosheniya, 2015. – 448 s.
 10. Johnson, R. C. Accounting for intermediates: Production sharing and trade in value added / R. C. Johnson, G. Noguera // Journal of International Economics, Elsevier. – 2012. – Vol. 86 (2). – P. 224–236. – DOI: 10.1016/j.jinteco.2011.10.003.
 11. Trade in value-added. – URL: <https://www.oecd.org/en/topics/sub-issues/trade-in-value-added.html#access> (date of access: 10.03.2026).
 12. Rogatnyh, E. Global'nye cepochki dobavlennoj stoimosti i ih vliyanie na razvitie nacional'noj ekonomiki / E. Rogatnyh // Mirovoe i nacional'noe hozyajstvo. – 2016. – № 4 (39). – URL: https://mirec.mgimo.ru/2016/2016-04/globalnyye-tsepochk-dobavlennoj-stoimosti-i-ikh-vliyanie-na-razvitiye-natsionalnoy-ekonomiki?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (data obrashcheniya: 10.03.2026).
 13. Mesnik, D. N. Razvitie transportno-logisticheskoy sistemy v usloviyah formirovaniya innovacionnoj ekonomiki / D. N. Mesnik. – Minsk : BNTU, 2023. – 284 s.
 14. Intermodal transport in the international market. – URL: <https://www.railsider.com/en/intermodal-transport-in-the-international-market> (date of access: 10.03.2026).
 15. Intermodal: How Multimodal Freight Movement Strengthens Modern Supply Chains. – URL: <https://www.stgusa.com/news-notice/intermodal> (date of access: 10.03.2026).
 16. Beresford, A. K. C. A Critical Review of a Holistic Model Used for Assessing Multimodal Transport Systems / A. K. C. Beresford, R. Banomyong, S. Pettit // Logistics. – 2021. – Vol. 5 (1). – DOI: 10.3390/logistics5010011.
 17. Nacional'naya strategiya ustojchivogo social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na period do 2030 g. / Nacional'naya komissiya po ustojchivomu razvitiyu Respubliki Belarus' ; redkol.: YA. M. Aleksandrovich [i dr.]. – Minsk : YUnipak, 2014. – 132 s.
 18. Anderson, J. E. Trade Costs / J. E. Anderson, E. van Wincoop // Journal of Economic Literature. – 2004. – Vol. 42 (3). – P. 691–751. – DOI: 10.1257/0022051042177649.
 19. Deyatel'nost' MART. – URL: <https://mart.gov.by/activity/tsenovaya-politika> (data obrashcheniya: 08.03.2026).
 20. O primeneni postanovleniya Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 19 oktyabrya 2022 g. № 713 : pis'mo Ministerstva antimonopol'nogo regulirovaniya i torgovli Respubliki Belarus' ot 12 aprelya 2025 g. № 03-02-11/356K // Padatak.by. – URL: https://padatak.by/articles/taxation_of_enterpruiter/comments/30868 (data obrashcheniya: 08.03.2026).
 21. Uchetnaya politika organizacii v 2026 godu // Glavnyj Buhgalter. – URL: <https://www.gb.by/aktual/ucetnaya-politika-organizacii-v-2026-god> (data obrashcheniya: 10.03.2026).
 22. Developing a global transport costs dataset for international trade / O. Hoffmeister, R. Halim, N.-J. Lazarou [et al.]. – Geneva : UNCTAD, 2022. – 58 p. – URL: https://unctad.org/system/files/official-document/ser-rp-2022d5_en.pdf (date of access: 10.03.2026).
 23. Hajtbaev, V. A. Ocenka vliyaniya transportno-logisticheskoy sistemy na resursosberezhenie, klyuchevye regional'nye ekonomicheskie pokazateli i ekonomicheskuyu ustojchivost' / V. A. Hajtbaev, E. V. CHernyayev // Mir transporta. – 2024. – T. 22, № 2. – S. 102–117. – DOI: 10.30932/1992-3252-2024-22-2-12.
 24. Rodrigue, J.-P. Global Logistics Costs by Function and Mode, 2018 / J.-P. Rodrigue // The Geography of Transport Systems / J.-P. Rodrigue. – 6th ed. – New York : Routledge, 2024. – Ch. 7 : Trade, logistics, and freight distribution. – 402 p. – DOI: 10.4324/9781003343196.
 25. Hummels, D. Transportation Costs and International Trade in the Second Era of Globalization / D. Hummels // Journal of Economic Perspectives. – 2007. – Vol. 21 (3). – P. 131–154. – URL: <https://pubs.aeaweb.org/doi/pdfplus/10.1257/jep.21.3.131> (date of access: 10.03.2026).
 26. Hummels, D. Transportation Costs and Adjustments to Trade. – URL: <https://business.purdue.edu/faculty/hummels/papers/Transportation%20Costs%20and%20Adjustments%20to%20Trade.pdf> (date of access: 10.03.2026).
 27. Burdin, S. S. Primenenie korrelyacionno-regressionnogo analiza dlya ocenki vliyaniya eksporta avtotransportnyh sredstv na VVP / S. S. Burdin, D. YU. Il'enko, N. O. Melik-Aslanova. – URL: <https://www.e-rej.ru/Articles/2019/Burdin.pdf> (data obrashcheniya: 10.03.2026).
 28. Yastrebn, T. A. Eksport transportnyh uslug Respubliki Belarus': sovremennoe sostoyanie i perspektivy / T. A. Yastrebn // Aktual'nye problemy teorii i praktiki tamozhennogo dela v usloviyah mezhdunarodnoj ekonomicheskoy integracii : materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Rесп. Belarus', Minsk, 25 marta 2020 g. / Belorus. gos. un-t ; redkol.: V. G. Shadurskij (otv. red.) [i dr.]. – Minsk : BGU, 2020. – S. 139–148. – URL: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/249144/1/139-148.pdf> (data obrashcheniya: 10.03.2026).
 29. Kak sработала транспортная сфера в Беларуси в 2024 году // Thinktanks. – URL: <https://thinktanks.pro/publication/2025/02/15/kak-srabortala-transportnaya-sfera-v-belarusi-v-2024-godu.html> (data obrashcheniya: 10.03.2026).
 30. Review of Maritime Transport 2023. – URL: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023> (date of access: 10.03.2026).
 31. Staying the course in turbulent waters. – URL: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2025> (date of access: 10.03.2026).

Материал поступил 11.03.2026, одобрен 18.03.2026,
принят к публикации 18.03.2026

ИННОВАЦИИ И КАДРОВАЯ СТРАТЕГИЯ КАК ФАКТОР КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

М. П. Мишкова¹, Э. Э. Ермакова², Е. Н. Щитковец³

¹ К. э. н., доцент, доцент кафедры менеджмента, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: mishkova69@yandex.by

² М. э. н., старший преподаватель кафедры экономической теории и логистики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ermakova.eleopora@gmail.com

³ М. э. н., зав. учебно-метод. кабинетом, ГУО «Центр дополнительного образования детей и молодежи г. Бреста», Брест, Беларусь, e-mail: gaponyuk_elena@mail.ru

Реферат

Статья посвящена актуальной проблеме стратегического управления персоналом как ключевого фактора инновационного развития образовательных организаций в условиях современного быстро меняющегося общества. Авторы подчеркивают, что глобализация и интенсивные преобразования в политической, экономической и культурной сферах предъявляют новые требования к системе образования, в частности, к подготовке конкурентоспособных, социально ответственных и гармонично развитых выпускников. Это требует обновления образовательного контента, модернизации инфраструктуры, повышения квалификации преподавательского состава и внедрения инновационных управленческих технологий.

В статье выделяются ключевые противоречия, сдерживающие инновационный путь развития образования: несоответствие между потребностью в инновациях и готовностью преподавателей к ним, разрыв между необходимостью создания цифровой образовательной среды и ограниченностью ресурсов, а также конфликт между традиционными управленческими практиками и реальными потребностями развития человеческого капитала. Эти вызовы делают стратегическое управление персоналом насущной необходимостью.

Акцентируется внимание на преимуществах стратегического управления персоналом, которое позволяет рационально использовать ограниченные кадровые ресурсы, повышает уверенность сотрудников и менеджеров, способствует последовательной разработке и реализации управленческих решений, а также ориентирует организацию на устойчивое развитие в условиях конкуренции. Отмечается недостаточная методическая разработанность вопросов организации персонала и роли кадровых служб в инновационном управлении. Предлагается теоретическое обоснование подходов к разработке стратегии управления персоналом для образовательных организаций, работающих в инновационном режиме. Выделяются основные проблемные зоны формирования и реализации человеческого ресурса в условиях инноваций. Детально анализируются проявления каждой группы проблемных зон, подчеркивая необходимость комплексного подхода к управлению развитием персонала для обеспечения стабильного инновационного развития учреждений образования.

Статья может быть полезна для специалистов в области инновационных технологий, конкурентоспособности образовательных организаций, а также для всех, кто интересуется этой темой.

Ключевые слова: инновации, кадровая стратегия, конкурентоспособность, образовательная организация, стратегическое управление.

INNOVATION AND HR STRATEGY AS A FACTOR OF COMPETITIVENESS OF AN EDUCATIONAL ORGANIZATION

M. P. Mishkova, E. E. Ermakova, E. N. Shchitkovets

Abstract

This article addresses the pressing issue of strategic human resource management as a key factor in the innovative development of educational organizations in today's rapidly changing society. The authors emphasize that globalization and intensive political, economic, and cultural transformations place new demands on the education system, particularly on the preparation of competitive, socially responsible, and well-rounded graduates. This requires updating educational content, modernizing infrastructure, upgrading the qualifications of faculty, and implementing innovative management technologies.

The article highlights key contradictions hindering the innovative development of education: the discrepancy between the need for innovation and faculty readiness for it, the gap between the need to create a digital educational environment and limited resources, and the conflict between traditional management practices and the real needs of human capital development. These challenges make strategic human resource management an urgent necessity. The article focuses on the advantages of strategic HR management, which enables the rational use of limited human resources, increases employee and manager confidence, promotes the consistent development and implementation of management decisions, and guides the organization toward sustainable development in a competitive environment. It also notes the insufficient methodological development of HR management issues and the role of HR departments in innovation management. A theoretical justification for approaches to developing HR strategies for educational organizations operating in an innovative mode is offered. The main problem areas in the development and implementation of human resources in an innovative environment are identified. The manifestations of each group of problem areas are analyzed in detail, emphasizing the need for an integrated approach to managing HR development to ensure the stable, innovative development of educational institutions.

This article may be useful for specialists in the field of innovative technologies and the competitiveness of educational organizations, as well as for anyone interested in this topic.

Keywords: innovation, HR strategy, competitiveness, educational organization, strategic management.

Введение

Современное общество характеризуется беспрецедентными темпами развития и масштабными преобразованиями в политической, экономической и культурной сферах, напрямую влияющими на систему образования. В условиях глобальной конкуренции необ-

ходимо, чтобы образовательные учреждения обеспечивали конкурентоспособных, социально ответственных, гармонично развитых выпускников. Для этого требуется обновить содержание образования, модернизировать инфраструктуру, подготовить квалифицированных преподавателей и внедрить инновационные технологии

управления. Вместе с тем инновационный путь развития имеет ряд противоречий: между необходимостью внедрения инноваций в преподавание и неподготовленностью преподавателей к инновационной деятельности; между потребностью в создании цифровой образовательной среды и ограниченными ресурсами образовательных организаций; между традиционными практиками управления и реальными потребностями развития человеческого капитала. Эти противоречия сдерживают развитие системы образования и требуют поиска новых стратегических решений.

Цель данной статьи акцентировать внимание на стратегическом управлении персоналом как ключевом элементе инновационного подхода к управлению образовательными организациями.

Влияние инновационной деятельности и кадровой стратегии на конкурентоспособность образовательных организаций

Стремительное развитие нашего общества, а также прогрессирующие изменения в политической, экономической и культурной жизни страны оказывает непосредственное влияние на формирование системы образования. Под влиянием глобальной конкуренции перед различными уровнями системы образования возникает необходимость отвечать на запросы этой конкуренции, поэтому конкурентоспособность системы образования становится ключевым звеном, требующим обновления технологий, интенсивного освоения инноваций, форсированной адаптации к требованиям и запросам стремительно меняющегося мира. Согласно статье 3. Кодекса Республики Беларусь об образовании каждый гражданин Республики Беларусь имеет право на общедоступное образование, бесплатное дошкольное, основное общее и среднее профессиональное. Высшее образование получить, бесплатно можно пройдя конкурсный отбор.

Современные образовательные учреждения должны выпускать конкурентоспособных, гармонично развитых и социально ответственных выпускников. Для достижения этой цели система образования должна обновить содержание образования, модернизировать инфраструктуру, подготовить квалифицированных педагогов, усовершенствовать систему повышения квалификации и найти эффективные механизмы управления. Решение этих задач возможно только при работе образовательных учреждений в инновационном режиме. Реформирование системы образования требует внедрения новых идей и технологий. Инновации являются ключевым элементом развития системы образования и активно обсуждаются в научных сообществах и руководящих кругах.

Инновационный процесс – процесс преобразования научного знания в инновацию, последовательная цепь событий, в ходе которых инновация вызывает от идеи до конкретного продукта, технологии (интеллектуального товара) или услуги и распространяется при практическом использовании.

Инновация – это такое содержание возможных изменений педагогической действительности, которые ведут к ранее неизвестному, ранее не встречавшемуся состоянию, результату, развивающих теории и практику обучения и воспитания. Это состояние может касаться педагогической действительности в целом и отдельных ее составляющих.

Инновационный процесс в образовании – процесс совершенствования образовательной практики, развития образовательных систем на основе нововведений. Часто, случается так, что в погоне за новыми веяниями в образовании мы внедряем новшества, не изучив тщательно материально-технические возможности образовательных учреждений для реализации данных нововведений, внедрение инноваций происходит без учета менталитета и возрастных показателей работников образования.

В связи с этим процесс управления образовательной системой на основе инновационного подхода осложняется рядом противоречий:

- между необходимостью внедрения инновационных методов и технологий обучения, обеспечивающих качество образования и неготовностью педагогов к инновационной деятельности;

- созданием конкурентоспособной цифровой образовательной среды для эффективного управления образованием на основе инновационных подходов и несовершенством экономической и материально-технической базы образовательной организации;

- сложившейся практикой управления школой и объективными потребностями развития инновационной деятельности педагогического коллектива.

Исходя из вышеперечисленных противоречий, совершенно ясно видится проблема исследования: развитие стратегии управления персоналом в организациях системы образования становится требованием современности, но неподготовленность педагогических кадров, консерватизм управленческих подходов, неразработанная нормативно-правовая база, которая позволяла бы эффективно управлять инновационными процессами, несформированность материально-технической базы образовательных организаций в совокупности тормозят развитие образования.

Стратегическое управление персоналом в рамках инновационного подхода к управлению дает большие преимущества организациям системы образования, функционирующих в условиях современного общества. Эти преимущества заключаются в рациональном использовании такого ограниченного ресурса как персонал. Кроме того, стратегический менеджмент рождает чувство уверенности у персонала организаций и их менеджеров, способствует последовательной разработке и реализации управленческих решений, ориентирует на устойчивое развитие в условиях конкуренции.

В научной литературе достаточно широко освещены различные аспекты организации работ при процессном подходе, однако вопросы организации персонала и роли кадровых служб на этом этапе остаются методически не разработанными и освещены лишь на уровне общих рекомендаций. Таким образом, в настоящее время необходимы теоретически обоснованные подходы к созданию методики разработки стратегии управления персоналом организаций системы образования в условиях инновационного управления организацией системы образования.

Главная задача каждой организации системы образования разработка и реализация стратегии длительного инновационного развития обеспечиваемая менеджментом. О важности развития системы образования говорится в Государственной программе «Образование и молодежная политика». Однако данный процесс не может быть реализован без качественной реализации процесса управления.

С целью обеспечения стабильного инновационного развития организации учреждения образования необходимо целенаправленно формировать, развивать и использовать человеческий ресурс учреждения. Исследователи отмечают, что необходимо создание системы управления развитием персонала, делая при этом акцент на том, что в настоящий момент управлением развитием персонала не реализуется комплексно. Управление персоналом в условиях инновационной экономики приобретает решающее значение, которое можно определить, как форму реализации системного подхода к управлению персоналом, основывающуюся на интеграции системы управления организацией и системы управления персоналом, включающую весь комплекс факторов и методов влияния на развитие и поведение персонала. Также возникает необходимость совершенствования управленческих технологий, изменения целей и задач управленческой деятельности, повышения качества управленческих решений, принимаемых по отношению к процессу менеджмента персонала и к формированию кадровой политики в условиях конкурентоспособного учреждения [1, 2].

При этом стоит отметить, что анализ научных источников показал, что в ходе реализации процесса управления человеческим ресурсом проявляются проблемные зоны, среди которых могут быть названы: позиционные/ производственные/ технические/ технологические; экономические; административно-организационные; кадровые; социально-демографические и социально-ментальные.

1. Позиционные/производственные/технические/технологические проблемные зоны в формировании и реализации инновационного ресурса и потенциала персонала выражаются в следующем: отсутствии базы, позволяющей внедрять новации и создавать новые технологии; низкой восприимчивости учреждения к изменениям рынка, отсутствию гибкости в восприятии изменений во внешней среде; отсутствию рационализаторской интенсивности в учреждении (спрос на новаторство порой ниже предложения, что влечет замедление и угасание активности персонала).

2. Экономические проблемные зоны включают: устаревание ресурсной базы (применение устаревшей техники и технологий, использование устаревших методов в управлении персоналом и формировании новаторского поведения, отсутствие материальной базы); отсутствие материальных ресурсов для наукоемкой деятельности учреждения.

3. Административно-организационные проблемные зоны предусматривают: отсутствие готовности менеджмента к управлению новаторами и координации инновационной деятельности; отсутствие полноценного вовлечения новаторов в наукоемкую деятельность организации учреждения образования; неразвитость инфраструктуры, необходимой для производства новаций; разбалансированность системы организации учреждения образования с ориентацией на развитие одного из направлений (например, акцент только на работу с кадровым резервом при низком уровне результативной базы и материальных ресурсов); неготовность руководителя (менеджера) к изменению стиля управления и отсутствие видения в сотрудниках носителей инноваций, приравнивание персонала к фактору результата.

4. Кадровые проблемные зоны включают: нехватку квалифицированных кадров, готовых к инновированию и созданию новых технологий, к их реализации как внутри организации учреждения образования, так и на рынке; недостаточно развитую систему поиска и поддержки новаторов; ограниченность возможностей материального поощрения за новаторскую деятельность; ограниченные возможности творческого развития и самореализации в коллективе, системы адаптации персонала к нововведениям; отсутствие выстроенной системы удержания новаторов; отсутствие системы развития инновационного ресурса и потенциала персонала при фактическом присутствии последнего; неспособность выращивать новаторов и раскрывать скрытые способности персонала; отсутствие опережающей подготовки и переподготовки кадров – профессионалов в области инноватики и производства технологий; отсутствие методик оценки эффективности процесса развития инновационного ресурса и потенциала персонала.

5. Социально-демографические проблемные зоны, представлены: старением персонала ключевых подразделений; низким уровнем подготовки и готовности к инновационной деятельности выпускников учебных заведений.

6. Социально-ментальные проблемные зоны включают: нежелание показывать свои способности в силу отсутствия материальной заинтересованности, страха перед возможными ошибками, ожидаемой реакции коллег на «выделение» из массы; отсутствие внутренней потребности в инновационной деятельности, заложенной в мыслительные процессы, у сотрудников и выпускников вузов; отсутствие инновационного климата и инновационно-ориентированной организационной культуры [3–6].

Последствиями обозначенных проблемных зон может служить отсутствие:

- заинтересованности и готовности учреждения к продуцированию новаций – угасание новаторской активности персонала;
- ресурсов для поддержания новаторской активности и заинтересованности персонала в продуцировании новаций – угасание новаторской активности персонала – угасание способности организации системы образования к инновационной деятельности;
- готовности управленческой системы к поддержанию и развитию инновационного ресурса и потенциала персонала – угасание новаторской активности персонала – угасание способности организации системы образования к наукоемкой деятельности;
- человеческих ресурсов и потенциала для новаторской деятельности учреждения в текущем и будущем периодах – угасание способности организации системы образования к наукоемкой деятельности;
- потенциала для высокого уровня деятельности в будущем периоде – угасание способности организации системы образования к новаторской деятельности;
- возможности реализации и развития инновационного ресурса и потенциала персонала в интересах будущего периода – угасание способности организации системы образования к наукоемкой деятельности.

Наличие данных проблемных зон свидетельствует о сбоях как в системе менеджмента организации системы образования, так и в управлении развитием персонала в самом учреждении. Формирование и развитие менеджмента организации – важная задача, и сбои могут быть вызваны несоответствием уровня развития менеджмента, его способностей и готовности к инновациям требованиям в конкурентоспособной среде.

Проблемой является недостаточное осознание важности изменения устоявшихся стереотипов, норм и правил поведения, особенно среди руководства организаций систем образования. Замедление в принятии наукоемких подходов руководителями (менеджерами) нередко приводит к кризису учреждений. Это явление исследователи называют «тормозом культурных традиций».

Одним из серьезных препятствий для успешного развития системы образования является неготовность, в первую очередь, руководящего звена, к пересмотру устаревших стереотипов, норм и правил. Такое консервативное мышление руководителя (менеджера), неспособное адаптироваться к современным наукоемким моделям, часто приводит к кризисным ситуациям в учреждениях, что и получило определение «тормоза культурных традиций». Следовательно, для обеспечения эффективной работы и дальнейшего прогресса образовательной организации, необходимо не только наличие современной системы управления и высококвалифицированного персонала, но и, что не менее важно, открытость руководства к преодолению устоявшихся стереотипов и быстрая адаптация к постоянно меняющимся требованиям инновационной среды.

Создание и развитие инновационного потенциала персонала – сложная задача, обусловленная множеством влияющих факторов. Этот процесс требует тщательного и взвешенного подхода к управлению. Необходимо находить решения, способные ослабить негативное воздействие одних факторов и усилить положительное влияние других. Только так можно добиться повышения эффективности развития и использования инновационного ресурса персонала.

Профессиональная деятельность в инновационной среде становится все более сложной и динамичной, что обусловлено уникальным характером задач, трудностями в стандартизации решений и высоким уровнем неопределенности. Сотрудники, занятые в этой сфере, вынуждены принимать на себя риски, постоянно проводить проверки и эксперименты, а также искать нестандартные решения. Выделяются специфические черты наукоемких и конкурентоспособных организаций системы образования, что подчеркивает важность адаптации профессиональных навыков к реалиям инновационного процесса: высокая неопределенность выполнения научных процессов с заданными или ожидаемыми результатами, что ведет к необходимости принятия решения в условиях риска; высокая интенсивность результата [7], непрерывный рост новых идей; высокая значимость интеллектуальных проектов, которые впоследствии воплощаются в результат.

Ключевым элементом успешного инновационного развития образовательных организаций является наличие инновационно-ориентированного персонала. Эти сотрудники должны быть активными, вовлеченными в инновации, способными реализовать свой потенциал индивидуально и в команде, что и будет способствовать долгосрочному развитию учреждения.

Важнейшим условием процветания образовательного учреждения, ориентированного на активную деятельность, является присутствие в штате инноваторов. Эти сотрудники должны быть способны генерировать новые идеи, активно участвовать в разработке новых методик, уметь работать в условиях неопределенности и идти на риск. Они также должны обеспечивать высокую результативность и эффективно общаться с коллегами.

Иными словами, успех в инновационном развитии образовательной организации напрямую зависит от наличия и активной деятельности персонала, обладающего инновационным мышлением, способностью к генерации и реализации новых идей, а также умением работать в команде и эффективно взаимодействовать [7, 8].

Вследствие определенных характеристик организации в сфере образования стремятся к сотрудничеству с высококвалифицированными и инновационными специалистами. Этот процесс может реализовываться двумя способами: либо путем привлечения извне

персонала, соответствующего требованиям учреждения, и последующей адаптации к существующей рабочей среде, либо путем развития новаторского мышления у уже работающих сотрудников. Второй вариант требует комплексного подхода и создания особой атмосферы, позволяющей раскрыть скрытый потенциал персонала.

Ряд ученых определяют инновативность персонала как ключевую характеристику в образовательных учреждениях, проявляющуюся в восприимчивости к нововведениям, готовности к их внедрению и способности к новаторству. Это включает в себя оперативное освоение научно-технических достижений, прогнозирование перспективных направлений науки и техники, а также гибкую адаптацию к изменениям внешней среды. Важным аспектом является готовность персонала к эффективному внедрению нововведений и созда-

нию благоприятных социально-экономических условий для их реализации с точки зрения человеческих ресурсов. В контексте образовательной системы человеческий ресурс рассматривается двояко: как инновационный ресурс персонала, то есть его способность генерировать и внедрять новшества, и как инновационный потенциал персонала, представляющий собой совокупность возможностей для развития и реализации инноваций представлено в таблице 1.

Таким образом, ряд исследователей придерживаются точки зрения, что инновационный потенциал персонала является частью инновационного ресурса организации системы образования, тогда как другая часть исследователей считает, что инновационный ресурс персонала выступает частью инновационного потенциала персонала.

Таблица 1 – Аспекты человеческого ресурса, представленного в учреждениях системы образования [8, 9, 10, 11]

Определение	Инновационный ресурс персонала	Инновационный потенциал персонала
	Человеческий ресурс (вовлеченный или осознанный и планируемый к вовлечению), представляющий собой совокупность качеств и характеристик персонала, которая характеризует его способность к новаторской деятельности Представлен наличием персонала, задействованного в инновационной, конкурентоспособной деятельности (в определенном количестве и качестве), скоростью включения персонала в новаторские, наукоемкие проекты, уровнем подготовки сотрудников, включающим наличие сформированных ключевых и динамических компетенций, определенных исходя из цели конкурентоспособной деятельности организации и пр., т.е. представляет собой ту емкость ресурса, которая может быть востребована в силу ее сформированности и готовности к реализации в ситуации «сегодняшнего дня». Л. Е. Никифорова отмечает, что инновационный ресурс персонала в индивидуальном и групповом проявлении – само по себе уникальное явление, характерное для конкретной организации, текущей ситуации, в конкретный промежуток времени	Человеческий ресурс, представляющий собой скрытые нереализованные способности персонала (в целом и отдельно взятого сотрудника), которые могут быть реализованы при создании определенных условий (предоставлении возможностей к их реализации) и готовности персонала к реализации собственного потенциала и развитию собственных способностей Представляет собой совокупность свойств, возможностей, запасов ресурсов отдельного индивида, коллектива для осуществления инновационной, деятельности, которые реализуются или могут быть реализованы в условиях достигнутого уровня развития и управления организацией. Н. Р. Хадасевич отмечает, что инновационный потенциал персонала определяется: отношением персонала к предстоящим и происходящим изменениям; отношением менеджмента к инновациям и способностями менеджмента к работе в изменяющихся условиях; состоянием процессов демократизации управления и информационного обеспечения инноваций; уровнем профессиональной и экономической подготовки персонала; состоянием социально-психологического климата трудового коллектива; степенью удовлетворенности новыми условиями, содержанием и оплатой труда – при этом исследователи акцентируют внимание на многогранности процесса. Е. В. Гасенко и О. Е. Подвержных отмечают, что такие знания, умения и навыки определяют меру готовности персонала к восприятию, внедрению и продуцированию инноваций, обеспечивающих эффективное функционирование организации в условиях инновационной деятельности.

В рамках исследуемой проблематики изолированное представление данных двух аспектов, характеризующих персонал, необходимый для эффективного функционирования, организации системы образования, ограничивает возможности его развития. В связи с этим в рамках данной статьи возникает предложение объединить инновационный ресурс и инновационный потенциал персонала в единое понятие – инновационный массив персонала, так как оба эти понятия составляют множество однородных по своей сути элементов, характеризующихся важностью проявления в процессе инновационной деятельности организации системы образования, как представлено на рисунке 1.

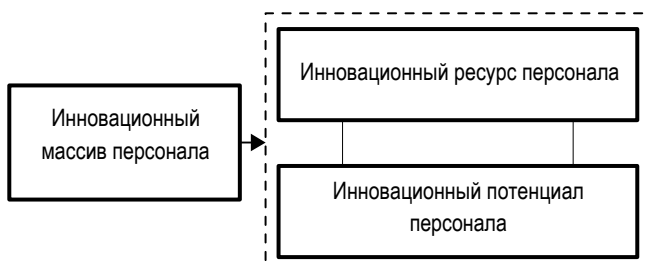


Рисунок 1 – Наполнение инновационного массива персонала [12–16]

Однородность проявляется:

– в отношении представленных аспектов к инновационным характеристикам, важным для развития инновационного потенциала организации системы образования;

– в том, что данные аспекты представляют человеческий ресурс инновационно-ориентированного учреждения системы образования;

– в важности и необратимости выявления, реализации и развития как совокупности качеств и характеристик персонала, определяющих его способность к новаторской деятельности, выявленных и используемых в текущий момент времени, так и скрытых (латентных) характеристик человеческого ресурса: инновационный ресурс персонала обречен без выявления его инновационного потенциала, выявление инновационного потенциала не имеет смысла без определения и развития инновационного ресурса персонала.

В своем развитии оба аспекта дополняют друг друга и делают целостным и обогащенным человеческий фактор, используемый в инновационной деятельности учреждения системы образования.

Инновационный массив персонала в рамках функционирования, организации системы образования должен быть объектом стратегического, тактического и оперативного управления, обеспечивающим способность, готовность и возможность для проявления персоналом новаторского поведения. При этом ИМП (инновационный массив персонала), состоящий из двух аспектов, в период достижения цели своего функционирования подлежит преобразованию, базовыми компонентами которого являются: наличие способности и готовности персонала к новаторской деятельности, а также наличие возможности для проявления новаторского трудового поведения представлено на рисунке 2.

В таблице 2 названные компоненты процесса преобразования ИМП отличны по своему наполнению и могут проявляться в зависимости от создаваемых условий. ИМП является элементом системы, обеспечивающим формирование динамических способностей организации системы образования.

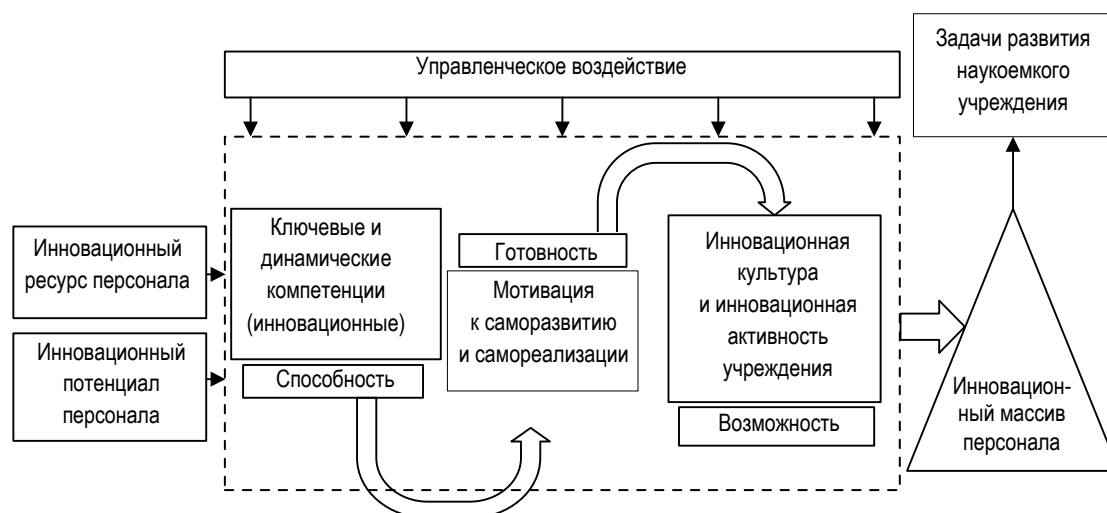


Рисунок 2 – Процесс преобразования инновационного массива персонала [17–20]

Таблица 2 – Условия проявления компонентов процесса преобразования ИМП

Инновационный ресурс персонала проявляется когда:	Инновационный потенциал персонала проявляется когда:
$C \geq 1; \Gamma \geq 1; B \geq 1$	$C \leq 1; \Gamma = 1; B \geq 1$
Инновационный ресурс персонала выявляется в ходе его практической реализации, при C и $\Gamma \geq 1$	Инновационный потенциал персонала выявляется в процессе оценки, развития и в практической деятельности при создании определенных условий, при $C \leq 1; \Gamma = 1$
Примечание – C – способность; Γ – готовность; B – возможность.	

Под динамическими способностями организации системы образования исследователи понимают потенциал учреждения в интегрировании, создании и реконфигурации внутренних и внешних компетенций для соответствия быстро изменяющейся среде. Динамические способности позволяют сгенерировать обновление ключевых компетенций организации системы образования согласно изменениям внешней среды и создают импульс, обеспечивающий исключительный рост, что определяет их ведущую роль в устойчивости конкурентных преимуществ учреждения и формировании ее глобальной стратегии. Они имеют «сложную» природу, представляют высший уровень развития способностей организации системы образования, выдвигают требования к наличию специального механизма, обеспечивающего быструю реакцию на изменения во внешней среде. Мы солидарны с исследователями, которые считают, что именно низкие динамические способности, т. е. неспособность организации системы образования адаптироваться к изменениям – одна из наиболее существенных причин слабой конкурентной позиции отечественных учреждений [8, 9, 10, 11].

Формирование динамических способностей организации системы образования посредством формирования и развития ИМП – одна из важных функциональных задач конкурентоспособного учреждения.

При сравнении уровней способностей, которые развиваются у сотрудников образовательной организации при внедрении новых педагогических технологий, были определены критерии, определяющие работу и развитие системы развития персонала. Эта система является важным инструментом для развития инновационно-ориентированной организации в сфере образования. Иными словами, анализ показал, что успешное внедрение современных методик обучения способствует росту профессиональных навыков сотрудников, и этот рост, в свою очередь, опирается на эффективно функционирующую систему повышения квалификации и развития кадров.

Заключение

Результаты исследования демонстрируют, что современная система образования сталкивается с многоплановой задачей: обеспечить инновационное развитие, реформировать подходы к управлению и создать новый тип человеческих ресурсов.

Как отмечается в статье, «конкурентоспособность системы образования становится ключевым звеном, требующим обновления технологий, интенсивного освоения инноваций, форсированной

адаптации к требованиям и запросам стремительно меняющегося мира». Это подчёркивает неизбежность перехода образовательных организаций к инновационным моделям функционирования.

Выявленные проблемные зоны – от кадровых и экономических до социально-ментальных – демонстрируют, что препятствия к инновационному развитию носят системный характер. Особенно значимым является «тормоз культурных традиций», выражающийся в консерватизме управленческих подходов и недостаточной готовности руководителей к изменениям. Это делает очевидной необходимость формирования инновационно-ориентированного менеджмента, способного гибко реагировать на вызовы внешней среды.

Ключевым ресурсом инновационного развития выступает персонал. Его инновационный потенциал и инновационный ресурс должны рассматриваться не изолированно, а как единый инновационный массив персонала, обеспечивающий способность организации к устойчивому развитию, адаптации и созданию новых образовательных практик. Формирование такого массива становится стратегической задачей, определяющей конкурентоспособность учреждения.

Таким образом, успешное развитие системы образования возможно лишь при комплексном подходе к управлению персоналом, модернизации инфраструктуры, созданию инновационного климата и повышению динамических способностей организации. Только сочетание этих факторов позволит образовательным учреждениям эффективно функционировать в условиях глобальной конкуренции и обеспечивать подготовку специалистов, соответствующих требованиям современного общества.

Список цитированных источников

1. Мишкова, М. П. Проблемы развития информационных технологий на современном экономическом этапе / М. П. Мишкова // Инновации: от теории к практике : сб. науч. статей IX Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 19–20 окт. 2023 г. : в 2 ч. / Брест. гос. техн. ун-т. – Брест, 2023. – Ч. 2. – С. 44–48.
2. Информационное общество в Республике Беларусь // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/719/7199f71a6c5b80265d51141c9bbeaf39.pdf> (дата обращения: 26.05.2025).
3. Индикаторы цифровой экономики: 2024 : статистический сборник / Г. И. Абдрахманова, С. А. Васильковский, К. О. Вишневский [и др.] ; Высшая школа экономики. – М. : НИУ ВШЭ, 2023. – 332 с.

4. Цифровая экономика: 2024 : краткий статистический сборник / Г. И. Абдрахманова, А. Васильковский, К. О. Вишнеvский [и др.] ; Высшая школа экономики. – М. : НИУ ВШЭ, 2023. – 120 с.
5. О национальных статистических показателях развития цифровой экономики в Республике Беларусь // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H11200425> (дата обращения: 26.03.2026).
6. Мишкова, М. П. Управление и цифровая трансформация экономики / М. П. Мишкова // Управление персоналом: реалии настоящего и возможности будущего : материалы III Всеросс. науч.-практ. конф., Донецк, 21 марта 2024 г. – Донецк : ДОНИЖТ, 2024. – С. 508–512.
7. Мишкова, М. П. Развитие информационных экономических технологий на современном этапе / М. П. Мишкова // Вестн. Брест. гос. ун-та. имя А. С. Пушкина. Сер. 2. Гист. Екан. Права. – 2024. – № 2. – С. 53–61.
8. Наумик, И. А. Методы управления персоналом в организации / И. А. Наумик, М. П. Мишкова // Направления повышения эффективности управленческой деятельности органов государственной власти и местного самоуправления : сборник тезисов VI Междунар. науч.-практ. конф., Алчевск, 26 января 2024 г. – Алчевск : ДонГТУ, 2024. – С. 260–263.
9. Мишкова, М. П. Инновационная деятельность в Республике Беларусь: инструменты государственной поддержки и перспективы цифровой трансформации / М. П. Мишкова // Инновации: от теории к практике : сб. науч. ст. X Межд. науч.-практ. конф., Брест, 30–31 октября 2025 г. : в 3 ч. / Брест. гос. техн. ун-т. – Брест, 2025. – Ч. 2. – С. 135–142.
10. Киселева, Л. А. Инновация как цель научных исследований и объект правового регулирования / Л. А. Киселева // Право в современном белорусском обществе : сб. науч. тр. / Нац. центр законодательства и правовых исслед. Респ. Беларусь, Ин-т правовых исслед. – Минск, 2025. – Вып. 20. – С. 70–79.
11. Грабцевич, З. М. Истоки формирования экономического роста в Республике Беларусь: инновационность и цифровизация / З. М. Грабцевич // Проблемы современной экономики: глобальный, национальный и региональный контекст : сб. науч. ст. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: М. Е. Карпичкая (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2025. – С. 40–45.
12. Иванов, А. В. Цифровая трансформация образования: вызовы и возможности / А. В. Иванов, С. Н. Петрова // Вопросы образования. – 2024. – № 3. – С. 15–28.
13. Сидоров, П. К. Управление инновационными проектами в вузе: опыт российских университетов / П. К. Сидоров // Высшее образование в России. – 2023. – № 10. – С. 45–53.
14. Белоусова, Е. Н. Перспективы развития человеческого капитала в условиях цифровой экономики / Е. Н. Белоусова // Экономика и управление. – 2024. – № 2. – С. 66–72.
15. Григорьев, В. В. Инновации в системе повышения квалификации педагогических кадров / В. В. Григорьев. – М. : Педагогика, 2023. – 180 с.
16. Лукьянова, О. В. Цифровая образовательная среда как фактор развития компетенций студентов / О. В. Лукьянова // Современное образование. – 2024. – № 4. – С. 89–97.
17. Смирнов, Д. А. Государственная политика в области инновационного развития: российский и зарубежный опыт / Д. А. Смирнов // Управление. – 2023. – № 1. – С. 105–115.
18. Волкова, Т. Н. Формирование инновационной культуры в образовательной организации / Т. Н. Волкова // Педагогика. – 2024. – № 5. – С. 18–25.
19. Прохоров, В. Е. Инновационный менеджмент в вузе: теория и практика / В. Е. Прохоров. – СПб. : Питер, 2023. – 256 с.
20. Федорова, М. А. Развитие цифровых навыков у преподавателей высшей школы / М. А. Федорова // Вестник Московского университета. Серия 20: Педагогическое образование. – 2024. – № 1. – С. 78–86.
21. Козлов, А. И. Региональные аспекты цифровой трансформации экономики / А. И. Козлов // Экономические науки. – 2023. – № 9. – С. 33–40.
22. Informacionnoe obshchestvo v Respublike Belarus' // Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – URL: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/719/7199f71a6c5b80265d51141c9bbeaf39.pdf> (data obrashcheniya: 26.05.2025).
23. Indikatory cifrovoj ekonomiki: 2024 : statisticheskij sbornik / G. I. Abdrahmanova, S. A. Vasil'kovskij, K. O. Vishnevskij [i dr.] ; Vysshaya shkola ekonomiki. – M. : NIU VSHE, 2023. – 332 s.
24. Cifrovaya ekonomika: 2024 : kratkij statisticheskij sbornik / G. I. Abdrahmanova, A. Vasil'kovskij, K. O. Vishnevskij [i dr.] ; Vysshaya shkola ekonomiki. – M. : NIU VSHE, 2023. – 120 s.
25. O nacional'nyh statisticheskikh pokazatelyah razvitiya cifrovoj ekonomiki v Respublike Belarus' // Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H11200425> (data obrashcheniya: 26.03.2026).
26. Mishkova, M. P. Upravlenie i cifrovaya transformaciya ekonomiki / M. P. Mishkova // Upravlenie personalom: realii nastoyashchego i vozmozhnosti budushchego : materialy III Vseross. nauch.-prakt. konf., Doneck, 21 marta 2024 g. – Doneck : DONIZHT, 2024. – S. 508–512.
27. Mishkova, M. P. Razvitiye informacionnyh ekonomicheskikh tekhnologij na sovremennom etape / M. P. Mishkova // Vestn. Brest. gos. un-ta. imya A. S. Pushkina. Ser. 2. Gist. Ekan. Prava. – 2024. – № 2. – S. 53–61.
28. Naumik, I. A. Metody upravleniya personalom v organizacii / I. A. Naumik, M. P. Mishkova // Napravleniya povysheniya effektivnosti upravlencheskoj deyatel'nosti organov gosudarstvennoj vlasti i mestnogo samoupravleniya : sbornik tezisov VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Alchevsk, 26 yanvarya 2024 g. – Alchevsk : DonGTU, 2024. – S. 260–263.
29. Mishkova, M. P. Innovacionnaya deyatel'nost' v Respublike Belarus': instrumenty gosudarstvennoj podderzhki i perspektivy cifrovoj transformacii / M. P. Mishkova // Innovacii: ot teorii k praktike : sb. nauch. st. X Mezhd. nauch.-prakt. konf., Brest, 30–31 oktyabrya 2025 g. : v 3 ch. / Brest. gos. tekhn. un-t. – Brest, 2025. – CH. 2. – S. 135–142.
30. Kiseleva, L. A. Innovaciya kak cel' nauchnyh issledovaniy i ob'ekt pravoogo regulirovaniya / L. A. Kiseleva // Pravo v sovremennom belorusskom obshchestve : sb. nauch. tr. / Nac. centr zakonodatel'stva i pravovyh issled. Resp. Belarus', In-t pravovyh issled. – Minsk, 2025. – Vyp. 20. – S. 70–79.
31. Grabcevic, Z. M. Istoki formirovaniya ekonomicheskogo rosta v Respublike Belarus': innovacionnost' i cifrovizaciya / Z. M. Grabcevic // Problemy sovremennoj ekonomiki: global'nyj, nacional'nyj i regional'nyj kontekst : sb. nauch. st. / Grodn. gos. un-t ; redkol.: M. E. Karpickaya (gl. red.) [i dr.]. – Grodno, 2025. – S. 40–45.
32. Ivanov, A. V. Cifrovaya transformaciya obrazovaniya: vyzovy i vozmozhnosti / A. V. Ivanov, S. N. Petrova // Voprosy obrazovaniya. – 2024. – № 3. – S. 15–28.
33. Sidorov, P. K. Upravlenie innovacionnymi proektami v vuze: opyt rossijskikh universitetov / P. K. Sidorov // Vyshee obrazovanie v Rossii. – 2023. – № 10. – S. 45–53.
34. Belousova, E. N. Perspektivy razvitiya chelovecheskogo kapitala v usloviyah cifrovoj ekonomiki / E. N. Belousova // Ekonomika i upravlenie. – 2024. – № 2. – S. 66–72.
35. Grigor'ev, V. V. Innovacii v sisteme povysheniya kvalifikacii pedagogicheskikh kadrov / V. V. Grigor'ev. – M. : Pedagogika, 2023. – 180 s.
36. Luk'yanova, O. V. Cifrovaya obrazovatel'naya sreda kak faktor razvitiya kompetencij studentov / O. V. Luk'yanova // Sovremennoe obrazovanie. – 2024. – № 4. – S. 89–97.
37. Smirnov, D. A. Gosudarstvennaya politika v oblasti innovacionnogo razvitiya: rossijskij i zarubezhnyj opyt / D. A. Smirnov // Upravlenie. – 2023. – № 1. – S. 105–115.
38. Volkova, T. N. Formirovanie innovacionnoj kul'tury v obrazovatel'noj organizacii / T. N. Volkova // Pedagogika. – 2024. – № 5. – S. 18–25.
39. Prohorov, V. E. Innovacionnyj menedzhment v vuze: teoriya i praktika / V. E. Prohorov. – SPb. : Piter, 2023. – 256 s.
40. Fedorova, M. A. Razvitiye cifrovnyh navykov u prepodavatelej vysshej shkoly / M. A. Fedorova // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 20: Pedagogicheskoe obrazovanie. – 2024. – № 1. – S. 78–86.
41. Kozlov, A. I. Regional'nye aspekty cifrovoj transformacii ekonomiki / A. I. Kozlov // Ekonomicheskie nauki. – 2023. – № 9. – S. 33–40.

References

1. Mishkova, M. P. Problemy razvitiya informacionnyh tekhnologij na sovremennom ekonomicheskom etape / M. P. Mishkova // Innovacii: ot teorii k praktike : sb. nauch. statej IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 19–20 okt. 2023 g. : v 2 ch. / Brest. gos. tekhn. un-t. – Brest, 2023. – CH. 2. – S. 44–48.

Материал поступил 24.04.2026, одобрен 01.06.2026, принят к публикации 01.06.2026

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАМАНГАНСКОЙ ОБЛАСТИ

А. Р. Нормирзаев

*К. т. н., доцент, доцент кафедры логистики, Наманганский государственный технический университет, Наманган, Узбекистан,
e-mail: nabducaum@mail.ru*

Реферат

В статье рассматривается вопрос роли транспортно-логистической системы Ферганской долины и ее развитие в экономике страны, направления совершенствования транспортных и инновационных решений для увеличения экспорно-импорного потенциала региона в логистическом бизнесе. Дан анализ внешнеторгового оборота международных перевозок грузов и стимулов для увеличения объема транспортно-логистических услуг с учетом региональной особенности Ферганской долины. Показаны основные проблемы в достижении технического перевооружения и модернизации транспортного комплекса в целом. Рассмотрены перспективы развития до 2030 года. Развитие транспортно-логистического сектора в этих областях связано с реализацией мега-проектов и цифровой трансформацией, получением высокой экономической эффективности и безопасности обеспечения доступности транспортных услуг, гарантирующей социальную стабильность, развитием межрегиональных связей и национального рынка труда, а также бесперебойным характером предоставления транспортных услуг. Транспортно-логистическая сфера Узбекистана активно развивается с учетом создания сети «Сухих портов» и ТЛЦ крупных логистических хабов в Папе (Наманган) и Ахсикенте, которые будут обслуживать возросший поток товаров. Регион стремится стать транзитным хабом, привлекая международных игроков, но местные компании пока отстают от мировых стандартов, что приводит к предпочтению иностранных логистических операторов. Состояние транспортно-логистической системы Республики Узбекистан находится в фазе цифровой трансформации и инфраструктурного расширения.

Развитие транспортного комплекса страны осуществляется в направлении транспортной безопасности и внедрения цифровых логистических систем, стимулирования национальных транспортных операторов, способных наладить эффективное взаимодействие между мультимодальными перевозками, а также оказывать услуги 3PL и выше, и дает толчок развитию отрасли. Автором предложена авторская модель IMR-TLS-NAM (Integrated Multimodal Regional Transport-Logistics System – Namangan), которая базируется на принципах динамического программирования, мультимодальности и прогностической аналитики. Ее ключевое отличие – интеграция в единый расчетный контур не только прямых и косвенных затрат, но и проактивного управления рисками с учетом региональной специфики. Модель нацелена на минимизацию обобщенных логистических издержек при обеспечении устойчивости системы к внешним шокам, создание благоприятных условий для национальных транспортно-логистических организаций в формировании рынка транспортно-логистических услуг. Устранение проблемы «бутылочного горлышка» достигается за счет применения разработанной модели, в которой приведенные параметры используются как главные ограничения при динамическом программировании маршрутов. На примере порога загрузки узла «Пап» (35 тыс. т/сутки) или перевала «Камчик» система автоматически предлагает альтернативные временные схемы (консолидация грузов на складах в Намангане до снижения нагрузки либо перенаправление потоков через Учкурган в Кыргызстан в обход Камчика по маршруту Наманган – Учкурган – (КР) – Талас – (КЗ) и далее).

Ключевые слова: логистика, программирование маршрутов, развитие, транспорт, экономика, интегрирование, дороги, регионы, транзит, перевозка, услуга, цифровизация, система, «бутылочное горлышко».

DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM OF NAMANGAN REGION

A. P. Normirzaev

Abstract

The article examines the role of the transport-logistic system of the Fergana region and its development in the country's economy. Directions for improving transport and innovative solutions to increase the export and import potential of the region in the logistics business. The analysis of the foreign trade turnover of international cargo transportation and incentives for increasing the volume of transport and logistics services, taking into account the regional features of the Fergana Valley, are given. The main types of the problem of achieving technical re-equipment and modernization of the transport complex as a whole. Prospects for development until 2030, the development of the transport and logistics sector in these areas is associated with the implementation of mega-projects and digital transformation of obtaining high economic efficiency and security in ensuring the availability of transport services, guaranteeing social stability, the development of interregional ties and the national labor market, as well as the uninterrupted nature of the provision of transport services. The transport and logistics sector of Uzbekistan is actively developing taking into account and creating a network of "Dry Ports" and TLCs of large logistics hubs in Pap (Namangan) and Akhsikent, which will serve the increased flow of goods, the region seeks to become a transit hub, attracting international players, but local companies are still lagging behind world standards, which leads to the preference of foreign logistics operators. The state of the transport and logistics system of the Republic of Uzbekistan is in the phase of digital transformation and infrastructure expansion.

The development of the country's transport complex is carried out in the direction of transport security and the introduction of digital logistics systems, stimulating national transport operators capable of establishing effective interaction between multimodal transportation, as well as providing 3PL services and higher, gives impetus to the development of the industry. The author proposes the author's model IMR-TLS-NAM (Integrated Multimodal Regional Transport-Logistics System – Namangan) based on the principles of dynamic programming, multimodality and predictive analytics. Its key difference is the integration into a single calculation loop not only of direct and indirect costs, but also of proactive risk management, taking into account regional specifics. The model is aimed at minimizing generalized logistics costs while ensuring the system's resilience to external shocks. Creation of favorable conditions for national transport and logistics organizations in the formation of the market of transport and logistics services. The model for solving the problem of the "bottleneck" can be solved by the author's model using the above parameters as the main limitation in dynamic route programming. Using the example of the loading threshold of the Pap node (35 thousand tons per day) or the Kamchik pass, the system automatically offers alternative temporary schemes (consolidation of goods in warehouses in Namangan until the load is reduced, or redirection of flows through Uchkurgan to Kyrgyzstan bypassing Kamchik along the route Namangan – Uchkurgan – (KR) – Talas – (KZ) and further).

Keywords: logistics, route programming, development, transport, economy, integration, roads, regions, transit, transportation, service, digitalization, system, bottleneck.

Введение

Транспортно-логистическая отрасль и транспортная инфраструктура играют важную роль в экономике Узбекистана. Проведение открытой экономической политики требует выхода на новые рынки. Узбекистан стремится диверсифицировать свой экспортный потенциал. Помимо традиционных рынков, таких как Центральная Азия и Россия, страна увеличивает поставки в Китай, страны Европы и Турцию. На рисунках 1, 2, 3 показаны доли торговых партнеров страны в общем объеме экспорта и импорта и внешнеторговый оборот Республики Узбекистан. Общий объем ВТО – 66,5 млрд долл., рост – 21,5 % в сравнении с 2024 годом [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Экспорт составляет 29,0 млрд (прирост к январю – октябрю 2024 года – на 27,8 %), импорт – 37,5 млрд (рост 16,9 %), отрицательное сальдо – 8,53 млрд. Республика Узбекистан осуществляет торговые отношения с 210 странами мира. Основные торговые партнеры по ВТО : наибольший объем внешнеторгового оборота зафиксирован с Китаем – около 19,7 %; на первом месте – Россия – 15,9 %; Казахстан – 5,9 %; Турция – 3,7 %; Корея – 2,2 %. Основные партнеры по экспорту товаров и услуг: лидирует тоже Россия – 12,6 %, Китай – 5,6 %, Казахстан – 4,1 %, Афганистан – 4,1 % – набирает обороты; Турция – 3,2 %; Франция – 2,7 %; ОАЭ – 2,1 %; Кыргызстан – 1,7 %; Таджикистан – 1,6 %; Пакистан – 1,1 %. Их суммарная доля составляет 38,8 % (рисунок 1) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

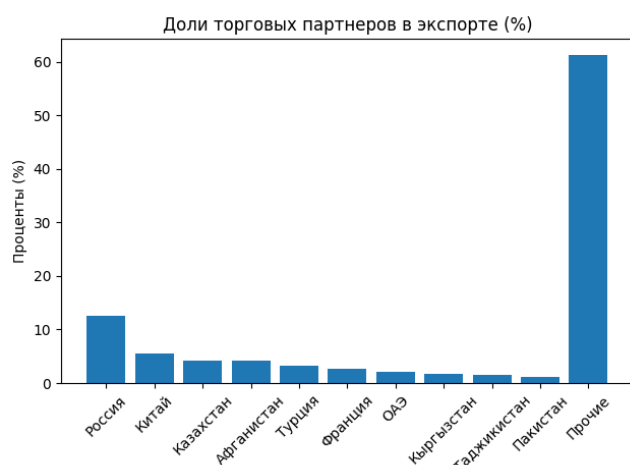


Рисунок 1 – Доля торговых партнёров в экспорте

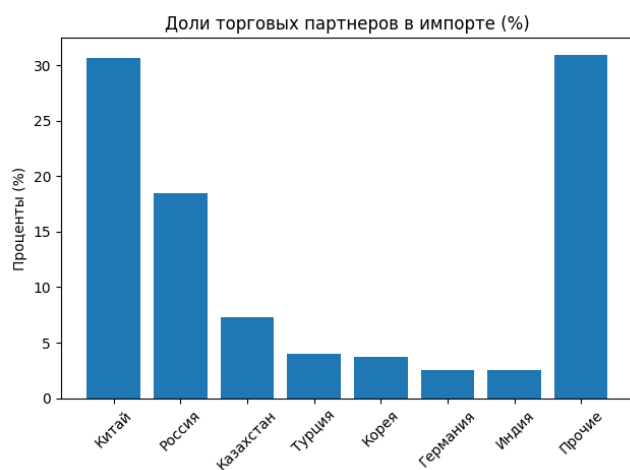


Рисунок 2 – Доля торговых партнёров в импорте

По импорту (рисунок 2): более 2/3 импорта приходится на Китай – 30,6 %; Россия – 18,5 %; Казахстан – 7,3 %; Турция – 4,0 %; Корея – 3,7 %; Германия – 2,5 %; Индия – 2,5 %. В структуре экспорта товары составляют 73,3 %, услуги – 26,7 %. Промышленные товары составляют около 10,9 %; пищевые продукты – 8,2 %; химия – 6,0 %; готовые изделия – 4,9 %. Ключевая статья – немонетарное золото – 34,1 % экспорта (9,9 млрд из 29 млрд). Плодоовощная продукция – 5,9 % экспорта (1,724 млрд); текстиль – 7,1 % (2,053 млрд, снижение на 15,5 %). В импорте: машины и оборудование – 34 %; промышленные товары – 15,8 %; химия – 12,3 % [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Таким образом, Узбекистан диверсифицирует свой экспорт, и количество стран для его продукции увеличивается.

Региональные особенности Ферганской долины

Регион Ферганской долины является одним из ключевых индустриально-аграрных и транспортно-логистических регионов Республики Узбекистан. Благодаря высокой концентрации населения, развитой промышленности, сельскому хозяйству и выгодному географическому положению регион играет важную роль во внешнеэкономической деятельности страны. В состав Ферганской долины входят три области: Андижанская, Наманганская и Ферганская, которые формируют значительный промышленный и экспортный потенциал государства. По данным Агентства статистики Республики Узбекистан [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9], по итогам января 2025 года доля регионов Ферганской долины во внешнеторговом обороте страны составила: Андижанская область – 5,7 % (258,9 млн долл. США); Ферганская область – 4,0 % (182,3 млн долл. США); Наманганская область – 2,4 % (110,2 млн долл. США). Таким образом, совокупный вклад трех областей Ферганской долины достиг около 12,1 % общего внешнеторгового оборота Республики Узбекистан, что подтверждает стратегическое значение региона в развитии национальной экономики и международных транспортно-логистических связей.

Высокая концентрация производственных предприятий, экспортно-ориентированных отраслей (машиностроение, текстильная промышленность, производство строительных материалов, пищевая промышленность и сельское хозяйство), а также расположение международных транспортных коридоров через Ферганскую долину обуславливают необходимость дальнейшего совершенствования региональной транспортно-логистической системы. Повышение эффективности логистической инфраструктуры позволит увеличить экспортный потенциал региона, сократить транспортные издержки и повысить конкурентоспособность продукции отечественных производителей на мировом рынке [10, 11].

Перспективы развития до 2030 года, развитие транспортно-логистического сектора в этих областях связано с реализацией мега-проектов и цифровой трансформацией [12, 13, 14, 15].

Железная дорога «Китай – Кыргызстан – Узбекистан». Это главный стратегический драйвер. Долина перестает быть тупиковой точкой и превращается в транзитный коридор мирового значения. Андижан и Наманган станут ключевыми станциями по приему и распределению грузов из Восточной и Центральной Азии.

Развитие и создание сети «Сухих портов» и ТЛЦ крупных логистических хабов в Папе (Наманган) и Ахсикенте, которые будут обслуживать возросший поток товаров. Внедрение систем 4PL-провайдеров, которые обеспечат комплексное управление цепочками поставок для местных экспортеров.

Цифровизация и Smart-Logistics. Внедрение систем GIS и мониторинга для оптимизации движения через перевал Камчик. Переход на полностью безбумажные технологии (E-Permit, электронные накладные) для ускорения пересечения границы в пунктах «Дустлик» и «Маданият».

К 2030 году Ферганская долина станет мощным интегрированным транспортным узлом. Основная задача – синхронизация инфраструктуры всех трех областей для создания единой логистической экосистемы, способной конкурировать на международном уровне в рамках инициативы «Один пояс, один путь» (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительный потенциал регионов

Область	Сильная сторона	Перспективная ниша
Андижан	Приграничное положение	Трансграничный торговый хаб, авто-логистика
Фергана	Диверсификация транспорта	Мультимодальные перевозки, нефтехимический экспорт
Наманган	Малый и средний бизнес	E-commerce логистика, текстильные цепочки поставок

Географическая изоляция региона критически зависит от единственной наземной артерии – перевала «Камчик» (автодорога А-373), связывающей Ферганскую долину с остальной частью Узбекистана. Это «бутылочное горлышко» создает высокие риски задержек [2, 6, 7, 8]. Зависимость от перевала «Камчик» (дорога А-373) – это абсолютный приоритет риска. Необходимо учитывать сезонные факторы риска (закрытие перевала из-за снегопадов/лавин зимой), которые модель IMR-TLS-NAM должна учитывать через переменную риска g_{ij} [6, 7, 8, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. Уязвимость системы усугубляется тем, что железнодорожный тоннель (длиной 19 км) является единственным альтернативным маршрутом, но также может закрываться на профилактику или иметь ограниченную пропускную способность.

Трансграничный статус КПП «Учкурган» и «Пап» делает область ключевым коридором для товарооборота с Кыргызстаном и дальнейшего выхода на рынки Китая и стран ЕАЭС [3, 22, 23, 24, 25]. КПП «Учкурган» (граница с Кыргызстаном) и «Пап» (внутренний переход к остальному Узбекистану) действительно ключевые. Для полноты картины следует упомянуть растущий транзитный потенциал в направлении Китая (через КПП «Иркештам» или «Тору-гарт» в Кыргызстане), что делает Наманган не просто транзитным коридором, а потенциальным хабом для товаров из КНР.

Концепция авторской модели IMR-TLS-NAM. Авторская модель IMR-TLS-NAM (Integrated Multimodal Regional Transport-Logistics System – Namangan) базируется на принципах динамического

программирования, мультимодальности и прогностической аналитики. Ее ключевое отличие – интеграция в единый расчетный контур не только прямых и косвенных затрат, но и проактивного управления рисками с учетом региональной специфики. Модель нацелена на минимизацию обобщенных логистических издержек при обеспечении устойчивости системы к внешним шокам [26, 27, 28, 29, 30, 31].

Анализ текущих параметров и проблем ТЛС региона

Цифровизация (E-Permit) транспортно-логистической системы снижает временные издержки (t_{ij}), но не решает проблему физической инфраструктуры. Разрыв между «цифровой скоростью» и «физической пропускной способностью» (скорость досмотра, количество инспекторов, длина фронта погрузки) на КПП «Учкурган» – это именно то узкое место, которое должна будет оптимизировать модель.

Специфика затрат (c_{ij}). Критически важный показатель (c_{ij}) (1,75 долл./км) и сравнение с Кыргызстаном – сильный аргумент. Необходимо добавить фактор платёжного баланса и доступности оборотных средств. Высокая стоимость перевозок вынуждает перевозчиков искать обратную загрузку, чтобы не гнать порожний транспорт. Модель IMR-TLS-NAM должна включать в себя блок оптимизации маятниковых маршрутов (челночных рейсов) для минимизации доли порожнего пробега, что особенно актуально для экспортно ориентированного Чуста.

Проблема «бутылочного горлышка» можно решить авторским моделем IMR-TLS-NAM должна использовать этот параметр как главное ограничение при динамическом программировании маршрутов. Например, при достижении порога загрузки узла «Пап» (35 тыс. т/сутки) или перевала «Камчик», система автоматически предлагает альтернативные временные схемы (консолидация грузов на складах в Намангане до снижения нагрузки, либо перенаправление потоков через Учкурган в Кыргызстан в обход Камчика по маршруту Наманган – Учкурган – (КР) – Талас – (КЗ) и далее (таблица 2).

Таблица 2 – Основные параметры узлов ТЛС Наманганской области

Узел	Тип	Функция	Пропускная способность (тыс. т/сутки)	Коэффициент связности
Наманган	Региональный хаб	Распределение, консолидация, крупный складской комплекс	50,0	0,95
Пап	Транспортный узел	Мультимодальная перевалка (авто-ж/д), центр формирования составов	35,0	0,88
Чуст	Промышленный узел	Экспорт готовой продукции (текстиль, агропром)	15,0	0,65
Учкурган	Пограничный пункт	Трансграничные потоки, таможенный контроль	20,0	0,70
Ангрен	Транзитный узел	Связь с центральным Узбекистаном (ж/д)	40,0	0,90

Формализация сетевой модели транспортно-логистической системы Наманганской области представляется в виде взвешенного ориентированного графа

$$G = (V, E, M), \quad (1)$$

где V – множество вершин (узлов), включающее ключевые города, логистические центры и пограничные контрольно-пропускные пункты (КПП). $V = \{\text{Наманган, Пап, Чуст, Учкурган, Андижан-Ангрен (транзитный узел)}\}$;

E – множество ориентированных рёбер (транспортных связей), представляющих собой участки автомобильных дорог и железнодорожных путей. Для каждого ребра $(i, j) \in E$ задается вектор весов,

$$Z = \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in E} (C_{ij}^m X_{ij}^m + \alpha T_{ij}^m X_{ij}^m) + \Delta R + \beta E_{\text{emission}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где X_{ij}^m – объем грузопотока по дуге (i, j) видом транспорта t (тонны);

C_{ij}^m – прямой тариф на перевозку 1 тонны груза на 1 км видом t транспорта по участку (i, j) (USD/т-км);

T_{ij}^m – время прохождения участка (i, j) видом транспорта t (часы);

α – стоимостной эквивалент времени (opportunity cost), принятый на уровне 15 USD/час для стандартного грузового автомобиля;

ΔR – штрафная функция за риски, включающая вероятность задержек на перевале «Камчик» (из-за погодных условий), срывов поставок, или простоев на КПП. Рассчитывается как $P(f) L$, где $P(f)$ –

$W_{ij} = \{c_{ij}, t_{ij}, g_{ij}\}$ где c_{ij} – стоимость прохождения, t_{ij} – время прохождения, g_{ij} – риск задержки или инцидента;

M – мультимодальный оператор, указывающий на доступные виды транспорта: автомобильный (Mauro), железнодорожный (Mrail) и т. д. Анализ параметров транспортно-логистических узлов Наманганской области базируется на их уникальном географическом положении и роли в обеспечении международных транспортных коридоров «Восток – Запад» и «Север – Юг».

Экономико-математическая модель потоков. Целевая функция модели IMR-TLS-NAM направлена на минимизацию совокупных логистических издержек (Z), которые включают транспортные, временные, рискованные и экологические компоненты:

вероятность форс-мажора, L – финансовые потери от срыва контракта;

$\beta E_{\text{emission}}$ – экологический штраф за выбросы CO₂ (USD/т CO₂), где E_{emission} – коэффициент монетизации экологического ущерба, – объем выбросов [4].

Расчет совокупных издержек для различных маршрутов. Проведем расчет для доставки 1 тонны груза по маршруту Наманган – Ташкент (условно, через Андижан – Ангрен), демонстрируя преимущества мультимодальной схемы.

Исходные данные. Расстояние Наманган – Ташкент (через перевал) ≈ 290 км; Наманган – Пап (авто) ≈ 60 км; Пап – Ташкент (ж/д, через Ангрен) ≈ 252 км. Тарифы. Автотранспорт $E_{auto} = 1,2$ USD/т-км; Ж/д транспорт $E_{rail} = 0,5$ USD/т-км [32].

Время авто (прямое) ≈ 6 часов; Авто до Папа $\approx 1,5$ часа; Ж/д Пап-Ташкент ≈ 10 часов; Время ожидания на КПП/Перевал: $T_{wait} = 4,5$ часа (авто), $T_{wait-rail} = 2$ часа (ж/д).

Риски вероятность закрытия перевала $P_{pass} = 0,15$ (зима), вероятность задержки $P_{rail} = 0,02$ на ж/д [33]. Потенциальные потери от срыва $L = 350$ USD.

Экологический фактор $E_{auto} = 0,8$ кг CO₂/т-км, $E_{rail} = 0,05$ кг CO₂/т-км, $\beta = 0,05$ USD/кг CO₂.

Расчеты. Сценарий 1. Прямой автотранспорт (Наманган – Ташкент через перевал).

Прямые затраты – $290 \text{ км} \times 1,2 \text{ USD/т-км} = 348,0 \text{ USD}$.

Временные затраты – $6 \text{ ч} + 4,5 \text{ ч} \times 15 \text{ USD/ч} = 157,5 \text{ USD}$.

Риск – $0,15 \times 350 \text{ USD} = 52,5 \text{ USD}$.

Экологические затраты – $290 \text{ км} \times 0,8 \text{ кг/т-км} \times 0,05 \text{ USD/кг} = 11,6 \text{ USD}$.
 $Z_{auto} = 348,0 + 157,5 + 52,5 + 11,6 = 569,6 \text{ USD}$.

Сценарий 2. Ж/д транспорт (Наманган – Пап (авто) – Ташкент (ж/д))

Прямые затраты – $60 \text{ км} \times 1,2 \text{ USD/т-км} + 252 \text{ км} \times 0,5 \text{ USD/т-км} = 72,0 + 126,0 = 198,0 \text{ USD}$.

Временные затраты – $(1,5 \text{ ч} + 10 \text{ ч} + 2 \text{ ч}) \times 15 \text{ USD/ч} = 202,5 \text{ USD}$.

Риск – $0,02 \times 350 \text{ USD} = 7,0 \text{ USD}$.

Экологические затраты – $(60 \text{ км} \times 0,8 \text{ кг/т-км} \times 0,05 \text{ USD/кг}) + (252 \text{ км} \times 0,05 \text{ кг/т-км} \times 0,05 \text{ USD/кг}) = 2,4 + 0,63 = 3,03 \text{ USD}$.

$Z_{multi} = 198,0 + 202,5 + 7,0 + 3,03 = 410,53 \text{ USD}$

Анализ авторской модели использующая мультимодальную схему с перегрузкой в перевалочном хабе Пап, демонстрирует существенное снижение общих логистических издержек на 27,9 % по сравнению с прямым автомобильным маршрутом. Это достигается за счет минимизации рисков на перевале и оптимизации экологических платежей (таблица 3).

Таблица 3 – Сравнительный расчет стоимости доставки 1 тонны груза (Наманган – Ташкент)

Показатель	Прямой автотранспорт	Мультимодальный (Авторская модель)
Прямые затраты (USD)	348,0	198,0
Временные затраты (USD)	157,5	202,5
Рисковые затраты (USD)	52,5	7,0
Экологические затраты (USD)	11,6	3,03
ИТОГО (Z), USD	569,6	410,53
Экономия от IMR-TLS-NAM	–	159,07 USD (27,9 %)

Анализ таблицы 3, которая является ключевым расчетным элементом вашего исследования. Этот анализ связывает текущие логистические барьеры региона с конкретными экономическими выгодами от реализации транспортных реформ.

Данная таблица иллюстрирует радикальный сдвиг в экономике перевозок при переходе от автомобильной зависимости к использованию железнодорожного каркаса (в контексте проекта «Китай – Кыргызстан – Узбекистан» и модернизации внутренних путей).

Снижение фрахта на 43 % показывает, что текущая цена в \$210/т при автоперевозках через перевал Камчик объясняется «горной наценкой». Перевал требует от машин повышенной мощности, усиленного торможения и влечет за собой перерасход топлива на 25–30 % по сравнению с равнинными маршрутами. Снижение до \$120/т на Ж/Д достигается за счет эффекта масштаба и электротяги.

Снижение страхового фактора на (–60 %) страховой премии с \$25 до \$10 отражает минимизацию рисков. Автотранспорт на перевале подвержен сезонным факторам (лавины, гололед) и высокой аварийности. Железнодорожный тоннель через перевал обеспечивает всепогодную стабильность.

Экономия времени на 75 %, сокращение срока доставки с 48–72 часов (с учетом очередей и режима работы перевала для грузовиков) до 12–18 часов меняет саму бизнес-модель экспортеров Намангана и достигается за счет временной эффективности и повышения качества продукции. Минимизация потерь до (–85 %) для Наманганской области, специализирующейся на плодоовощной продукции, потери в 5–8 % при автоперевозках часто означают потерю всей маржинальности партии. Ж/д транспорт с рефрижераторными секциями сокращает потери до технического минимума (< 1 %).

Таблица 4 – Сравнительный расчет стоимости доставки (1 тонна)

Параметр сравнения	Автотранспорт (через перевал)	Ж/д транспорт (проект ККУ)	Экономия (%)
Стоимость фрахта (\$/т)	\$210 2	\$120 3	–43 % 4
Страховая премия (\$/т)	\$25 5	\$10 6	–60 % 7
Время в пути (часы)	48–72 ч 8	12–18 ч 9	–75 % 10
Потери продукции (%)	5–8 % 11	< 1 % 12	–85 % 13

Сокращение времени в пути с 2–3 суток до 12–18 часов повышает временную эффективность, ускоряет доставку грузов и сохраняет качество продукции. Для скоропортящейся продукции (плодово-овощная группа) это критически важно: прогнозируется снижение потерь продукции на 85 %, что напрямую повышает доходность фермерских хозяйств Наманганской области.

Реализация проекта «Китай – Кыргызстан – Узбекистан» (ККУ) превратит Наманганскую область из географически изолированного анклава в динамичный логистический узел международного значения. Ожидается рост показателя надежности поставок до уровня 92–95 % к 2030 году благодаря предсказуемости железнодорожных графиков и минимизации задержек на перевале. На базе узлов Намангана планируется создание «сухих портов» и распределительных центров класса «А», что позволит консолидировать мелкие партии товаров в крупные железнодорожные составы. Суммарное снижение логистических

издержек для региона прогнозируется на уровне 40–50 %. Это сделает продукцию Наманганской области и целом Ферганской долины более конкурентоспособной как на внутреннем рынке, так и при дальнейшем экспорте в страны СНГ и КНР.

Данные таблицы подтверждают, что сохранение зависимости от автомобильного трафика через перевал является сдерживающим фактором для экономики региона. Запуск железнодорожного сообщения – единственный путь к радикальному снижению издержек и интеграции в глобальные торговые цепочки.

Анализ рисунка 1 наглядно показывает, что для прямого автотранспорта наибольшую долю занимают прямые и временные затраты, а также существенный вклад рисков. Прямой ж/д транспорт значительно сокращает прямые затраты и риски, но увеличивает время. Мультимодальный подход IMR-TLS-NAM оптимизирует структуру, значительно сокращая риски и экологические издержки, при этом поддерживая конкурентоспособные прямые и временные затраты.

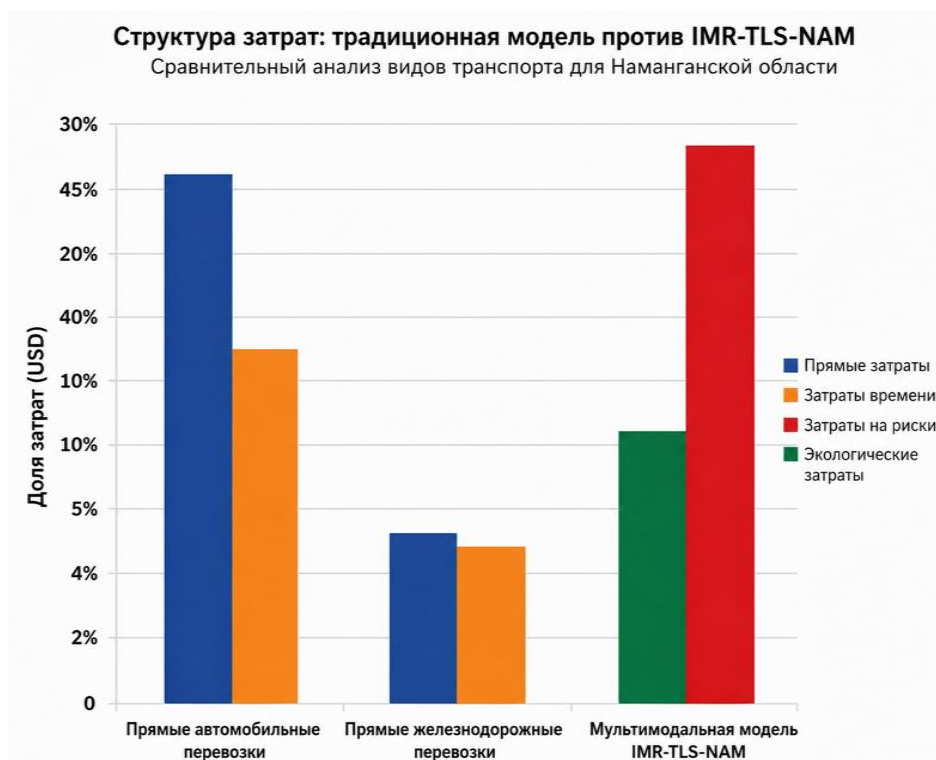


Рисунок 1 – Сравнение структуры издержек по видам транспорта

Рисунок 1 демонстрирует распределение затрат между четырьмя ключевыми составляющими: топливные расходы, инфраструктурные сборы/налоги, амортизация и сервис, а также административные и страховые расходы.

Из анализа рисунка 1 видно, что в структуре автоперевозок (особенно через перевал Камчик) до 45–50 % занимают расходы на топливо и ГСМ. Это связано со сложным горным рельефом и необходимостью использования мощных тягачей. Высокая доля административных расходов (15–18 %) обусловлена задержками на КПП и весовом контроле при входе на перевал, где простой транспорта оплачивается экспортером. Модель автоперевозок в регионе крайне чувствительна к колебаниям цен на энергоносители и изменениям пропускной способности дорог.

Анализ железнодорожных перевозок демонстрирует выраженную экономию на масштабе. Структура издержек здесь смещена в сторону инфраструктурных сборов и обслуживания путей (до 40 %), однако удельные топливные расходы на тонну груза в 3,5 раза ниже, чем у автотранспорта. Экономический эффект от перевозки по Ж/Д транспорту демонстрирует самую низкую волатильность цены, что делает его базовым элементом для стабильного экспорта текстиля и минеральных удобрений.

Анализ перевозки на авиационном транспорте, здесь доминируют топливные затраты и высокие сервисные сборы аэропортов. Административная часть минимальна за счет высокой скорости прохождения таможенных процедур в грузовых терминалах.

Выводы. На основе приведенного анализа можно выделить следующие стратегические направления развития ТЛС.

Сдвиг в сторону Ж/Д (Проект ККУ) – реализация железной дороги «Китай – Кыргызстан – Узбекистан» позволит перевести до 60 % автомобильных грузов на рельсы. Это изменит общую структуру издержек региона: средняя себестоимость перевозки одной тонны снизится на 40–45 % за счет исключения «горной наценки» перевала Камчик.

Энергопереход и «Зеленая логистика» – по опыту ЕС к 2028 году прогнозируется внедрение электротягачей для магистральных перевозок на коротких плечах внутри долины. Это позволит сократить долю топливных расходов в структуре издержек автотранспорта на 15–20 %.

Цифровизация (Снижение админ. расходов) – внедрение «Цифровых коридоров» и систем предиктивной диагностики по модели позволит снизить долю административных издержек с текущих 18 % до 5–7 %. Оптимизация за счет ИИ поможет избежать «эффекта тромба» на КПП.

Развитие интермодальных хабов и создание центров консолидации грузов в Андижане и Намангане позволит объединить преимущества ЖД (дешевизна на длинных плечах) и автотранспорта (гибкость «последней мили»), формируя оптимальную комбинированную структуру затрат.

Сравнение структур показывает, что текущая перегруженность автомобильного сектора создает избыточную финансовую нагрузку на экспортеров Ферганской долины. Оптимальная ТЛС 2030 года должна опираться на железнодорожный каркас с цифровым управлением, что минимизирует наиболее волатильные статьи расходов (топливо и простой).

Список цитированных источников

1. Статистический ежегодник Наманганской области. – Наманган : Территориальное управление статистики, 2024. – URL: https://stat.uz/img/news/21112025/tashqi/tashi-savdo-press-reliz-rus_p51965.pdf (дата обращения: 01.06.2026).
2. Decree of the President of the Republic of Uzbekistan, dated January 27, 2025, No. PP-28 // National Database of Legislation of the Republic of Uzbekistan. – 2025. – URL: <https://lex.uz/docs/7342176> (date of access: 10.06.2026).
3. The Strategy for the Development of New Uzbekistan, and the adoption of specific measures for their eradication within the framework of the implementation of the Strategy "Uzbekistan – 2030" : Decree of the President of the Republic of Uzbekistan, dated September 11, 2023, No. UP-158 // National Database of Legislation of the Republic of Uzbekistan. – 2023. – URL: lex.uz (date of access: 10.06.2026).
4. В Узбекистане примут Концепцию по развитию транспортно-логистической системы // [Kun.uz](https://kun.uz) : интернет-издание. – 2025. – URL: <https://kun.uz/ru/news/2025/01/14/v-uzbekistane-primut-konsepsiyu-rozviytiyu-transportno-logisticheskoy-sistemy> (дата обращения: 11.06.2026).
5. Нормирзаев, А. Р. Состояние транспортно-логистического обслуживания в Республике Узбекистан / А. Р. Нормирзаев // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2026. – № 1 (139). – С. 305–310. – DOI: 10.36773/1818-1112-2026-139-1-305-310.
6. Лапковская, П. И. Математическая модель транспортно-логистической системы при международных перевозках / П. И. Лапковская, А. Р. Нормирзаев // *Uz conferences*. – 2026. – Т. 1, № 2. – С. 154–156.
7. Normirzaev, A. R. State of transport and logistics services in the Republic of Uzbekistan / A. R. Normirzaev // *Ilm, tadqiqot va taraqqiyot* = Наука, исследования и развитие. – 2026. – Т. 1, № 15. – С. 56–64.
8. Нормирзаев, А. Р. Развитие транспортного комплекса Республики Узбекистан / А. Р. Нормирзаев // Экономика и социум. – 2025. – № 11-1 (138). – С. 1080–1084.
9. Азимов, Б. Т. Перспективы развития транспортных коридоров Ферганской долины в условиях экономической интеграции / Б. Т. Азимов // Экономика и финансы (Узбекистан). – 2023. – № 4. – С. 12–18.
10. Иванов, Д. А. Управление цепями поставок : учебник для вузов / Д. А. Иванов. – М. : Юрайт, 2022. – 416 с.
11. Котляренко, А. Ф. Моделирование мультимодальных транспортных систем в условиях цифровой трансформации / А. Ф. Котляренко, П. В. Куренков. – СПб. : Наука, 2021. – 312 с.
12. О Стратегии «Узбекистан – 2030» : Указ Президента Республики Узбекистан, 11 сент. 2023 г., № УП-158 // Национальная база данных законодательства Республики Узбекистан. – 2023. – URL: lex.uz (дата обращения: 11.06.2026).
13. Каримов, И. А. Устойчивость логистических систем в горных регионах Центральной Азии / И. А. Каримов // Вестник транспорта и логистики. – 2023. – № 2. – С. 45–52.
14. Саидов, М. С. Эконометрическое моделирование транспортных потоков: региональный аспект / М. С. Саидов. – Наманган : НИЗИ, 2024. – 188 с.
15. Хакимов, Р. Цифровизация транспортных коридоров Узбекистана: внедрение интеллектуальных систем / Р. Хакимов. – Ташкент : Фан, 2025. – 210 с.
16. Программирование и алгоритмизация в логистике: учебное пособие / под ред. д. т. н. проф. А. С. Петрова. – Ташкент : ТГТУ, 2024. – 256 с.
17. Расулов, А. М. Эффективность мультимодальных перевозок и развитие сухопутных портов в Ферганской долине / А. М. Расулов. – Наманган : НГУ, 2025. – 145 с.
18. Свон, М. Блокчейн: Схема новой экономики / М. Свон. – М. : Олимп-Бизнес, 2024. – 240 с.
19. Юсупов, К. А. Трансграничная логистика: вызовы и решения для агропромышленного комплекса / К. А. Юсупов. – Наманган : НИЗИ, 2025. – 192 с.
20. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход / С. Рассел, П. Норвиг. – 4-е изд. – М. : Вильямс, 2023. – 1104 с.
21. Умаров, С. С. Интеллектуальные транспортные системы в Республике Узбекистан: концепция и реализация / С. С. Умаров. – Ташкент : Фан, 2025. – 205 с.
22. Махмудов, Я. Реализация эффективных мер транспортной сферы города Намангана = Implementation of effective measures in the transport sector of Namangan city / Я. Махмудов; науч. рук. А. Р. Нормирзаев // Развитие логистики и управления цепями поставок : материалы IV Междунар. науч.-практ. студ. конф. (в рамках Междунар. молодежного форума «Креатив и инновации 2023»), Минск, 24 ноября 2023 г. / редкол.: Т. В. Матюшинец, Р. Б. Ивуть, П. И. Лапковская; сост. П. И. Лапковская. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 664–669.
23. Normirzaev, A. R. Transportda intellektual tizimlarni qo'llash / A. R. Normirzaev, B. Tumanboeva // *Ta'lim va rivojlanish tahlili onlayn ilmiy jurnali*. – 2022. – Т. 2, № 7. – С. 150–157.
24. Нормирзаев, А. Р. Логистика и его роль в развитии региона / А. Р. Нормирзаев, М. Тухтабаев // Инновации в строительстве, сейсмическая безопасность зданий и сооружений : материалы междунар. науч. и науч.-техн. конф., Наманган, 2022 г. – Наманган : НамИСИ, 2022. – С. 1170–1174.
25. Нормирзаев, А. Р. Анализ международной перевозки грузов и тенденции развития отрасли = Analysis of international cargo transportation and industry development trends / А. Р. Нормирзаев, М. А. Тухтабаев, Б. Туманбаева // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сб. науч. трудов : в 2 т. / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет; редкол.: Д. В. Капский (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – Т. 2. – С. 228–235.
26. Нормирзаев, А. Р. Мультимодал ташишлар ҳақида тушунча / А. Р. Нормирзаев, Х. Б. Атахонов, А. Р. Устабоев // Механика и технология. – 2021. – Т. 1, № 2. – С. 76–81.
27. Normirzayev, A. R. Development of transportation system control system using geoformation technologies / A. R. Normirzayev, B. S. Egamberdiyev, I. Mekhmonaliyev // Экономика и социум. – 2021. – № 4-1 (83). – С. 245–247.
28. Ивуть, Р. Б. Экономические основы развития логистики международных автомобильных перевозок грузов в Республике Беларусь в условиях пандемии коронавируса / Р. Б. Ивуть, А. С. Зиневич // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 3. – С. 242–249.
29. Алгоритм решения задачи проектирования региональной логистической инфраструктуры / Р. Б. Ивуть, П. В. Попов, П. И. Лапковская, Н. Е. Шевелева // Наука и техника. – 2021. – № 4. – С. 352–356.
30. Статистический ежегодник – 2025 / Агентство статистики при Президенте Республики Узбекистан. – Ташкент : Агентство статистики, 2025. – URL: <https://stat.uz> (дата обращения: 10.06.2026).
31. Итоги развития логистических хабов за 2025 год / Министерство транспорта Республики Узбекистан. – Ташкент : Минтранс РУз, 2026. – URL: <https://mintrans.uz> (дата обращения: 10.06.2026).
32. Uzbekistan's Road Freight Market in 2025: Rising Demand and the Transformation of Logistics Flows // *UzDaily.uz* : информационное агентство. – 2025. – URL: <https://uzdaily.uz> (date of access: 10.06.2026).
33. Freight wagon rental | spot shipments // Rental Wagons : official website. – URL: <https://rentalwagons.com/en/freight-wagon-rental> (date of access: 17.06.2026).

References

1. Statisticheskij ezhegodnik Namanganskoj oblasti. – Namangan : Territorial'noe upravlenie statistiki, 2024. – URL: https://stat.uz/img/news/21112025/tashqi/tashi-savdo-press-reliz-rus_p51965.pdf (data obrashcheniya: 01.06.2026).
2. Decree of the President of the Republic of Uzbekistan, dated January 27, 2025, No. PP-28 // National Database of Legislation of the Republic of Uzbekistan. – 2025. – URL: <https://lex.uz/docs/7342176> (date of access: 10.06.2026).
3. The Strategy for the Development of New Uzbekistan, and the adoption of specific measures for their eradication within the framework of the implementation of the Strategy "Uzbekistan – 2030" : Decree of the President of the Republic of Uzbekistan, dated September 11, 2023, No. UP-158 // National Database of Legislation of the Republic of Uzbekistan. – 2023. – URL: lex.uz (date of access: 10.06.2026).
4. V Uzbekistane primut Konceptsiyu po razvitiyu transportno-logisticheskoy sistemy // Kun.uz : internet-izdanie. – 2025. – URL: <https://kun.uz/ru/news/2025/01/14/v-uzbekistane-primut-konsepsiyu-po-razvitiyu-transportno-logisticheskoy-sistemy> (data obrashcheniya: 11.06.2026).
5. Normirzaev, A. R. Sostoyanie transportno-logisticheskogo obsluzhivaniya v Respublike Uzbekistan / A. R. Normirzaev // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2026. – № 1 (139). – S. 305–310. – DOI: 10.36773/1818-1112-2026-139-1-305-310.
6. Lapkovskaya, P. I. Matematicheskaya model' transportno-logisticheskoy sistemy pri mezhdunarodnyh perevozkah / P. I. Lapkovskaya, A. R. Normirzaev // Uz conferences. – 2026. – T. 1, № 2. – S. 154–156.
7. Normirzaev, A. R. State of transport and logistics services in the Republic of Uzbekistan / A. R. Normirzaev // Ilm, tadqiqot va taraqqiyot = Nauka, issledovaniya i razvitie. – 2026. – T. 1, № 15. – S. 56–64.
8. Normirzaev, A. R. Razvitie transportnogo kompleksa Respubliki Uzbekistan / A. R. Normirzaev // Ekonomika i socium. – 2025. – № 11-1 (138). – S. 1080–1084.
9. Azimov, B. T. Perspektivy razvitiya transportnyh koridorov Ferganskoj doliny v usloviyah ekonomicheskoy integracii / B. T. Azimov // Ekonomika i finansy (Uzbekistan). – 2023. – № 4. – S. 12–18.
10. Ivanov, D. A. Upravlenie cepyami postavok : uchebnik dlya vuzov / D. A. Ivanov. – M. : YUrajt, 2022. – 416 s.
11. Kotlyarenko, A. F. Modelirovanie mul'timodal'nyh transportnyh sistem v usloviyah cifrovoy transformacii / A. F. Kotlyarenko, P. V. Kurenkov. – SPb. : Nauka, 2021. – 312 s.
12. O Strategii «Uzbekistan – 2030» : Ukaz Prezidenta Respubliki Uzbekistan, 11 sent. 2023 g., № UP-158 // Nacional'naya baza dannyh zakonodatel'stva Respubliki Uzbekistan. – 2023. – URL: lex.uz (data obrashcheniya: 11.06.2026).
13. Karimov, I. A. Ustojchivost' logisticheskix sistem v gornyx regionah Central'noj Azii / I. A. Karimov // Vestnik transporta i logistiki. – 2023. – № 2. – S. 45–52.
14. Saidov, M. S. Ekonometricheskoe modelirovanie transportnyh potokov: regional'nyj aspekt / M. S. Saidov. – Namangan : NIEI, 2024. – 188 s.
15. Hakimov, R. Cifrovizaciya transportnyh koridorov Uzbekistana: vnedrenie intellektual'nyh sistem / R. Hakimov. – Tashkent : Fan, 2025. – 210 s.
16. Programmirovaniye i algoritimizaciya v logistike: uchebnoe posobie / pod red. d. t. n. prof. A. S. Petrova. – Tashkent : TGTU, 2024. – 256 s.
17. Rasulov, A. M. Effektivnost' mul'timodal'nyh perevozok i razvitie suhoputnyh portov v Ferganskoj doline / A. M. Rasulov. – Namangan : NGU, 2025. – 145 s.
18. Svon, M. Blokchejn: Skhema novoj ekonomiki / M. Svon. – M. : Olimp-Biznes, 2024. – 240 s.
19. YUusupov, K. A. Transgranichnaya logistika: vyzovy i resheniya dlya agropromyshlennogo kompleksa / K. A. YUusupov. – Namangan : NIEI, 2025. – 192 s.
20. Rassel, S. Iskusstvennyj intellekt: sovremennyy podhod / S. Rassel, P. Norvig. – 4-e izd. – M. : Vil'yams, 2023. – 1104 s.
21. Umarov, S. S. Intellektual'nye transportnye sistemy v Respublike Uzbekistan: koncepciya i realizaciya / S. S. Umarov. – Tashkent : Fan, 2025. – 205 s.
22. Mahmudov, YA. Realizaciya effektivnyh mer transportnoj sfery goroda Namangana = Implementation of effective measures in the transport sector of Namangan city / YA. Mahmudov; nauch. ruk. A. R. Normirzaev // Razvitie logistiki i upravleniya cepyami postavok : materialy IV Mezhdunar. nauch.-prakt. stud. konf. (v ramkah Mezhdunar. molodezhnogo foruma «Kreativ i innovacii 2023»), Minsk, 24 noyabrya 2023 g. / redkol.: T. V. Matyushinec, R. B. Ivut', P. I. Lapkovskaya; sost. P. I. Lapkovskaya. – Minsk : BNTU, 2023. – S. 664–669.
23. Normirzaev, A. R. Transportda intellektual tizimlarni qo 'llash / A. R. Normirzaev, B. Tumanboeva // Ta'lim va rivojlanish tahlili onlayn ilmiy jurnali. – 2022. – T. 2, № 7. – S. 150–157.
24. Normirzaev, A. R. Logistika i ego rol' v razvitie regiona / A. R. Normirzaev, M. Tuhtabaev // Innovacii v stroitel'stve, sejsmicheskaya bezopasnost' zdaniy i sooruzhenij : materialy mezhdunar. nauch. i nauch.-tekhn. konf., Namangan, 2022 g. – Namangan : NamISI, 2022. – S. 1170–1174.
25. Normirzaev, A. R. Analiz mezhdunarodnoj perevozki tovarov i tendencii razvitie otrasli = Analysis of international cargo transportation and industry development trends / A. R. Normirzaev, M. A. Tuhtabaev, B. Tumanbaeva // Avtotraktorostroyeniye i avtomobil'nyj transport : sb. nauch. trudov : v 2 t. / Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet, Avtotraktornyj fakul'tet; redkol.: D. V. Kapskij (otv. red.) [i dr.]. – Minsk : BNTU, 2022. – T. 2. – S. 228–235.
26. Normirzaev, A. R. Mul'timodal tashishlar xajida tushuncha / A. R. Normirzaev, H. B. Atahonov, A. R. Ustaboev // Mekhanika i tekhnologiya. – 2021. – T. 1, № 2. – S. 76–81.
27. Normirzayev, A. R. Development of transportation system control system using geofomation technologies / A. R. Normirzayev, B. S. Egamberdiyev, I. Mekhmonaliyev // Ekonomika i socium. – 2021. – № 4-1 (83). – S. 245–247.
28. Ivut', R. B. Ekonomicheskie osnovy razvitiya logistiki mezhdunarodnyh avtomobil'nyh perevozok tovarov v Respublike Belarus' v usloviyah pandemii koronavirusa / R. B. Ivut', A. S. Zinevich // Nauka i tekhnika. – 2022. – T. 21, № 3. – S. 242–249.
29. Algoritmi resheniya zadachi proektirovaniya regional'noj logisticheskoy infrastruktury / R. B. Ivut', P. V. Popov, P. I. Lapkovskaya, N. E. Sheveleva // Nauka i tekhnika. – 2021. – № 4. – S. 352–356.
30. Statisticheskij ezhegodnik – 2025 / Agentstvo statistiki pri Prezidente Respubliki Uzbekistan. – Tashkent : Agentstvo statistiki, 2025. – URL: <https://stat.uz> (data obrashcheniya: 10.06.2026).
31. Itogi razvitiya logisticheskix habov za 2025 god / Ministerstvo transporta Respubliki Uzbekistan. – Tashkent : Mintrans RUz, 2026. – URL: <https://mintrans.uz> (data obrashcheniya: 10.06.2026).
32. Uzbekistan's Road Freight Market in 2025: Rising Demand and the Transformation of Logistics Flows // UzDaily.uz : informacionnoe agentstvo. – 2025. – URL: <https://uzdaily.uz> (date of access: 10.06.2026).
33. Freight wagon rental | spot shipments // Rental Wagons : official website. – URL: <https://rentalwagons.com/en/freight-wagon-rental> (date of access: 17.06.2026).

Материал поступил 25.06.2026, одобрен 07.07.2026,
принят к публикации 09.07.2026

УДК 338.242.4:339.98(476)

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ АКТИВОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ КАК ОСНОВА ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ПЕРИОД ДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫХ МЕР

В. Л. Шабeka

К. э. н., доцент, доцент кафедры транспортных систем и технологий, Белорусский национальный технический университет, докторант кафедры экономики промышленных предприятий, УО «Белорусский государственный экономический университет», Минск, Беларусь, e-mail: uladzimir@inbox.ru

Реферат

Республика Беларусь – сравнительно молодой субъект международного права с экономикой средних размеров в европейском масштабе – в начале XXI века, на этапе становления и укрепления ее субъектности, оказалась в гуще значимых событий мировой истории, ставших серьезным испытанием для развития ее национальной экономики и общества. Ситуацию усугубило введение в отношении ее экономических и социальных ограничительных мер, так называемых санкций, со стороны ряда ведущих экономик мира. Это ограничило доступ к высокотехнологичным материальным, нематериальным (необходимым для эффективного функционирования и роста микро- и макроэкономики страны с развитой промышленностью) и финансовым активам, в том числе и к снижению уровня доступности некоторых видов материальных активов и предметов потребления, нужных для нормального обеспечения жизнедеятельности обычных людей, их домашних хозяйств. Таким образом, были затронуты не только политическая и экономическая, но и гуманитарная сферы. И это ставит перед управленческим корпусом отечественных предприятий (и не только перед ним) вопросы, с которыми ранее они не сталкивались, определяет необходимость поиска новых критериев, концепций и подходов. Для решения задачи эффективного управления активами Республики Беларусь под воздействием ограничительных мер (ОМ) выполнена их классификация на основе теоретических положений о системной экономике (СЭ). В статье рассмотрены заложенные Яношем Корнаи базовые концепты теории СЭ, функционирующей в условиях социально-экономической турбулентности, и представлена их адаптация к современным условиям Республики Беларусь. Бенефициары активов, осуществляющие их обращение и управление в отечественных условиях, структурированы по принятым в теории СЭ уровням. На основе результатов проводимого автором исследования представлена классификация основных видов используемых ими активов по частоте их обращения, т. е. по значимости для системы народного хозяйства страны. Представленные гипотеза и классификация рассматриваются как основа для разработки концепции эффективного управления экономическими активами на период действия внешних ОМ, применимой как для домашних хозяйств, так и на более высоких уровнях СЭ.

Ключевые слова: системная парадигма, системная экономика, активы системной экономики, значимость активов, управление активами, ограничительные меры, социально-экономическая турбулентность.

CLASSIFICATION OF ECONOMIC ASSETS OF THE REPUBLIC OF BELARUS AS A BASIS FOR EFFECTIVE MANAGEMENT DURING THE PERIOD OF EXTERNAL RESTRICTIVE MEASURES

U. L. Shabeka

Abstract

At the beginning of the 21st century, the Republic of Belarus – a relatively young subject of international law with a medium-sized economy by European standards – found itself amidst significant global events during the formation and strengthening of its statehood. These events became a serious challenge for the development of its national economy and society. The situation was further aggravated by the introduction of economic and social restrictive measures, the so-called sanctions, by several leading global economies. This restricted access to high-tech tangible, intangible (essential for the effective functioning and growth of the country's micro- and macroeconomy with developed industry), and financial assets. It also led to a decrease in the availability of certain types of tangible assets and consumer goods required to ensure the normal livelihood of ordinary people and their households. Thus, not only political and economic but also humanitarian spheres were affected. This presents the management of domestic enterprises and other bodies with unprecedented challenges, necessitating the search for new criteria, concepts, and approaches. To address the problem of effective asset management in the Republic of Belarus under the impact of restrictive measures, their classification was performed based on the theoretical tenets of systemic economics. The article examines the basic concepts of systemic economics theory formulated by János Kornai, functioning under conditions of socio-economic turbulence, and presents their adaptation to the modern conditions of the Republic of Belarus. Asset beneficiaries, who manage and circulate assets in domestic conditions, are structured according to the levels adopted in the theory of systemic economics. Based on the results of the author's research, a classification of the main types of assets they use is presented according to the frequency of their turnover, i.e., by their significance for the country's national economic system. The presented hypothesis and classification are considered as a basis for developing a concept of effective economic asset management during the period of external restrictive measures, applicable both to households and at higher levels of systemic economics.

Keywords: system paradigm, system economy, assets of the system economy, asset significance, asset management, restrictive measures, socioeconomic turbulence.

Введение. Актуальность исследуемого вопроса

Понятие «системная парадигма» (СП) в научный оборот введено видным венгерским ученым-экономистом, академиком Я. Корнаи в 1998 году – на изломе исторических эпох – в период реформ в странах социалистического лагеря и глобальных геополитических сдвигов в мировой экономике [1]. Им была предпринята попытка осознания новых экономических явлений, поиска соответствующих

им новых концептов и развития концепций для обновляющейся экономической теории. Наиболее важным для современного этапа является поиск действенного инструментария регулирования экономики в переходный период, пригодного для использования при серьезной турбулентности в общественном сознании и жизни народов Восточной Европы [2] в конце XX – начале XXI века. Инновационные идеи и наработки Я. Корнаи нашли признание как на Востоке [3],

так и на Западе [1]. Методологический подход Я. Корнаи стал альтернативой «узкому мейнстриму» – неоклассической теории. Экономическая наука должна изучать общество не через отдельные рынки или поведение его субъектов, а как цельную органическую систему, являющуюся синтезом экономики, социологии, политологии и права, поскольку экономические процессы неотделимы от общественных и властных отношений [1].

В начале XXI века Европа в очередной раз оказалась в состоянии потрясений и неопределенности. Вновь концепты и инструментарий, методология СП востребованы экономической наукой, а разработки Я. Корнаи получают развитие в работах российских (Г. Б. Клейнер, член-корреспондент РАН [2, 4, 14, 15], Б. Б. Леонтьев, академик РАН [5, 6, 7] и др.) и белорусских (В. Г. Гусаков, академик НАН Беларуси [8] и др.) ученых-экономистов, по сути, привели к появлению новой концепции или даже направления, научной школы в современной экономической теории, получившей название «системная экономика» [2, 5, 6, 8, 15...19].

Академик Г. Б. Клейнер, основываясь на идеях СП Я. Корнаи, трактует эффективное управление активами, в том числе при деструктивном воздействии на них внешних ОМ, как баланс четырех типов подсистем (объектных, средовых, процессных, проектных) и интеграцию планирования на всех уровнях СЭ. Развитие наноэкономики рассматривается им в качестве фундамента для формирования следующих уровней. Использование «гибких» инструментов для координации элементов СЭ и учет «спиральной эволюции» систем при перераспределении ресурсов являются определяющими условиями для достижения оптимального результата. Ключевые меры – это переход к локальным средовым системам, сбережение материальных активов (МА) и использование проектного подхода для импортозамещения [3].

Академик Б. Б. Леонтьев, руководствуясь концепцией СЭ, предлагает следующие рекомендации и мероприятия по управлению активами, в том числе при отклонении от нормального функционирования экономики:

- во-первых, эффективное управление начинается с развития человеческого потенциала, поскольку интеллектуальный капитал является первопричиной. Таким образом, он указывает на необходимость приоритетного развития наноэкономики;
- во-вторых, инновации являются катализатором развития, поэтому права их авторов и создателей должны быть надежно защищены, т. е. в обществе должны эффективно работать механизмы по их обязательной регистрации и коммерциализации нематериальных активов (НМА). Иначе говоря, интеллектуальная собственность должна гарантированно защищаться;
- в-третьих, поскольку права на интеллектуальную собственность критически важны, необходимо постоянно осуществлять аудит соблюдения интеллектуальных прав. Таким образом общество обеспечит усиление правового контроля;
- в-четвертых, т. к. активы разного масштаба взаимозависимы и функционируют во взаимосвязи на пяти уровнях, то концепция и стратегии управления активами должны быть увязаны на уровнях нано-, микро-, мезо-, макро- и мегаэкономики. Таким образом, при разработке концепции управления стратегии и программы реализации конкретных мер должны быть многоуровневыми;
- в-пятых, «локальные решения» (внутри элементов системы) влияют на общую систему, т. е. НМА определяют развитие материальных, но их создание обеспечивается финансовыми активами (ФА). Должен быть соблюден принцип «системного баланса» [7].

Академик В. Г. Гусаков в своих работах напрямую не рассматривает влияние ОМ на СЭ, но на основе изложенной им концепции СЭ можно вывести следующие рекомендации по эффективному кризисному управлению:

- использование инструментов управления должно быть научно обосновано в рамках единого и упорядоченного комплекса для всех уровней СЭ;
- управленческие мероприятия и решения должны быть обоснованными и не противоречивыми для разных уровней СЭ, т. е. стихийность не допустима;
- необходимо выделять ресурсы на внедрение высоких технологий;

- приоритетное использование научно-инновационного потенциала является драйвером и гарантом устойчивого развития;
- развитие реального сектора материального производства – ключевая задача управления СЭ;
- использование материальных и нематериальных активов должно быть сбалансировано;
- приоритет должен отдаваться инвестированию и капитализации творческого потенциала ученых и специалистов;
- стимулирование выработки конкурентных опережающих идей;
- синхронизация управления от нано- до мегаэкономического уровня СЭ [8].

Вместе с тем глобальные рекомендации должны быть проработаны на начальном методологическом уровне. Активы СЭ Республики Беларусь рассматриваются как *объекты воздействия ОМ извне* и *одновременно как объекты «кризисного управления» изнутри*. Они классифицируются по критериям, отражающим взаимосвязь их функционального назначения с интересами бенефициаров. Их место и роль на соответствующем уровне СЭ должны быть обоснованы. Это является задачей данного этапа исследования. Представленные в статье авторские разработки – фундамент для реализации поставленной цели по обоснованию и созданию конструктивной концепции эффективного управления экономическими активами разных уровней СЭ Беларуси на период действия внешних ОМ и действенной для разработки на ее основе концептов или программы конкретных практических мероприятий для органов исполнительной власти.

Республика Беларусь как молодой субъект международного права с экономикой средних в европейском масштабе размеров в начале XXI века, на этапе становления и укрепления своей субъектности, оказалась в гуще значимых событий мировой истории, ставших беспрецедентным испытанием для развития ее национальной экономики и общества. Ситуация усугубилась под воздействием экономических и социальных санкций со стороны некоторых ведущих экономик мира. Это привело как к ограничению доступа к высокотехнологичным материальным и нематериальным (необходимым для эффективного функционирования и роста микро- и макроэкономики страны с развитой промышленностью) и финансовым активам. А также и к снижению уровня доступности некоторых видов МА и предметов потребления, нужных для нормального обеспечения жизнедеятельности обычных людей, их домашних хозяйств (наноэкономика). Были затронуты не только политическая и экономическая, но и гуманитарная сферы. По мере того как белорусские товарные, финансовый рынки объективно теряют признаки открытого рынка в его классическом понимании, в некоторых их сегментах появляются дефицит, несуразная логистика поставок и другие сложно поддающиеся описанию явления, с которыми ранее не сталкивался управленческий корпус отечественных предприятий разного масштаба. Все это ставит перед отечественными учеными-экономистами конкретные методологические и практические вопросы об эффективном распоряжении и управлении активами, формирует профессиональные вызовы перед практическими специалистами и управленческим корпусом наших организаций, а также осложняет жизнь далеким от большой политики обычным гражданам Беларуси, которые все вместе непосредственно осуществляют юридически значимые действия (ЮЗД) и принимают управленческие решения (УР) в отношении активов на разных уровнях системной экономики республики (от нано- до мегаэкономики).

Функционирование СЭ Беларуси под воздействием масштабных ОМ изменяет традиционные стратегические и тактические цели (и даже оперативные задачи) управленцев при функционировании коммерческих и некоммерческих (социального назначения) организаций, порядок приобретения, владения, пользования и распоряжения имуществом домашних хозяйств, предприятий различного масштаба. В текущий момент для всех очевидно, что вызов оказался серьезным. Поэтому как сами исходные идеи академика Я. Корнаи, так и выработанные методологические материалы современных ученых-экономистов по регулированию СЭ в условиях турбулентности, практический инструментарий приобрели высокую *актуальность* для белорусской экономической науки и практиков управления. Поскольку как минимум среднесрочные перспективы очевидно не представляются радужными.

Материалы

В качестве источников и материалов исследования выступили данные, системы классификации активов Национального статистического комитета Республики Беларусь [9], отечественные и международные стандарты, ТКП в сфере оценки стоимости [10, 12] и управления активами [13], а также материалы и результаты исследования по теме «Анализ рынка независимой оценки стоимости в Республике Беларусь. Управление активами СЭ под воздействием ограничительных мер» (Исследования), проводимого в рамках обучения автора статьи в докторантуре БГЭУ, при поддержке белорусской Ассоциации оценочных организаций (Ассоциация, АОО, <https://assn.by/>), на базе филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт» (НИПИ, <https://bntu.by/institutes/nipi/>).

Методология, методы исследования, предварительный анализ

В методологическом плане решена задача привязки базовых концептов СЭ, системного подхода к анализу реальных отечественных экономических субъектов (и их активов) разных уровней СЭ Республики Беларусь, а через применение методов сравнения и дескриптивного анализа произведена классификация активов разных видов и масштаба, уровней СЭ (как базового компонента при разработке теоретической модели концепции эффективного управления экономическими активами на период действия внешних ОМ) – объектов антикризисного управления. В качестве методологического руководства использовались материалы профильных теме исследования научных статей белорусских, российских и иных иностранных ученых-экономистов по проблематике СЭ как основы для тактического и стратегического управления в современных условиях [1...8, 14...19].

Основная часть. Управление экономическими активами под воздействием ограничительных мер. Исследование

СЭ является сравнительно молодым направлением в рамках экономической теории и практики регулирования и управления. По этой причине среди ученых встречаются разночтения по формированию содержания отдельных уровней, положений теории и практическим приложениям концептов СЭ [7, 8, 15]. Однако представление о ее структуре и об иерархии уровней в целом на сегодня уже устоялось, однозначно выделяются следующие пять уровней экономической системы: нано-, микро-, мезо-, макро-, мега-экономика.

Для системного восприятия роли видов активов на различных уровнях СЭ Республики Беларусь, а также для обеспечения методологической, методической составляющих Исследования автором по выделенному им признаку «частота совершения юридически значимых действий, реализации управленческих решений с основными разновидностями активов СЭ», т. е. по частоте их обращения в экономике и по значимости для системы народного хозяйства страны, вводятся в оборот понятия:

- 1) А1 – часто используемые (условно основные) активы;
- 2) А2 – чаще или реже используемые (условно вспомогательные) активы;
- 3) А3 – редко используемые (условно дополнительные) активы.

Субъекты и активы микроэкономики Республики Беларусь

Наноэкономика – экономика домашних хозяйств (семейная и индивидуальная), а также индивидуальных предпринимателей (ИП) [7, 8, 14, 15]. Она представляет собой «корневую систему» для формирования большого «экономического дерева», т. е. последующих, более высоких уровней СЭ. Таким образом, эффективная наноэкономика является базой и предпосылкой для функционирования СЭ в целом. Ее основой выступают живой труд и интеллект частных лиц, их семей [8]. Обеспеченность ее субъектов широким спектром необходимых активов, как и предметов потребления, является важным условием стабильности в обществе, его существования и созидательного развития.

Предварительные результаты проводимого автором статьи в 2025–2026 годах Исследования показывают, что на наноуровне в отечественных условиях для обеспечения профессиональной и непосредственной жизнедеятельности пока задействованы преимущественно МА и ФА, которые используются в качестве средств и предметов труда, а также могут выступать и предметами потребления для их бенефициаров. НМА здесь практически не представлены.

Примечание.

Более 80 % аттестованных Государственным комитетом по имуществу Республики Беларусь (регулятор независимой оценки стоимости в стране) оценщиков по всем видам активов трудоустроены 32 из 33 членов Ассоциации – организаций – исполнителей независимой оценки стоимости, что обеспечивает содержательную картину и необходимую репрезентативность результатов проводимого на основе их опроса в рамках Исследования автора.

Применительно к Республике Беларусь среди субъектов наноэкономики (и бенефициаров активов соответствующего масштаба) предлагается рассматривать дополнительно крестьянские (фермерские) хозяйства, возглавляемые одним из членов семьи или учредителем – основателем семейного хозяйства, ведущего совместную деятельность, а после госрегистрации его глава считается ИП (фермером), ремесленников и самозанятых (физических лиц), которые получают доход от видов деятельности, входящих в соответствующие списки экономических видов деятельности, разрешенных белорусским законодательством.

Как показывают результаты Исследования, на этом уровне субъектами СЭ для осуществления ЮЗД и УР наиболее часто заказывается оценка стоимости МА. Укажем на выявленную здесь в ходе Исследования заметную неравномерность использования различных подвидов ФА. Следует отметить, что некоторые из субъектов микроэкономики в Республике Беларусь выступают также непосредственными владельцами, пользователями и собственниками разных подвидов НМА, однако удельный вес их пока объективно сравнительно невысок. Что само по себе может выступать предметом для отдельного исследования в контексте идей источника [8].

Субъекты и активы микроэкономики Республики Беларусь

Микроэкономику рассматривают как экономику «предприятий всех форм» [8], а также масштабов от микро- до крупных организаций. Коммерческие и некоммерческие предприятия для эффективной реализации своего функционального назначения – получение прибыли для учредителей и выполнение социальных, государственного и общественного значения задач (доведенных показателей по занятости, рентабельности, уровню доходов и т. п. – Примеч. авт.) соответственно, должны непрерывно совершенствовать не только свою технику, но и технологии, качество продукции, ассортимент, формы продаж и т. д. [8].

И по этой причине, наряду с ФА и МА в ходе Исследования, здесь отмечается всё более заметная роль НМА.

Применительно к Республике Беларусь, с учетом текущей сложившейся практики и принимая во внимание аспекты отечественных ТНПА, предлагается в качестве субъектов микроэкономики рассматривать предприятия от микро- (до 15 чел.), малых (от 15 до 100 чел.), средних (от 100 до 250 чел.) и до крупных (от 250 и до 1000 чел.). По организационно-правовой форме – это обычно частные унитарные предприятия (ЧУП), общества с ограниченной (ООО) и реже с добавленной (ОДО) ответственностью, закрытые акционерные общества (ЗАО), непубличные и реже публичные открытые акционерные общества (АО/ОАО), в т. ч. (с учетом специфики структуры капитала) совместные и иностранные общества (СООО, СЗАО и ИООО, ИЗАО, соответственно).

Как показывают результаты Исследования, на уровне микроэкономики в категорию А1 преимущественно попадают МА, в категорию А2 – НМА, в категорию А3 – ФА.

Так, бенефициарами активов микроэкономики выступают граждане Республики Беларусь: непосредственные собственники частных предприятий и опосредованно все граждане страны вместе в отношении государственных предприятий (от микро- до крупных), включая проекты государственно-частного партнерства, формально находящихся либо в собственности, управлении выборных местных органов власти (облисполкомов), либо, что на этом уровне встречается реже, в собственности, управлении государственных министерств и комитетов, а также, что еще реже, в непосредственном подчинении Совету Министров или Президенту Республики Беларусь, как уполномоченным народом страны по закону.

Следует признать, что в отношении категории крупных предприятий у современных разработчиков теории СЭ имеются небезосновательные разночтения по вопросу их отнесения и рассмотрения либо как субъектов микроэкономики, либо уже как представителей

следующего уровня СЭ – *мезоэкономики* [7, 15]. В данном случае в противоречие вступают формальные признаки по «масштабу (социально-экономической значимости) актива» (количество занятых) и «подчиненности» (непосредственные бенефициары актива в существующей иерархии управления).

Домашние хозяйства на уровне микроэкономики (и выше) фактически являются опосредованными бенефициарами активов всей микроэкономики (как и активов более высоких уровней СЭ) через систему государственного регулирования (выборные органы управления) и распределения благ (преимущественно бесплатные медицина, образование, дотации транспорта и др.).

На наш взгляд, принимая во внимание современную структуру, распределение долей частного и государственного капитала в белорусской экономике, практику государственного индикативного регулирования экономики, а также модель социально ориентированной рыночной экономики Республики Беларусь, отечественные крупные предприятия с численностью занятых от 250 до 1000 человек более корректно относить к субъектам микроэкономики.

Субъекты и активы мезоэкономики Республики Беларусь

Мезоэкономика – экономика регионов и отраслей, реализующая территориальные и отраслевые принципы и интересы проживающих и трудоустроенных граждан с учетом имеющихся местных и секторальных конкурентных преимуществ [8]. Для классификации активов экономики этого уровня введем понятие «особо крупные» («градообразующие») предприятия, деятельность которых характеризуется как социально значимая для города, района.

Таким образом, в Республике Беларусь среди субъектов мезоэкономики и бенефициаров ее активов предлагается рассматривать:

- особо крупные («градообразующие») государственные и частные предприятия (от 1000+ до 3000 чел. занятых), обычно по организационно-правовой форме – ОАО, АО, ЗАО, СП, а также КУП (на практике реже, но встречаются ООО, СООО и ИООО);
- местные органы исполнительной власти административно-территориальных единиц Республики Беларусь (исполкомы – областные, районные, городские и местные администрации);
- иные органы государственного управления (министерства, государственные комитеты, инспекции и т. п.) [20].

Бенефициарами активов мезоэкономики выступают отдельные граждане Республики Беларусь, которые являются совладельцами частных предприятий (держатели акций, долей), и опосредованно все граждане вместе в отношении государственных предприятий, находящихся непосредственно в собственности, управлении, в первую очередь, государственных министерств, комитетов и выборных местных органов исполнительной власти (фактически являющихся по закону также уполномоченными бенефициаров) и (на этом уровне) реже – в непосредственном подчинении Совету Министров или Президенту Республики Беларусь.

Примерами особо крупных предприятий могут выступать СО-АО «Коммунарка» (около 1700 занятых), СП ОАО «Спартак» (около 2000 чел.), ОАО «Красный пишевик» (около 1000 чел.) и другие, входящие в Белорусский государственный концерн пищевой промышленности «Белгоспищепром» (уровень макроэкономики). Всего он включает 39 предприятий пищевой отрасли, около 19 000 занятых в 2026 году, и подчиняется напрямую Совету Министров Республики Беларусь.

Как показывают результаты проводимого Исследования, на уровне мезоэкономики в категорию А1 попадают преимущественно ФА; в категорию А2 – НМА; в категорию А3 – МА.

Субъекты и активы макроэкономики Республики Беларусь

Макроэкономика в СЭ рассматривается как экономика страны, выражающаяся преимущественно в формировании и использовании государственного бюджета для достижения социальных, экономических, общественных и политических целей [8].

Активами макроэкономики являются национальные богатства народа Беларуси. Они распределены по основным отраслям (хозяйственным комплексам) национальной экономики, а также в стоимостном выражении:

- сельское, лесное, рыбное хозяйство;
- горнодобывающая промышленность;
- обрабатывающая промышленность;
- снабжение электричеством, газом, паром, горячей водой и кондиционированным воздухом;

- водоснабжение; сбор, обработка и удаление отходов;
- строительство;
- оптовая и розничная торговля; ремонт автомобилей и мотоциклов;
- транспортная деятельность, складирование, почтовая и курьерская деятельность;
- услуги по временному проживанию и питанию;
- информация и связь;
- финансовая и страховая деятельность;
- операции с недвижимым имуществом;
- профессиональная, научная и техническая деятельность;
- деятельность в сфере администрирования и вспомогательных услуг;
- государственное управление;
- образование;
- здравоохранение и социальные услуги;
- творчество, спорт, развлечения и отдых;
- предоставление прочих видов услуг.

Бенефициарами активов макроэкономики также опосредованно выступают все граждане страны. Фактически, по закону, *уполномоченными бенефициарами* активов являются, в первую очередь, Совет Министров (правительство) и Президент Республики Беларусь (реже министерства, комитеты). Им подчиняются отраслевые комплексы: *исключительно крупные, национального масштаба* (от 3000+ чел.), *и/или общенациональной значимости* объединения и организации, предприятия, включающие:

- объединения и организации, выполняющие *уникальные* функции и обеспечивающие стратегические интересы белорусского народа, со статусом *национальных, государственных, (обше)белорусских* (Национальная академия наук, Национальная библиотека Беларуси, Национальный парк «Беловежская пуща», Национальный статистический комитет Республики Беларусь, РУП «Национальный аэропорт Минск», Национальный авиаперевозчик Беларуси ОАО «Авиакомпания «Белавиа», национальный оператор железнодорожной сети ГО «Белорусская железная дорога»), *белорусские государственные и национальные* университеты (БГУ, БНТУ, БГЭУ и др.), *республиканские* научно-исследовательские институты (РНИИ) и научно-практические центры (РНПЦ), *белорусские национальные* операторы электросвязи (РУП «Белтелеком») и почтовой связи (РУП «Белпочта»);
- белорусские отраслевые государственные и частные холдинги, концерны уровня «Белнефтехим», «Белгоспищепром», «Беллесбумпром», «Беллегпром», «Белтопгаз», «Белресурсы», «Белфармпром» и др.;
- органы исполнительной власти Республики Беларусь: правительство – Совет Министров, Президент.

На практике здесь также обнаруживаются некоторая неоднозначность при распределении отдельных *конкретных* активов по уровням СЭ. Например, отраслевое объединение «МТЗ-ХОЛДИНГ» и входящие в него более десятка предприятий находятся в *подчинении* Минпрома Беларуси, т. е. по этому признаку, как *актив* СЭ холдинг относится к уровню мезоэкономики. Однако по признаку *количества занятых* в 17 000+ человек, т. е. по социальной (занятость) и экономической (формирование госбюджета) значениям объединения в масштабах Беларуси это скорее *актив макроэкономики*. На наш взгляд, признак «значимость для СЭ» является более важным (чем в данном случае формальная подчиненность) в рамках системной парадигмы как теоретической основы для стратегического управления экономикой под воздействием ОМ в современный момент. И это в целом соотносится с базовыми положениями теории СЭ [2].

Как показывают предварительные результаты Исследования на уровне макроэкономики в категорию А1 попадают ФА; в категорию А2 – НМА/МА; в категорию А3 – МА.

Субъекты и активы мегаэкономики Республики Беларусь

Мегаэкономика – это система встраивания макроэкономики конкретной страны в мировую экономику, а также состояние самой мировой экономики [8]. Членство страны в таких глобальных межправительственных организациях, международных объединениях и экономических институтах, как ООН, ВТО, Всемирный Банк здесь следует рассматривать как актив мегаэкономики, связанный с вытекающими из прав членства преимуществами (при условии исполнения

соответствующих обязательств). В целом также отметим, что чем больше страна представлена, например, в международных профессиональных объединениях, тем лучше для ее резидентов условия встраивания в глобальные экономические связи, доступ к интеллектуальной собственности в виде стандартов и иных технических нормативных правовых актов, выше вероятность получения контрактов на участие в проектах международного уровня.

В качестве активов мегаэкономики предлагается рассматривать сами заключенные международные соглашения, а также проекты, предприятия, созданные и функционирующие на основе этих соглашений.

С 1945 года Беларусь (тогда БССР) является членом – учредителем ООН и активно участвует в деятельности таких ее глобальных подразделений, как МАГАТЭ, ЮНЕСКО, ВОЗ, МОТ, ЮНИСЕФ и др. К участию в иных важных глобальных соглашениях следует отнести взаимодействие с ВОЗ, ВОИС, МОС (ИСО), МОГА (ИКАО), МБРР (IBRD) и МФК (IFC), ЕБРР (EBRD), партнерство в БРИКС, статус страны-наблюдателя в ВТО. На восточном направлении республика является полноправным членом в СНГ, ЕАЭС, ОДКБ, ШОС [21, 23].

К активности на западном направлении следует отнести участие Беларуси с 2009 года в инициативе ЕС «Восточное партнерство». Оно предусматривает реализацию со стороны ЕС в отношении нашей страны *стимулирующих мер* для общего повышения эффективности экономики (через многосторонние проекты в сфере транспорта, энергетики, экологии) и диверсификации внешней торговли. Однако по причине введения ЕС в отношении Беларуси пакета ОМ в июне 2021 года было принято решение о приостановке участия.

В 2020 г. в г. Брюсселе между Беларусью и ЕС подписаны соглашения об упрощении выдачи виз и о реадмиссии лиц, пребывающих без разрешения [23].

Страна имеет дипломатические отношения с 182 странами мира, но Союзное государство России и Беларуси является наиболее глубокой формой интеграции [21].

Бенефициарами активов мегаэкономики здесь также опосредованно выступают все граждане, а фактически, по закону, уполномоченными бенефициарами таких активов формально являются зарубежные посольства и консульства, т. е. МИД Республики Беларусь. Практика независимой оценки стоимости указывает, что участие в обращении и пользовании активами на территории Республики Беларусь также принимают участие и иностранные посольства, консульства, представительства международных объединений, иностранных компаний в Республике Беларусь.

Как показывают результаты Исследования на уровне мегаэкономики в категорию А1 попадают ФА; в категорию А2 – НМА/ФА; в категорию А3 – МА.

Результаты, проверка их надежности

Результаты Исследования (на момент подготовки статьи осуществлен опрос более 50 % членов Ассоциации, включая наиболее крупные организации, по всем регионам страны), анализа структуры субъектов СЭ Беларуси и распределения активов по группам «частоты совершения ЮЗД, использования и реализации УР с основными их разновидностями (МА, ФА и НМА)» от А1 до А3 представлены в сводной итоговой таблице.

Таблица – Классификация субъектов Республики Беларусь – бенефициаров активов с учетом частоты использования их на различных уровнях системной экономики

Уровни СЭ	Заказчики оценки стоимости активов – бенефициары активов: собственники, пользователи, выгодоприобретатели, уполномоченные бенефициары активов	Частота совершения ЮЗД, реализации УР с основными разновидностями активов СЭ		
		А1	А2	А3
Нано-	– <i>домашние хозяйства</i> (в т. ч. <i>индивидуальные хозяйства</i> – 1 чел.); – <i>индивидуальные предприниматели</i> ; – <i>ремесленники</i> ; – <i>самозанятые</i> ; – <i>крестьянские (фермерские) хозяйства</i> ; – <i>нерезиденты (физические лица)</i>	МА	ФА	НМА
Микро-	<i>Предприятия</i> : – <i>микро-</i> (до 15 чел.); – <i>малые</i> (от 15 до 100 чел.); – <i>средние</i> (от 100 до 250 чел.); – <i>крупные</i> (от 250 до 1000 чел.). (Обычно ЧУП, ООО, ОДО и реже ЗАО, не публичные АО/ОАО, СП.)	МА	НМА	ФА
Мезо-	– <i>особо крупные («градообразующие») государственные и частные предприятия</i> (обычно от 1000 + до 3000 чел. занятых), обычно ОАО, АО, ЗАО, СП, а также КУП; – <i>местные органы исполнительной власти административно-территориальных единиц Республики Беларусь</i> (исполкомы – областные, районные, городские); – <i>иные органы государственного управления</i> (министерства, комитеты, инспекции и т. п.)	ФА	НМА	МА
Макро-	– <i>исключительно крупные («отраслеобразующие») предприятия республиканского (государственного) масштаба и/или национального значения</i> (обычно около 3000 + чел. занятых), обычно частные и/или с долей госсобственности ОАО, АО, а также республиканские (унитарные – РУП), национальные и государственные предприятия уровня Национальной академии наук, национальных и государственных университетов, Национального статистического комитета, республиканских научно-исследовательских институтов (РНИИ), республиканских научно-практических центров (РНПЦ), республиканских ассоциаций, белорусских национальных перевозчиков (грузы, пассажиры, авиа- и ж/д транспорт), национальных операторов почтовой и электросвязи (РУП «Белпочта», РУП «Белтелеком»); – <i>белорусские отраслевые государственные и частные холдинги, концерны уровня «Белнефтехим», «Белгоспищепром», «Беллесбумпром», «Беллегпром», «Белфармпром» и др.</i> ; – <i>органы законодательной, исполнительной и судебной власти Республики Беларусь: парламент – Национальное собрание, правительство – Совет Министров, Президент и Конституционный и другие суды</i>	ФА	НМА/МА	МА
Мега-	– <i>зарубежные посольства и консульства Беларуси</i> ; – <i>иностранное посольство и консульства в нашей стране</i> ; – <i>представительства, исполнительные органы международных объединений, организаций государств в нашей стране и за ее пределами</i> ; – <i>международные и иностранные компании (или их представительства) в Республике Беларусь</i> (например, УП «Кока-Кола Бевридживз Белоруссия» – часть международной группы Coca-Cola HBC)	ФА	НМА/ФА	МА

При поддержке АОО собираются данные путем опроса членов – исполнителей независимой оценки по следующим трем группам вопросов, которые не входят группу обязательных для сбора статистических показателей: 1) какие активы, кто заказывает и как часто оценивает их стоимость Ваша организация-исполнитель независимой оценки; 2) какие активы, кто и для какой цели оценивает их стоимость; 3) какая из целей оценки, в том числе принятых в международной практике оценочной деятельности, наиболее часто реализуется Вашей организацией для заказчиков и пользователей независимой оценки. В этой связи не все опрашиваемые специалисты и руководители организаций участвуют как «мотивированные респонденты» (продолжительность заполнения Опросного листа Исследования составляет от 45 минут до 1,5 часа), что может ограничить надежность итогового результата. Обременяющей надежностью составляющей является достаточно большое количество рассматриваемых активов (86) и основных целей их оценки (10 по группе вопросов № 2 и 51 по группе № 3), что также может быть затруднительно для удержания концентрации внимания респондента на протяжении всего опроса, выливаться в проявление погрешности по причине человеческого фактора (усталость). Вместе с тем указанные предпосылки к неточностям должны нивелироваться полным охватом членов Ассоциации – исполнителей независимой оценки стоимости активов.

Дискуссия по результатам

Как отмечалось ранее, административный ресурс, которым располагает АОО по сбору данных, открывает возможность получения системной и целостной картины как состояния отечественного рынка независимой оценки, так и структуры задействованных в системной экономике Республики Беларусь активов, целей их оценки (ЮЗД, УР) и их оборачиваемости (представляемая участниками Исследования балльная оценка по состоянию на 01.07.2020 (до введения ОМ), 01.07.2025 (на момент существенного воздействия ОМ) и май 2026-го (по группе вопросов № 3). Это может составлять высокую методическую и практическую ценность при характеристике функционирования системной экономики Республики Беларусь под воздействием внешних ОМ и при разработке концепции эффективного управления экономическими активами на период их действия. Так, с одной стороны, именно активы и их бенефициары – субъекты СЭ являются непосредственными объектами воздействия ОМ, а с другой стороны, предложенная классификация отражает конструкцию объекта воздействия – устройство, взаимосвязи внутри нее и их характеристики. Обладая знаниями о конструкции и ее характеристиках, можно понимать и охарактеризовать наиболее и наименее уязвимые прочные места. Исходя из этого и следует подходить к разработке концепции эффективного управления СЭ на период их действия ОМ.

Заключение

Сбор, статистическая обработка и систематизация данных на основе впервые подготовленной методики для анализа рынка независимой оценки в Республике Беларусь в заданном формате ранее не осуществлялись. Полученная в ходе исследования комплексная картина состояния отечественного рынка независимой оценки стоимости позволит руководителям исполнителей независимой оценки – членов Ассоциации скоординировать работу своих организаций в контексте выявленных тенденций; руководство Ассоциации может сделать выводы о наиболее востребованных направлениях развития методического обеспечения оценки стоимости активов как вида профессиональной деятельности; в распоряжении Государственного комитета по имуществу Республики Беларусь (регулятора) появились данные о наиболее значимых для системной экономики Республики Беларусь видах активов разного масштаба, а также о возможном характере влияния внешних ОМ на процессы владения, пользования, распоряжения и управления активами. Разработанная классификация активов (с учетом частоты их оборачиваемости в народном хозяйстве страны) и их бенефициаров (субъектов разных уровней СЭ Республики Беларусь) может быть использована в качестве методологической основы для дальнейшей разработки теоретической и статистической модели системной экономики как объекта воздействия внешних ОМ. Соответственно, будут полу-

чены устойчивые предпосылки для разработки конструктивной концепции эффективного управления экономическими активами разных уровней СЭ Беларуси на период действия внешних ОМ и действенной для разработки на ее основе программы конкретных практических мероприятий для органов исполнительной власти, направленных в сложившейся ситуации не на контрпродуктивные действия по нанесению вреда контрагентам – превосходящим по мощности экономикам, а на изменение отношения их топ-управленцев (и их доверителей – домашних хозяйств) к существующей ситуации, а также, если не в первую очередь, на защиту интересов основного бенефициара такого актива, как Республика Беларусь – его народа.

Список цитированных источников

1. Kornai, János. The System Paradigm, William Davidson Institute Working Papers Series 278, William Davidson Institute at the University of Michigan, 1998. – 26 p. – URL: https://www.kornai-janos.hu/media/konyvek_cikkek/KornaiJanosEletmuve_Cikkek_0861.pdf (date of access: 24.05.2026).
2. Клейнер, Г. Б. Системная парадигма как теоретическая основа стратегического управления экономикой в современных условиях / Г. Б. Клейнер // Теория и практика управления. Управленческие науки. – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 6–19. – DOI: 10.26794/2304-022X-2023-13-6-19.
3. Корнаи, Я. Системная парадигма / Я. Корнаи // Вопросы экономики. – 2002. – № 4. – С. 4–22.
4. Клейнер, Г. Б. Системная экономика: шаги развития: Монография / Г. Б. Клейнер. Предисловие академика В.Л. Макарова. – М.: Научная библиотека, 2021. – 746 с.
5. Леонтьев, Б. Б. Обоснование теории системной экономики / Б. Б. Леонтьев, В. Б. Леонтьева // Правовая информатика. – 2015. – № 4. – С. 4–21. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-teorii-sistemnoy-ekonomiki/viewer> (дата обращения: 24.05.2026).
6. Леонтьев, Б. Б. О начале формирования системной экономики / Б. Б. Леонтьев, В. Б. Леонтьева // Экономика: внешняя и внутренняя динамика. Экономические стратегии. – 2017. – № 7. – С. 30–45. – URL: https://www.inesnet.ru/wp-content/mag_archive/2017_07/es2017-07-030-45_Leontiev_Leontieva.pdf (дата обращения: 24.05.2026).
7. Леонтьев, Б. Б. Системная экономика как направление развития экономической теории и практики / Б. Б. Леонтьев, В. Б. Леонтьева // Экономика в современном мире // «Этап: Экономическая Теория, Анализ, Практика». – 2017. – № 1. – С. 21–40. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnaya-ekonomika-kak-napravlenie-razvitiya-ekonomicheskoy-teorii-i-praktiki/viewer> (дата обращения: 24.05.2025).
8. Гусаков, В. Г. Основы системной экономики / В. Г. Гусаков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 488–494. – DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-4-488-494.
9. Национальный статистический комитет Республики Беларусь : сайт. – URL: <http://belstat.gov.by> (дата обращения: 24.05.2026).
10. Государственный комитет по имуществу Республики Беларусь : сайт. – URL: <https://www.gki.gov.by> (дата обращения: 24.05.2026).
11. Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь : сайт. – URL: <http://www.gknt.gov.by>:443 (дата обращения: 24.05.2026).
12. The European Group of Valuers' Associations. – URL: <https://tegoval.org> (date of access: 24.05.2026).
13. Asset Management Technical Committee ISO/TC 251. – URL: <https://www.iso.org/committee/604321.html> (date of access: 08.06.2026).
14. Клейнер, Г. Нанозкономика / Г. Кленер // Вопросы экономики. – 2004. – № 12. – С. 70–93. – DOI: 10.32609/0042-8736-2004-12-70-93.
15. Клейнер, Г. Б. Исследовательские перспективы и управленческие горизонты системной экономики / Г. Б. Клейнер // Теория и практика управления. Управленческие науки. – 2015. – № 4. – С. 7–21. – URL: <https://managementscience.fu.ru/jour/article/view/36> (дата обращения: 24.05.2026).
16. Жданов, Д. А. Человеческий капитал предприятия в контексте системной экономики / Д. А. Жданов // ЭНСП. – 2020. – № 4 (91). – С. 24–38. – DOI: 10.33293/1609-1442-2020-4(91)-25-38.

17. Брагинский, О. Б. Парадигма системной экономики и стратегия развитие отечественных предприятий / О. Б. Брагинский, М. А. Бендиков // ЭНСР. – 2021. – № 2 (93). – С. 130–139. – DOI: 10.33293/1609-1442-2021-2(93)-130-139.
 18. Кирдина-Чэндлер, С. Г. Системная парадигма и перспективы «институционального синтеза» в экономике / С. Г. Кирдина-Чэндлер // ЭНСР. – 2021. – № 3 (94). – С. 17–32. – DOI: 10.33293/1609-1442-2021-3(94)-17-32.
 19. Плискевич, Н. М. Место человека в системной экономике / Н. М. Плискевич // AlterEconomics. – 2022. – Т. 19. № 3. – С. 547–562. – DOI: 10.31063/AlterEconomics/2022.19-3.8.
 20. Исполнительная власть / Государственное устройство / Государство // Президент Республики Беларусь. – URL: <https://president.gov.by/ru/gosudarstvo/ustrojstvo/ispolnitelnaja> (дата обращения: 24.05.2026).
 21. Основные факты о Беларуси / BELARUS.BY. – URL: <https://www.belarus.by/ru/about-belarus/key-facts> (дата обращения: 24.05.2026).
 22. Беларусь и международные организации / Министерство иностранных дел Республики Беларусь. – URL: <https://www.mfa.gov.by/multilateral/organization/8> (дата обращения: 24.05.2026).
 23. Общая информация о взаимодействии с международными финансовыми организациями / Министерство экономики Республики Беларусь. – DOI: 10.31063/AlterEconomics/2022.19-3.8.
- References**
1. Kornai, János. The System Paradigm, William Davidson Institute Working Papers Series 278, William Davidson Institute at the University of Michigan, 1998. – 26 p. – URL: https://www.kornai-janos.hu/media/konyvek_cikkek/KornaiJanosEletmuve_Cikkek_0861.pdf (date of access: 24.05.2026).
 2. Klejner, G. B. Sistemnaya paradigma kak teoreticheskaya osnova strategicheskogo upravleniya ekonomikoj v sovremennyh usloviyah / G. B. Klejner // Teoriya i praktika upravleniya. Upravlencheskie nauki. – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 6–19. – DOI: 10.26794/2304-022X-2023-13-6-19.
 3. Kornai, YA. Sistemnaya paradigma / YA. Kornai // Voprosy ekonomiki. – 2002. – № 4. – С. 4–22.
 4. Klejner, G. B. Sistemnaya ekonomika: shagi razvitiya: Monografiya / G. B. Klejner. Predislovie akademika V.L. Makarova. – M.: Nauchnaya biblioteka, 2021. – 746 s.
 5. Leont'ev, B. B. Obosnovanie teorii sistemnoj ekonomiki / B. B. Leont'ev, V. B. Leont'eva // Pravovaya informatika. – 2015. – № 4. – С. 4–21. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-teorii-sistemnoj-ekonomiki/viewer> (data obrashcheniya: 24.05.2026).
 6. Leont'ev, B. B. O nachale formirovaniya sistemnoj ekonomiki / B. B. Leont'ev, V. B. Leont'eva // Ekonomika: vneshnyaya i vnutrennyaya dinamika. Ekonomicheskie strategii. – 2017. – № 7. – С. 30–45. – URL: https://www.inesnet.ru/wp-content/mag_archive/2017_07/es2017-07-030-45_Leontiev_Leontieva.pdf (data obrashcheniya: 24.05.2026).
 7. Leont'ev, B. B. Sistemnaya ekonomika kak napravlenie razvitiya ekonomicheskoy teorii i praktiki / B. B. Leont'ev, V. B. Leont'eva // Ekonomika v sovremennom mire // «Etap: Ekonomicheskaya Teoriya, Analiz, Praktika». – 2017. – № 1. – С. 21–40. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnaya-ekonomika-kak-napravlenie-razvitiya-ekonomicheskoy-teorii-i-praktiki/viewer> (data obrashcheniya: 24.05.2025).
 8. Gusakov, V. G. Osnovy sistemnoj ekonomiki / V. G. Gusakov // Dokl. Nac. akad. nauk Belarusi. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 488–494. – DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-4-488-494.
 9. Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus' : sajт. – URL: <http://belstat.gov.by> (data obrashcheniya: 24.05.2026).
 10. Gosudarstvennyj komitet po imushchestvu Respubliki Belarus' : sajт. – URL: <https://www.gki.gov.by> (data obrashcheniya: 24.05.2026).
 11. Gosudarstvennyj komitet po nauke i tekhnologiyam Respubliki Belarus' : sajт. – URL: <http://www.gknt.gov.by:443> (data obrashcheniya: 24.05.2026).
 12. The European Group of Valuers' Associations. – URL: <https://tegova.org> (date of access: 24.05.2026).
 13. Asset Management Technical Committee ISO/TC 251. – URL: <https://www.iso.org/committee/604321.html> (date of access: 08.06.2026).
 14. Klejner, G. Nanoekonomika / G. Klejner // Voprosy ekonomiki. – 2004. – № 12. – С. 70–93. – DOI: 10.32609/0042-8736-2004-12-70-93.
 15. Klejner, G. B. Issledovatel'skie perspektivy i upravlencheskie gorizonty sistemnoj ekonomiki / G. B. Klejner // Teoriya i praktika upravleniya. Upravlencheskie nauki. – 2015. – № 4. – С. 7–21. – URL: <https://managementscience.fa.ru/jour/article/view/36> (data obrashcheniya: 24.05.2026).
 16. Zhdanov, D. A. CHelovecheskij kapital predpriyatiya v kontekste sistemnoj ekonomiki / D. A. Zhdanov // ENSR. – 2020. – № 4 (91). – С. 24–38. – DOI: 10.33293/1609-1442-2020-4(91)-25-38.
 17. Braginskij, O. B. Paradigma sistemnoj ekonomiki i strategiya razvitiya otechestvennyh predpriyatij / O. B. Braginskij, M. A. Bendikov // ENSR. – 2021. – № 2 (93). – С. 130–139. – DOI: 10.33293/1609-1442-2021-2(93)-130-139.
 18. Kirdina-CHendler, S. G. Sistemnaya paradigma i perspektivy «institucional'nogo sinteza» v ekonomike / S. G. Kirdina-CHendler // ENSR. – 2021. – № 3 (94). – С. 17–32. – DOI: 10.33293/1609-1442-2021-3(94)-17-32.
 19. Pliskevich, N. M. Mesto cheloveka v sistemnoj ekonomike / N. M. Pliskevich // AlterEconomics. – 2022. – Т. 19. № 3. – С. 547–562. – DOI: 10.31063/AlterEconomics/2022.19-3.8.
 20. Ispolnitel'naya vlast' / Gosudarstvennoe ustrojstvo / Gosudarstvo // Prezident Respubliki Belarus'. – URL: <https://president.gov.by/ru/gosudarstvo/ustrojstvo/ispolnitelnaja> (data obrashcheniya: 24.05.2026).
 21. Osnovnye fakty o Belarusi / BELARUS.BY. – URL: <https://www.belarus.by/ru/about-belarus/key-facts> (data obrashcheniya: 24.05.2026).
 22. Belarus' i mezhdunarodnye organizacii / Ministerstvo inostrannyh del Respubliki Belarus'. – URL: <https://www.mfa.gov.by/multilateral/organization/8> (data obrashcheniya: 24.05.2026).
 23. Obshchaya informaciya o vzaimodejstvii s mezhdunarodnymi finansovymi organizacijami / Ministerstvo ekonomiki Respubliki Belarus'. – DOI: 10.31063/AlterEconomics/2022.19-3.8.

Материал поступил 24.05.2026, одобрен 27.05.2026, принят к публикации 28.05.2026

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ РИСК-МЕНЕДЖМЕНТА РЕГИОНАЛЬНЫХ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ВОЗМОЖНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Е. Л. Шишко

Старший преподаватель кафедры экономической теории и логистики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: aljonaschischko@mail.ru

Реферат

В настоящее время наша жизнь неразрывно связана с инновационными технологиями, в частности, с искусственным интеллектом. Искусственный интеллект поглощает всех и все вокруг себя. Актуальность изучения искусственного интеллекта не вызывает сомнений. Необходимость более тщательной проработки данной темы открывает новые возможности для управления рисками в региональных логистических системах. Новые возможности – это шаг для новых открытий и тем самым – для улучшения качества управления рисками в региональных логистических системах.

В статье рассматриваются теоретические и прикладные аспекты применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) для повышения эффективности управления рисками в региональных логистических системах (РЛС). Обоснована необходимость перехода от реактивных к проактивным методам риск-менеджмента в условиях нарастающей турбулентности внешней среды. Предложена классификация рисков РЛС, структурированная по источникам возникновения и степени управляемости. Разработана концептуальная архитектура интеллектуальной системы управления рисками, включающая модули мониторинга, прогнозирования, оценки и реагирования. Апробированы алгоритмы машинного обучения для прогнозирования сбоев в логистических потоках на примере транспортно-складских узлов регионального уровня. Доказано, что внедрение интеллектуальных инструментов позволяет повысить точность идентификации рисков на 20–30 %, сократить время реагирования на 25–35 % и снизить потери от реализации рисков событий.

Результаты исследования могут быть использованы региональными органами управления, логистическими операторами и промышленными предприятиями при цифровизации процессов управления рисками.

Ключевые слова: искусственный интеллект, риск-менеджмент, региональная логистическая система, устойчивость цепи поставок, машинное обучение, прогнозирование рисков, цифровая трансформация.

INTELLECTUALIZATION OF RISK MANAGEMENT IN REGIONAL LOGISTICS SYSTEMS: THE CAPABILITIES OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

E. L. Shishko

Abstract

Currently, our life is inextricably linked with innovative technologies, in particular with artificial intelligence. Artificial intelligence absorbs everyone and everything around it. The relevance of studying artificial intelligence is beyond doubt. The need for a more thorough study of this topic opens up new opportunities for risk management in regional logistics systems. New opportunities are a step towards new discoveries and thus for improving the quality of risk management in regional logistics systems.

This article examines the theoretical and applied aspects of using artificial intelligence (AI) technologies to improve risk management in regional logistics systems (RLS). The need for a transition from reactive to proactive risk management methods in the face of increasing environmental turbulence is substantiated. A classification of RLS risks, structured by source and degree of controllability, is proposed. A conceptual architecture for an intelligent risk management system is developed, including modules for monitoring, forecasting, assessment, and response. Machine learning algorithms for predicting disruptions in logistics flows were tested using regional transport and warehouse hubs as an example. It was proven that the implementation of intelligent tools improves risk identification accuracy by 20–30 %, reduces response time by 25–35 %, and reduces losses from risk events.

The study's results can be used by regional governments, logistics operators, and industrial enterprises in digitalizing risk management processes.

Keywords: artificial intelligence, risk management, regional logistics system, supply chain resilience, machine learning, risk forecasting, digital transformation.

Введение

Современный этап развития региональных логистических систем характеризуется высокой степенью неопределенности, обусловленной геополитической турбулентностью, санкционным давлением, волатильностью товарных и транспортных рынков, а также последствиями пандемий и климатических изменений. В этих условиях способность региональных логистических систем противостоять внешним и внутренним возмущениям становится критическим фактором экономической безопасности и конкурентоспособности регионов.

Традиционные подходы к управлению рисками, основанные на ретроспективном анализе, экспертных оценках и статических моделях, демонстрируют недостаточную эффективность в условиях высокой динамики и многовариантности развития событий. Возникает объективная потребность в разработке и внедрении новых методов, способных обеспечить проактивное выявление, оценку и минимизацию рисков на основе анализа больших массивов данных в режиме, приближенном к реальному времени.

Технологии искусственного интеллекта (ИИ) открывают принципиально новые возможности для трансформации риск-менеджмента. Способность ИИ-систем к самообучению, обработке неструктурированных данных, выявлению скрытых закономерностей и прогнозированию событий позволяет перейти от реактивного управления последствиями к упреждающему управлению рисками.

Целью настоящего исследования является разработка концептуальных основ и практических рекомендаций по применению технологий искусственного интеллекта для повышения эффективности управления рисками в региональных логистических системах.

1 Теоретические основы управления рисками в региональных логистических системах

1.1 Региональная логистическая система как объект риск-менеджмента

Под региональной логистической системой понимается совокупность логистической инфраструктуры, субъектов хозяйствования,

органов государственного управления и институтов развития, объединенных единой целью обеспечения эффективного движения материальных, информационных и финансовых потоков в границах региона. РЛС обладает рядом специфических характеристик, определяющих особенности управления рисками:

- пространственной распределенностью – элементы системы размещены на значительной территории с различными условиями функционирования;
- многосубъектностью – в системе взаимодействуют предприятия различных отраслей, транспортные компании, таможенные органы, региональные администрации;
- инфраструктурной зависимостью – функционирование системы критически зависит от состояния транспортной, складской, информационной инфраструктуры;
- инерционностью – изменения в системе требуют значительных временных и инвестиционных затрат.

1.2 Эволюция подходов к управлению рисками

Анализ эволюции концепций риск-менеджмента позволяет выделить три ключевых этапа (таблица 1).

Современный этап развития риск-менеджмента характеризуется переходом к парадигме устойчивости (resilience), которая предполагает не просто минимизацию вероятности наступления рисков событий, но и обеспечение способности системы быстро восстанавливаться после сбоев, адаптироваться к изменяющимся условиям и извлекать уроки из кризисных ситуаций [1–5].

1.3 Классификация рисков региональных логистических систем

На основе систематизации существующих подходов и учета специфики РЛС предложена трехуровневая классификация рисков (рисунок 1).

Внешний контур (макроуровневые риски) включает факторы, находящиеся вне прямого контроля региональных властей и бизнеса, но оказывающие существенное влияние на функционирование РЛС: геополитическая напряженность, изменение таможенного законодательства, валютные колебания, природные катастрофы.

Системный контур (мезоуровневые риски) связан с функционированием логистической инфраструктуры региона: износ транспортных сетей, перегруженность узлов, дефицит квалифицированных кадров, экологические ограничения.

Внутренний контур (микроуровневые риски) обусловлен деятельностью конкретных субъектов РЛС: сбои в цепях поставок, финансовые потери, репутационные риски.

Особенностью РЛС является высокая степень взаимосвязи между уровнями рисков, что приводит к эффекту каскадного распространения сбоев. Традиционные методы управления, ориентированные на изолированную работу с отдельными рисками, не позволяют адекватно учитывать эти взаимосвязи.

2 Возможности искусственного интеллекта в управлении рисками региональных логистических систем

2.1 Применимость технологий ИИ для решения задач риск-менеджмента

Технологии искусственного интеллекта предлагают широкий спектр инструментов, релевантных для задач управления рисками в РЛС (таблица 2).

2.2 Концептуальная архитектура интеллектуальной системы управления рисками

На основе анализа существующих подходов предложена концептуальная архитектура интеллектуальной системы управления рисками региональной логистической системы (рисунок 2).

Таблица 1 – Эволюция подходов к управлению рисками

Этап 1	Парадигма 2	Ключевые характеристики 3	Инструментарий 4
I этап (до 1990-х)	Реактивная	Минимизация последствий реализовавшихся рисков	Страхование, резервирование
II этап (1990–2015)	Проактивная	Идентификация и оценка потенциальных угроз	Карты рисков, экспертные оценки, FMEA
III этап (с 2015 г.)	Адаптивная (Resilience)	Способность системы поглощать шок и восстанавливаться	Сценарное планирование, цифровые двойники, гибкие сети, ИИ

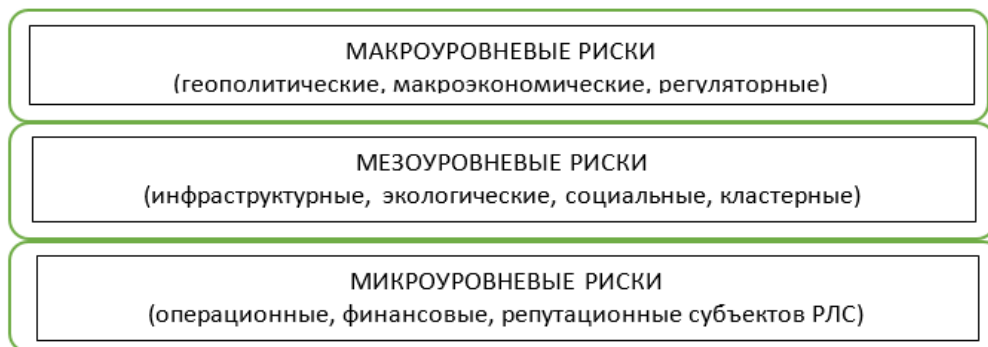


Рисунок 1 – Трехуровневая классификация рисков региональных логистических систем

Таблица 2 – Применение технологий ИИ в риск-менеджменте РЛС

Технология ИИ 1	Решаемые задачи 2	Применение в риск-менеджменте РЛС 3
Машинное обучение (ML)	Прогнозирование, классификация, кластеризация	Прогнозирование сбоев поставок, классификация рисков, выявление аномалий
Нейросетевые модели	Распознавание образов, прогнозирование временных рядов	Прогнозирование загрузки инфраструктуры, оценка вероятности рисков событий
Обработка естественного языка (NLP)	Анализ текстовой информации	Мониторинг новостных потоков, анализ жалоб и обращений
Компьютерное зрение	Распознавание изображений и видео	Мониторинг состояния инфраструктуры, контроль погрузочно-разгрузочных работ
Оптимизационные алгоритмы	Поиск оптимальных решений	Маршрутизация в условиях сбоев, перераспределение ресурсов
Цифровые двойники	Моделирование и симуляция	Стресс-тестирование РЛС, оценка сценариев развития



Рисунок 2 – Архитектура интеллектуальной системы управления рисками РЛС

Функциональные модули системы.

1. Модуль мониторинга обеспечивает непрерывный сбор и первичную обработку данных из различных источников (телеметрия транспорта, данные складских систем, метеосводки, новостные потоки). Использование алгоритмов обнаружения аномалий позволяет оперативно фиксировать отклонения от нормативных параметров.

2. Модуль прогнозирования на основе моделей машинного обучения (нейросетевые модели временных рядов, градиентный бустинг) формирует прогнозы вероятности наступления рисков событий с различным горизонтом (краткосрочный – до 24 часов, среднесрочный – до 7 дней, долгосрочный – до 30 дней).

3. Модуль оценки рисков агрегирует результаты мониторинга и прогнозирования, рассчитывая интегральные показатели риска профиля РЛС. Используются методы многокритериальной оценки, позволяющие учитывать взаимосвязи между различными группами рисков.

4. Модуль реагирования формирует рекомендации для лиц, принимающих решения, на основе оптимизационных алгоритмов. Предлагаются альтернативные сценарии действий с оценкой их эффективности и потенциальных последствий [6–10].

2.3 Апробация алгоритмов машинного обучения

Для оценки эффективности предложенного подхода проведена апробация алгоритмов машинного обучения на данных о функционировании транспортно-складских узлов одного из регионов Центрального федерального округа.

Исходные данные: 24-месячный массив данных, включающий:

- показатели загрузки транспортных узлов (ежедневно);
- метеорологические данные;
- данные о дорожно-транспортных происшествиях;
- информацию о плановых и внеплановых ремонтах инфраструктуры.

Задача: прогнозирование сбоев в работе транспортно-складского узла (задержки отправки/приемки грузов более 4 часов) с горизонтом 24 часа.

Сравнивались следующие модели:

- логистическая регрессия (базовый уровень);
- случайный лес (Random Forest);
- градиентный бустинг (XGBoost);
- нейросетевая модель (многослойный персептрон);
- LSTM (долгая краткосрочная память) для учета временной динамики.

Результаты апробации представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение эффективности моделей прогнозирования

Модель	Точность (Accuracy)	Полнота (Recall)	F1-мера	Время обучения
1	2	3	4	5
Логистическая регрессия	0,72	0,58	0,64	0,5сек
Random Forest	0,81	0,73	0,77	12 сек
XGBoost	0,84	0,76	0,80	8 сек
Многослойный персептрон	0,83	0,74	0,78	45 сек
LSTM	0,87	0,81	0,84	180 сек

Лучшие результаты показала модель LSTM, что объясняется ее способностью учитывать временную зависимость в данных. Применение данной модели позволило:

- повысить точность прогнозирования сбоев на 21 % по сравнению с базовым уровнем (логистическая регрессия);
- сократить долю ложных срабатываний на 28 %;
- обеспечить заблаговременность предупреждения (в среднем за 8–12 часов до наступления события) [11–15].

3 Эффективность применения искусственного интеллекта в риск-менеджменте РЛС

3.1 Сравнительный анализ традиционных и интеллектуальных подходов

Проведенное исследование позволяет выделить ключевые преимущества применения технологий ИИ в управлении рисками региональных логистических систем (таблица 4).

Таблица 4 – Сравнение традиционного и интеллектуального подходов

Критерий	Традиционный подход	Интеллектуальный подход (ИИ)
1	2	3
Временной горизонт	Ретроспективный анализ	Прогнозирование будущих событий
Скорость обработки данных	Часы/дни	Реальное время / минуты
Учет взаимосвязей рисков	Ограниченный (экспертно)	Полный (на основе данных)
Адаптивность	Низкая (пересмотр регламентов)	Высокая (самообучение моделей)
Объективность	Зависит от эксперта	Основана на данных
Масштабируемость	Трудоемка	Автоматизирована
Стоимость внедрения	Низкая	Средняя/высокая
Операционные затраты	Средние	Низкие (после внедрения)

3.2 Оценка экономического эффекта

Для количественной оценки экономического эффекта от внедрения интеллектуальной системы управления рисками проведен расчет на основе данных пилотного внедрения в региональном логистическом узле.

Исходные параметры:

- среднегодовой грузооборот узла – 1,2 млн тонн;
- средние потери от сбоев в работе (простои, перенаправление потоков) – 8,5 млн руб./год;
- затраты на внедрение интеллектуальной системы – 3,2 млн руб. (единовременно);

• годовые эксплуатационные затраты – 0,8 млн руб.

Результаты внедрения (по данным пилотного периода):

- сокращение времени простоя транспорта – 32 %;
- снижение потерь от сбоев – 41 %;
- уменьшение затрат на ручной мониторинг – 28 %.

Расчет экономического эффекта:

- снижение потерь от сбоев – $8,5 \times 0,41 = 3,485$ млн руб./год;
- экономия операционных затрат – 0,8 млн руб./год (сокращение трудозатрат);
- итого прямой годовой эффект – 4,285 млн руб.;
- срок окупаемости инвестиций – $3,2 / 4,285 \approx 0,75$ года (9 месяцев).

3.3 Барьеры и ограничения внедрения

Несмотря на высокий потенциал, внедрение интеллектуальных систем управления рисками в региональных логистических системах сталкивается с рядом барьеров.

1. Институциональные: отсутствие нормативной базы, регулирующей применение ИИ в логистике; недостаточная координация между региональными органами власти и бизнесом.

2. Технологические: высокая стоимость внедрения для малых и средних предприятий; недостаточная совместимость информационных систем; проблемы с качеством и доступностью данных.

3. Кадровые: дефицит специалистов, владеющих компетенциями в области ИИ и логистики; сопротивление персонала внедрению новых технологий.

4. Этические: вопросы ответственности за решения, принимаемые ИИ-системами; риски кибербезопасности.

Для преодоления указанных барьеров необходима реализация комплекса мер, включающих:

- разработку региональных программ цифровизации логистики;
- создание центров компетенций по ИИ в логистике на базе университетов;
- внедрение механизмов государственно-частного партнерства;
- формирование стандартов и регламентов использования ИИ-систем [16–20].

Заключение

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Актуальность интеллектуализации риск-менеджмента обусловлена возрастающей сложностью и уязвимостью региональных логистических систем в условиях глобальной турбулентности. Традиционные методы управления рисками, основанные на ретроспективном анализе и экспертных оценках, не обеспечивают необходимого уровня проактивности и адаптивности.

2. Технологии искусственного интеллекта открывают новые возможности для трансформации риск-менеджмента, обеспечивая:

- непрерывный мониторинг состояния РЛС в режиме реального времени;
- выявление скрытых закономерностей и ранних признаков рисков событий;
- прогнозирование сбоев с высокой точностью и заблаговременностью;
- формирование обоснованных рекомендаций для принятия решений.

3. Предложенная концептуальная архитектура интеллектуальной системы управления рисками включает четыре взаимосвязанных модуля (мониторинг, прогнозирование, оценка, реагирование) и обеспечивает замкнутый цикл управления.

4. Апробация алгоритмов машинного обучения на данных регионального транспортно-складского узла показала, что модель LSTM позволяет прогнозировать сбои с точностью 87 % и полнотой 81 %, что превышает показатели традиционных методов на 20–25 %.

5. Экономическая эффективность внедрения интеллектуальной системы подтверждена расчетами: снижение потерь от сбоев достигает 40 %, срок окупаемости инвестиций составляет менее одного года.

6. Перспективные направления дальнейших исследований включают:

- разработку методов интеграции разнородных источников данных для формирования единого информационного пространства РЛС;
- создание цифровых двойников региональных логистических систем для стресс-тестирования и сценарного моделирования;
- исследование возможностей применения технологий распределенного реестра (блокчейн) для обеспечения прозрачности и доверия в управлении рисками;
- развитие нормативной базы и стандартов применения ИИ в логистике.

Таким образом, интеллектуализация риск-менеджмента региональных логистических систем на основе технологий искусственного интеллекта представляет собой перспективное направление, способствующее повышению устойчивости, эффективности и конкурентоспособности региональной логистической инфраструктуры.

Список цитированных источников

1. Choi, T. M. Big Data Analytics in Operations Management / T. M. Choi, S. W. Wallace, Y. Wang // Production and Operations Management. – 2018. – Vol. 27, No. 10. – P. 1868–1883.
2. Christopher, M. Building the Resilient Supply Chain / M. Christopher, H. Peck // The International Journal of Logistics Management. – 2004. – Vol. 15, No. 2. – P. 1–14.
3. Goodfellow, I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – MIT Press, 2016. – 800 p.
4. Ivanov, D. Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability / D. Ivanov, A. Dolgui // International Journal of Production Research. – 2020. – Vol. 58, No. 10. – P. 2904–2915.
5. Аникин, Б. А. Логистика и управление цепями поставок: теория и практика / Б. А. Аникин, Т. А. Родкина. – М. : Проспект, 2023. – 608 с.
6. Бочкарев, А. А. Цифровая трансформация логистики: технологии, модели, практики / А. А. Бочкарев, П. А. Бочкарев. – М. : Инфра-М, 2022. – 312 с.
7. Глазьев, С. Ю. Рынок в будущее. Россия в новых технологическом и мирохозяйственном укладах / С. Ю. Глазьев. – М. : Книжный мир, 2021. – 768 с.

8. Канке, А. А. Искусственный интеллект в логистике: вызовы и перспективы / А. А. Канке, И. П. Кошечая // Логистика и управление цепями поставок. – 2023. – № 2. – С. 23–35.
9. Лукинский, В. С. Управление рисками в логистике и цепях поставок / В. С. Лукинский, В. В. Лукинский. – СПб. : СПбГИЭУ, 2021. – 256 с.
10. ISO 31000 : Международный стандарт. – URL: [https://pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-31000-2018-\(rus\).pdf](https://pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-31000-2018-(rus).pdf) (дата обращения: 31.03.2026).
11. Троицкая, Н. Н. Управление рисками инвестиционного проекта / Н. Н. Троицкая // Индустриальная экономика. – 2020. – № 2. – С. 27–31.
12. Хвиевич, Н. Ю. Влияние деловых качеств специалиста на блокирование или нейтрализацию рисков / Н. Ю. Хвиевич, Е. Л. Шишко // Теория и практика в условиях меняющегося глобального рынка : сб. науч. статей Междунар. межвузовской науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 13–14 декабря 2024 г. – СПб. : Изд-во СПбЦСА, 2024. – С. 413–416.
13. Шишко, Е. Л. Конкурентоспособность предприятий и внешние макроэкономические риски // Л. П. Зенькова, Е. Л. Шишко // Наука и инновации. – Минск, 2020. – № 7. – С. 61–66.
14. Шишко, Е. Л. Конкурентоспособность предприятий и внешние макроэкономические риски / Е. Л. Шишко, Л. П. Зенькова // Наука и инновации. – 2020. – № 7. – С. 61–66.
15. Шишко, Е. Л. Риск как фактор экономического развития деятельности хозяйствующих субъектов / Е. Л. Шишко // Экономические и финансовые механизмы инновационного развития цифровой экономики : сб. науч. статей : в 2 ч. / под науч. ред. В. В. Пузикова, М. Л. Зеленкевич. – Минск : Институт бизнеса БГУ, 2019. – Ч. 1. – С. 311–316.
16. Шишко, Е. Л. Риски в логистических системах: региональный аспект / Е. Л. Шишко, Л. П. Зенькова. – Минск : ИВЦ Минфина, 2020. – 195 с.
17. Шишко, Е. Л. Риск-менеджмент как эффективный инструмент управления предприятием / Е. Л. Шишко // Интеграция науки и образования как основа эволюции Евразийского экономического союза : сб. ст. из материалов Евразийского научного форума, Санкт-Петербург, 8 дек. 2017 г. / под общ. науч. ред. М. Ю. Спириной. – СПб. : Ун-т при МПА ЕврАзЭС, 2018. – Ч. 4. – С. 334–341.
18. Шишко, Е. Л. Устойчивость логистической системы региона в условиях цифровой трансформации / Е. Л. Шишко // Бизнес. Образование. Экономика : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Минск, 1–2 апр. 2020 г. / редкол.: В. В. Манкевич [и др.]. – Минск : Институт бизнеса БГУ, 2020. – С. 179–183.
19. Шишко, Е. Л. Риск как неотъемлемый элемент теоретических проблем современной логистики / Е. Л. Шишко // Логистика: Современные тенденции развития: материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. 4–5 апреля 2024г. / отв. ред. В. С. Лукинский. – СПб. : Изд-во ГУМРФ им. Адм. С.О. Макарова, 2024. – Ч. 2. – С. 302–309.
20. Шишко, Е. Л. Управление рисками в региональных логистических системах / Е. Л. Шишко. – Минск : ИВЦ Минфина, 2022. – 200 с.
4. Ivanov, D. Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability / D. Ivanov, A. Dolgui // International Journal of Production Research. – 2020. – Vol. 58, No. 10. – P. 2904–2915.
5. Anikin, B. A. Logistika i upravlenie cepyami postavok: teoriya i praktika / B. A. Anikin, T. A. Rodkina. – M. : Prospekt, 2023. – 608 s.
6. Bochkarev, A. A. Cifrovaya transformaciya logistiki: tekhnologii, modeli, praktiki / A. A. Bochkarev, P. A. Bochkarev. – M. : Infra-M, 2022. – 312 s.
7. Glaz'ev, S. YU. Ryvok v budushchee. Rossiya v novykh tekhnologicheskoy i mirohozyajstvennom ukladah / S. YU. Glaz'ev. – M. : Knizhnyy mir, 2021. – 768 s.
8. Kanke, A. A. Iskusstvennyy intellekt v logistike: vyzovy i perspektivy / A. A. Kanke, I. P. Koshevaya // Logistika i upravlenie cepyami postavok. – 2023. – № 2. – С. 23–35.
9. Lukinskij, V. S. Upravlenie riskami v logistike i cepyah postavok / V. S. Lukinskij, V. V. Lukinskij. – SPb. : SPbGIEU, 2021. – 256 s.
10. ISO 31000 : Mezhdunarodnyy standart. – URL: [https://pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-31000-2018-\(rus\).pdf](https://pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-31000-2018-(rus).pdf) (data obrashcheniya: 31.03.2026).
11. Troickaya, N. N. Upravlenie riskami investicionnogo proekta / N. N. Troickaya // Industrial'naya ekonomika. – 2020. – № 2. – С. 27–31.
12. Hvisevich, N. YU. Vliyanie delovykh kachestv specialista na blokirovaniye ili nejtralizaciyu riskov / N. YU. Hvisevich, E. L. SHishko // Teoriya i praktika v usloviyakh menyayushchegosya global'nogo rynka : sb. nauch. statej Mezhdunar. mezhvuzovskoj nauch.-prakt. konf., Sankt-Peterburg, 13–14 dekabrya 2024 g. – SPb. : Izd-vo SPbCSA, 2024. – С. 413–416.
13. SHishko, E. L. Konkurentosposobnost' predpriyatij i vneshnie makroekonomicheskie riski // L. P. Zen'kova, E. L. SHishko // Nauka i innovacii. – Minsk, 2020. – № 7. – С. 61–66.
14. SHishko, E. L. Konkurentosposobnost' predpriyatij i vneshnie makroekonomicheskie riski / E. L. SHishko, L. P. Zen'kova // Nauka i innovacii. – 2020. – № 7. – С. 61–66.
15. SHishko, E. L. Risk kak faktor ekonomicheskogo razvitiya deyatel'nosti hozyajstvuyushchih sub'ektov / E. L. SHishko // Ekonomicheskie i finansovy mekhanizmy innovacionnogo razvitiya cifrovoy ekonomiki : sb. nauch. statej : v 2 ch. / pod nauch. red. V. V. Puzikova, M. L. Zelenkevich. – Minsk : Institut biznesa BGU, 2019. – CH. 1. – С. 311–316.
16. SHishko, E. L. Riski v logisticheskikh sistemah: regional'nyj aspekt / E. L. SHishko, L. P. Zen'kova. – Minsk : IVC Minfina, 2020. – 195 s.
17. SHishko, E. L. Risk-menedzhment kak effektivnyy instrument upravleniya predpriyatiem / E. L. SHishko // Integraciya nauki i obrazovaniya kak osnova evolyucii Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza : sb. st. iz materialov Evrazijskogo nauchnogo foruma, Sankt-Peterburg, 8 dek. 2017 g. / pod obshch. nauch. red. M. YU. Spirinoj. – SPb. : Un-t pri MPA EvrAzES, 2018. – CH. 4. – С. 334–341.
18. SHishko, E. L. Ustojchivost' logisticheskoy sistemy regiona v usloviyakh cifrovoy transformacii / E. L. SHishko // Biznes. Obrazovanie. Ekonomika : sb. st. mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 1–2 apr. 2020 g. / redkol.: V. V. Mankevich [i dr.]. – Minsk : Institut biznesa BGU, 2020. – С. 179–183.
19. SHishko, E. L. Risk kak neot'emlemyy element teoreticheskikh problem sovremennoj logistiki / E. L. SHishko // Logistika: Sovremennyye tendencii razvitiya: materialy XXIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 4–5 aprelya 2024g. / otv. red. V. S. Lukinskij. – SPb. : Izd-vo GUMRF im. Adm. S.O. Makarova, 2024. – CH. 2. – С. 302–309.
20. SHishko, E. L. Upravlenie riskami v regional'nykh logisticheskikh sistemah / E. L. SHishko. – Minsk : IVC Minfina, 2022. – 200 s.

References

1. Choi, T. M. Big Data Analytics in Operations Management / T. M. Choi, S. W. Wallace, Y. Wang // Production and Operations Management. – 2018. – Vol. 27, No. 10. – P. 1868–1883.
2. Christopher, M. Building the Resilient Supply Chain / M. Christopher, H. Peck // The International Journal of Logistics Management. – 2004. – Vol. 15, No. 2. – P. 1–14.
3. Goodfellow, I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – MIT Press, 2016. – 800 p.

Материал поступил 31.03.2026, одобрен 28.04.2026, принят к публикации 28.04.2026

УДК 338.242.2

МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В РЕГИОНАЛЬНЫХ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Е. Л. Шишко

Старший преподаватель кафедры экономической теории и логистики, УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь, e-mail: aljonaschischko@mail.ru

Реферат

В статье рассматривается механизм управления рисками в региональных логистических системах как важнейший инструмент обеспечения их устойчивости, надежности и адаптивности к изменениям внешней среды. Актуальность темы обусловлена ростом неопределенности в экономике, усилением конкуренции между регионами, усложнением логистических цепей и необходимостью минимизации потерь, возникающих в процессе движения материальных, информационных и финансовых потоков. Региональная логистическая система функционирует в условиях воздействия множества факторов риска, включая инфраструктурные ограничения, транспортные сбои, колебания спроса, финансовую нестабильность и внешние шоки.

В статье раскрывается сущность риска в логистике, а также рассматриваются основные этапы управления рисками: идентификация, анализ, оценка, выбор методов воздействия и контроль результатов. Подчеркивается, что эффективный механизм управления рисками должен носить системный характер и включать не только выявление угроз, но и формирование комплекса превентивных и корректирующих мер. Особое внимание уделяется необходимости интеграции риск-менеджмента в общую систему управления региональной логистикой, поскольку именно такой подход позволяет своевременно реагировать на отклонения, повышать устойчивость логистических процессов и снижать вероятность возникновения критических последствий.

Механизм управления рисками в региональных логистических системах должен основываться на сочетании организационных, экономических и информационных инструментов. К числу наиболее значимых относятся мониторинг рисков, диверсификация поставок, резервирование ресурсов, повышение гибкости логистических схем, развитие информационно-аналитической поддержки и совершенствование взаимодействия между участниками логистической цепи. Отмечается, что важную роль играет использование современных цифровых технологий, позволяющих повышать прозрачность процессов и качество управленческих решений.

Ключевые слова: риск, риск-менеджмент, управление, региональная логистическая система, логистический риск-барометр, куб управления рисками, методика оценки рисков.

RISK MANAGEMENT MECHANISM IN REGIONAL LOGISTICS SYSTEMS

E. L. Shishko

Abstract

This article examines risk management mechanisms in regional logistics systems as a critical tool for ensuring their sustainability, reliability, and adaptability to environmental changes. The relevance of this topic is driven by growing economic uncertainty, intensifying competition between regions, increasingly complex supply chains, and the need to minimize losses arising from the movement of materials, information, and financial flows. Regional logistics systems operate under the influence of multiple risk factors, including infrastructure constraints, transportation disruptions, demand fluctuations, financial instability, and external shocks.

This article explores the essence of risk in logistics and examines the key stages of risk management: identification, analysis, assessment, selection of intervention methods, and results monitoring. It emphasizes that an effective risk management mechanism must be systemic and include not only the identification of threats but also the development of a set of preventive and corrective measures. Particular attention is paid to the need to integrate risk management into the overall regional logistics management system, as this approach allows for a timely response to deviations, increased resilience of logistics processes, and a reduction in the likelihood of critical consequences.

Risk management mechanisms in regional logistics systems should be based on a combination of organizational, economic, and informational tools. The most significant include risk monitoring, supply diversification, resource reservation, increased flexibility of logistics schemes, development of information and analytical support, and improved interaction between logistics chain participants. It is noted that the use of modern digital technologies plays a significant role, allowing for increased process transparency and the quality of management decisions.

Keywords: risk, risk management, management, regional logistics system, logistics risk barometer, risk management cube, risk assessment methodology.

Введение

В современных условиях неопределенности и высокой динамики внешней среды вопросы управления рисками приобретают особую значимость для функционирования региональных логистических систем. Усиление конкуренции между регионами, усложнение хозяйственных связей, рост требований к скорости и надежности доставки материальных ресурсов, а также влияние экономических, технологических и инфраструктурных факторов формируют необходимость разработки эффективных механизмов идентификации, оценки и минимизации рисков в логистике. Именно поэтому исследование механизма управления рисками в региональных логистических системах является актуальным как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Региональная логистическая система представляет собой сложную совокупность взаимосвязанных элементов, обеспечивающих движение материальных, информационных и финансовых потоков в пределах определенной территории. В процессе ее функционирования возникают разнообразные риски, связанные с нарушением поставок, изменением спроса, транспортными сбоями, финансовой нестабильностью, недоста-

точной координацией участников логистической цепи и другими внешними и внутренними факторами. Наличие таких рисков снижает устойчивость системы, увеличивает издержки и может негативно отражаться на эффективности региональной экономики в целом.

В связи с этим особую актуальность приобретает формирование механизма управления рисками, основанного на системном подходе и включающего этапы выявления, анализа, оценки, мониторинга и нейтрализации рисков факторов. Такой механизм должен обеспечивать не только своевременное реагирование на возникающие угрозы, но и создание условий для предупреждения их возникновения. Это предполагает использование организационных, экономических и информационных инструментов, направленных на повышение устойчивости логистических процессов и адаптивности региональной системы к изменениям внешней среды.

Целью статьи является рассмотрение механизма управления рисками в региональных логистических системах и определение его роли в обеспечении устойчивости и эффективности логистических процессов. Для достижения поставленной цели необходимо раскрыть

сущность понятийно-категориального аппарата управления рисками в региональных логистических системах, обосновать авторский методологический подход к оценке рисков в логистической системе региона, разработать методику оценки рисков в логистических системах регионов с учетом региональных особенностей, а также провести адаптацию модели «куба» управления рисками к особенностям региональной логистической системы.

Таким образом, исследование механизма управления рисками в региональных логистических системах позволяет сформировать научно обоснованный подход к повышению надежности логистической инфраструктуры, снижению негативных последствий рисков событий и обеспечению устойчивого развития региона.

Риски в региональных логистических системах

Для достижения поставленной цели в настоящем исследовании необходимо последовательно решить ряд взаимосвязанных задач, формирующих методологическую основу анализа и совершенствования управления рисками в региональных логистических системах. В первую очередь, требуется уточнить понятийно-категориальный аппарат, раскрывающий содержание риска, региональной логистической системы, механизма управления рисками и устойчивости логистических процессов, поскольку именно терминологическая определенность задаст корректные рамки дальнейшего научного анализа. Без четкого разграничения данных категорий невозможно выстроить целостную модель исследования и обосновать прикладные выводы, имеющие значение для региональной экономики и логистической практики.

1. Развитие понятийно-категориального аппарата управления рисками в региональных логистических системах, включающее:

а) уточнение экономической категории «риск» применительно к последовательности принятия решений субъектом логистической деятельности. Под риском предлагается понимать возможность наступления исхода события, характеризующуюся различной степенью отклонения фактического результата от поставленных целей и задач. Риск трактуется как возможность, на характер и качество реализации которой субъект управления способен оказывать воздействие для достижения целевой эффективности функционирования системы любого уровня. Предложенное определение отличается универсальностью (свободно от отраслевой специфики), логической непротиворечивостью, самодостаточностью (не требует дополнительных оговорок) и нейтральностью (лишено субъективных эмоциональных оценок);

б) введение понятия «логистический риск-барометр» – инструмента прогнозирования изменения условий функционирования логистической системы региона на основе анализа системы взаимосвязанных показателей. В рамках данного инструмента аналогом «давления» выступает информационный поток, поступающий в регион: перед ухудшением экономической конъюнктуры объем релевантной информации, сокращается, перед её улучшением – возрастает, что проявляется в отклонениях между фактическими, прогнозными и плановыми результатами движения потоков. Структура «логистического риск-барометра» включает три группы индикаторов: опережающие (обеспечивают своевременное вмешательство и коррекцию), совпадающие (отражают текущее состояние системы) и запаздывающие (служат для постфактум-констатации достижения целей). Отличительными особенностями понятия являются: преодоление теоретического разрыва между категориальным аппаратом и содержательной диагностикой рисков; учёт специфики регионального экономического пространства; ориентация на использование доступных и устойчивых к сбоям индикаторов;

в) адаптация понятия «куб управления рисками региональной логистической системы» – механизма, интегрирующего стадии учёта, анализа, оценки, прогнозирования и предупреждения рисков различной природы и обеспечивающего выработку оптимальных корректирующих мероприятий. «Куб» представляет собой модель-визуализатор, реализующую оперативную аналитическую обработку многомерных данных в условиях региона. В основе адаптации лежит многомерная модель данных логистической системы с разделением на «измерения» (оси куба, ребра) и «факты» (ячейки на пересечении значений измерений). Отличительными особенностями являются: декомпозиция сложных многомерных задач в совокупность одномерных; реализация концептуально простых операций (извлечение подмножеств ячеек, формирование подкубов по релевантным измерениям, агрегирование данных); наглядная визуализация многомерных взаимосвязей.

В результате уточнения понятийно-категориального аппарата выделены два теоретических подхода к трактовке риска (как дей-

ствия в условиях выбора и как комплекса условий, связанных с опасностью); осуществлён синтез разрозненных исследований, описывающих отдельные стадии принятия решений в управлении рисками; обоснован вывод о возможности (хотя и ограниченной) управления рисками посредством их количественного измерения и выявления зон повышенного риска.

Следующим этапом является обоснование авторского методологического подхода к оценке рисков в логистической системе региона. Его необходимость обусловлена тем, что традиционные подходы к риск-менеджменту не в полной мере учитывают территориальную специфику, неоднородность инфраструктурного развития, различия в отраслевой структуре экономики и особенности взаимодействия участников региональной логистики. В этой связи особое значение приобретает разработка такой методики, которая позволяла бы не только фиксировать наличие рисков, но и количественно оценивать их уровень, сопоставлять регионы между собой и выявлять наиболее уязвимые элементы логистической системы.

2. Обоснование авторского методологического подхода к оценке рисков в логистической системе региона, учитывающего специфику регионального экономического пространства, наличие различных пространственно-временных периодов отставленной (латентной) реакции логистической системы на опасные воздействия, пролонгированный (длительный) характер влияния факторов риска на все звенья логистической системы. В отличие от существующих подходов, авторская методология базируется на учёте фактора времени как в период действия рискового фактора, так и в период наступления реакции системы; дифференциации уровня риска в зависимости от специфических особенностей региона оказания логистических услуг, для чего разработана авторская типология регионов («Центр», «Бицентр», «Полупериферия», «Периферия») с соответствующей градацией степени риска. Данный подход позволил обосновать тактику «навигирования» региональных логистических систем между воздействиями различных рисков с учётом их длительности, интенсивности и латентного периода ответной реакции; скорректировать комплексный показатель эффективности логистической системы с учётом динамичности и нелинейности её результатов (сопоставление распределённых во времени результатов с затратами с учётом лага запаздывания реакции экономики на рисковые воздействия).

Далее требуется разработать методику оценки рисков в логистических системах регионов с учетом их специфических особенностей. Такая методика должна опираться на систему взаимосвязанных показателей, отражающих состояние материальных, транспортных, инфраструктурных, финансовых и организационных компонентов логистики, а также обеспечивать возможность интегральной интерпретации полученных результатов. Особое внимание при этом должно быть уделено формированию критериев, позволяющих учитывать как внутренние характеристики региона, так и воздействие внешней среды.

3. Разработка методики оценки рисков в логистических системах регионов с учётом региональных особенностей, основанной на применении авторского «фильтра» рисков региональной логистической системы. В отличие от иных методик, предложенный подход позволяет: вычленив наиболее существенные (критические) риски и упредить время их воздействия; идентифицировать группу рисков макроэкономического характера, к которым логистическая система может адаптироваться, но не способна ими управлять; дифференцировать ожидаемый ущерб от реализации риска в зависимости от специфики региона осуществления логистических услуг.

Завершающим этапом выступает адаптация модели «куба» управления рисками к особенностям региональной логистической системы. Данный подход позволяет структурировать процесс управления рисками по нескольким взаимодополняющим измерениям, обеспечивая более глубокое понимание факторов риска, механизмов их проявления и управленческих инструментов воздействия. Адаптация модели к региональной логистике делает возможным ее использование не только в теоретическом, но и в прикладном аспекте, что особенно важно для формирования устойчивой системы управления логистическими рисками на уровне региона.

4. Адаптация модели «куба» управления рисками к особенностям региональной логистической системы, которая, в отличие от известных аналогов, включает возможность корректировки оценочной величины рисков во всех логистических звеньях с учётом специфики конкретного региона, комбинирование вербальной (качественной) и математической (количественной) оценки рисков, учёт

продолженной реакции логистической системы на воздействующие факторы, а также фактора времени в ответе системы на корректирующие управленческие воздействия. Адаптированная модель позволяет дифференцированно проводить мониторинг последствий применённых корректирующих воздействий на логистические цепи, оценивать эффективность реализованных мер управления рисками. Таким образом, последовательное решение указанных задач создаст методологическую и практическую основу для формулирования научных положений, выносимых на защиту. В совокупности это позволяет не только углубить теоретические представления о природе рисков в региональных логистических системах, но и предложить инструментарий, ориентированный на повышение их устойчивости, адаптивности и эффективности функционирования.

Заключение

Формирование эффективного механизма управления рисками является необходимым условием устойчивого развития региональных логистических систем. Его внедрение способствует снижению уязвимости логистической инфраструктуры, повышению надёжности транспортно-складских операций и обеспечению стабильности региональной экономики в целом. Таким образом, статья имеет теоретическую и практическую значимость, а представленные положения могут быть использованы при разработке региональных программ развития логистики и систем управления рисками.

1. В результате проведённых теоретических и эмпирических исследований уточнён понятийно-категориальный аппарат, связанный с функционированием логистических систем, что составило теоретическую основу дальнейшего анализа и моделирования процессов управления рисками в региональных логистических системах.

В рамках указанного уточнения:

а) разработано авторское определение экономической категории «риск», под которым предлагается понимать возможность наступления исхода события, характеризующуюся различной степенью отклонения фактического результата от поставленных целей и задач. Данная трактовка интегрирует как вероятностную, так и результативно-целевую составляющие риска;

б) введено понятие «логистический риск-барометр», трактуемое как инструмент прогнозирования изменения условий функционирования логистической системы региона на основе анализа системы взаимосвязанных показателей. Предложенный инструмент обеспечивает возможность раннего выявления негативных тенденций и своевременной корректировки управленческих воздействий;

в) адаптировано понятие «куб управления рисками региональной логистической системы», понимаемый как механизм, интегрирующий стадии учёта, анализа, оценки и предупреждения рисков различной природы и способствующий выработке оптимальных корректирующих мероприятий. Данная модель-визуализатор обеспечивает функциональность оперативной аналитической обработки данных в условиях конкретного региона;

Предложенное уточнение понятийно-категориального аппарата позволило:

а) выделить два основных теоретических подхода к трактовке категории «риск», сложившихся в экономической науке: первый подход рассматривает риск как действие в условиях выбора при принятии решений, второй подход связывает риск с комплексом условий, предполагающих возможность наступления опасности;

б) осуществить синтез разрозненных исследований экономистов, фактически описывавших лишь отдельные стадии формирования и принятия решений в процессе управления рисками в логистических системах. Предложенный интегративный подход позволяет преодолеть фрагментарность существующих теоретических построений;

в) обосновать вывод о том, что посредством количественного измерения риска и выявления сфер его повышенного значения становится возможным (хотя и в ограниченной степени) эффективное управление рисками в логистических системах регионального уровня [1–10].

2. Обоснован авторский методологический подход к оценке рисков в логистической системе региона, учитывающий специфику регионального экономического пространства, наличие различных пространственно-временных периодов отставленной (латентной) реакции логистической системы на опасные воздействия, а также пролонгированный характер влияния факторов риска на все звенья логистической системы.

В рамках данного подхода разработана авторская модель дифференциации регионов, классифицирующая их по уровню развития

логистической системы и соответствующей степени риска на четыре типа: «Центр», «Бицентр», «Полупериферия», «Периферия». Предложенная типология позволяет учитывать специфические особенности каждого региона при оказании логистических услуг и дифференцированно подходить к оценке ожидаемых рисков.

Обоснована необходимость модификации комплексного показателя эффективности логистической системы с учётом динамичности и нелинейности проявления её результатов функционирования. В отличие от традиционных подходов, предполагающих одномерное сопоставление результата (объёма) с затратами (расходами), предлагается распределённое во времени сопоставление с учётом периода (лага) запаздывания реакции экономики на воздействие рисков на логистическую систему.

Разработанный методологический подход позволил:

а) учесть фактор времени как в период действия рискового фактора, так и в период наступления ответной реакции логистической системы;

б) дифференцировать уровень риска в зависимости от специфических особенностей региона оказания логистических услуг, для чего применена разработанная модель типологизации регионов.

в) обеспечить возможность лавирования региональных логистических систем между воздействиями различных рисков с учётом их неоднородных характеристик: длительности воздействия, интенсивности проявления и латентного периода ответной реакции;

Данный подход создаёт теоретико-методологическую основу для выработки обоснованных управленческих решений, адаптированных к конкретным условиям функционирования логистической системы региона [14, 15, 17, 19].

3. Разработана методика оценки рисков в логистических системах с учётом региональных особенностей, включающая возможность применения авторского «фильтра» рисков региональной логистической системы. Предложенная методика позволяет осуществлять селекцию рисков по степени их значимости и управляемости, что создаёт основу для принятия обоснованных управленческих решений. Апробация разработанной методики проведена на регионах Брестской области. Результаты апробации подтвердили её практическую применимость и позволили:

а) вычленив наиболее существенные виды рисков, характерные для логистических систем региона: транспортные риски, торговые риски, финансовые риски, риски связи, риски услуг. Для каждого из идентифицированных видов рисков определена возможность предупреждения времени их воздействия на основе разработанного инструментария раннего предупреждения;

б) выделить группу рисков макроэкономического характера, к которым логистические системы могут адаптироваться, но не способны ими управлять. К указанной группе отнесены: доля инвестиций в основной капитал в ВВП, налоговая нагрузка на экономику, концентрация производства и капитала в определённой сфере экономики, уровень инфляции, колебания валютного курса, валовой внешний долг по отношению к ВВП;

в) дифференцировать ожидаемый урон от реализации риска в зависимости от специфики региона оказания логистических услуг, что достигается за счёт применения разработанной типологии регионов («Центр», «Бицентр», «Полупериферия», «Периферия») и соответствующих корректирующих коэффициентов.

Таким образом, предложенная методика обеспечивает комплексный подход к идентификации, оценке и дифференциации рисков в региональных логистических системах, создавая основу для выработки адаптированных к конкретным условиям управленческих решений [11–19].

4. Адаптирована к особенностям региональной логистической системы модель управления рисками («куб» управления рисками логистической системы), представляющая собой механизм, интегрирующий стадии учёта, анализа, оценки и предупреждения рисков различной природы, а также выработки корректирующих мероприятий.

Предложенная адаптация обеспечивает следующие возможности:

а) комбинирование вербальной и математической составляющих процесса оценки и управления риском, что позволяет сочетать качественный анализ с количественными методами расчёта и повышает обоснованность принимаемых решений;

б) учёт пролонгированной (длительной) реакции логистической системы на воздействующий фактор, что особенно важно в условиях инерционности логистических процессов и необходимости заблаговременного планирования управленческих воздействий;

в) учёт фактора времени в ответе системы на корректирующее управленческое воздействие, включая оценку лага запаздывания между реализацией меры и наступлением ожидаемого эффекта.

Таким образом, адаптированная модель «куба» управления рисками создаёт методологическую основу для комплексного, многофакторного и временного анализа рисков, обеспечивая возможность своевременной выработки и реализации эффективных корректирующих мероприятий в условиях конкретного региона.

Список цитированных источников

- Шкурко, В. Е. Управление рисками проектов / В. Е. Шкурко. – Екатеринбург : Урал. ун-т, 2014. – 184 с.
- Грачев, С. А. Оценка и управление рисками : учеб. пособие / С. А. Грачев, М. А. Гундорова ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – 2-е изд., испр. и доп. – Владимир : ВлГУ, 2020. – 287 с.
- Деминг, Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Эдвардс Деминг ; пер. с англ.: Ю. Адлер, В. Шперед, Н. В. Величко. – М. : Альпина Бизнес обзрение, 2007. – 147 с.
- Репкина, О. Б. Предпринимательская деятельность в условиях риска / О. Б. Репкина // Путеводитель предпринимателя. – 2011. – № 10. – С. 238–243.
- Троицкая, Н. Н. Проблема диагностики рисков при разработке инвестиционного проекта / Н. Н. Троицкая // Путеводитель предпринимателя : сб. науч. тр. / Российская Академия предпринимательства. – М., 2018. – Вып. XXXVIII. – С. 171–177.
- Троицкая, Н. Н. Управление рисками инвестиционного проекта / Н. Н. Троицкая // Индустриальная экономика. – Вологда, 2020. – С. 27–31.
- Международный стандарт ISO 31000. – URL: <https://pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-31000-2018-rus.pdf> (дата обращения: 12.02.2025).
- Шумпетер, И. А. Теория экономического развития. Капитализм, социализм и демократия / И. А. Шумпетер ; пер. с нем. – М. : Эксмо, 2008. – 864 с.
- Мальцев, А. А. Глобальные мета-риски в постковидную эру / А. А. Мальцев // Вестник Института экономики Российской академии наук, 2024. – № 1. – С. 124–137.
- Мальцева, А. П. Профессиональный стресс как фактор риска врачебной деятельности / А. П. Мальцева // Перм. мед. журн. – 2006. – № 1. – С. 17–19.
- Шишко, Е. Л. Риск-менеджмент как эффективный инструмент управления предприятием / Е. Л. Шишко // Интеграция науки и образования как основа эволюции Евразийского экономического союза : сб. ст. из материалов Евразийского научного форума, Санкт-Петербург, 8 дек. 2017 г. / под общ. науч. ред. М. Ю. Спириной. – СПб. : Ун-т при МПА ЕврАзЭС, 2018. – Ч. 4. – С. 334–341.
- Шишко, Е. Л. Устойчивость логистической системы региона в условиях цифровой трансформации / Е. Л. Шишко // Бизнес. Образование. Экономика : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Минск, 1–2 апр. 2020 г. / редкол.: В. В. Манкевич [и др.]. – Минск : Институт бизнеса БГУ, 2020. – С. 179–183.
- Шишко, Е. Л. Риск как неотъемлемый элемент теоретических проблем современной логистики / Е. Л. Шишко // Логистика. Современные тенденции развития : материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. 4–5 апр. 2024 г. / отв. ред. В. С. Лукинский. – СПб. : ГУМРФ им. Адм. С. О. Макарова, 2024. – Ч. 2. – С. 302–309.
- Шишко, Е. Л. Управление рисками в региональных логистических системах / Е. Л. Шишко. – Минск : ИВЦ Минфина, 2022. – 200 с.
- Хвисевич, Н. Ю. Влияние деловых качеств специалиста на блокирование или нейтрализацию рисков / Н. Ю. Хвисевич, Е. Л. Шишко // Теория и практика в условиях меняющегося глобального мира : сб. науч. статей Междунар. межвуз. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 13–14 декабря 2024 г. – СПб. : СПбЦА, 2024. – С. 413–416.
- Шишко, Е. Л. Конкурентоспособность предприятий и внешние макроэкономические риски / Е. Л. Шишко, Л. П. Зенькова // Наука и инновации. – 2020. – № 7. – С. 61–66.
- Шишко, Е. Л. Риск как фактор экономического развития деятельности хозяйствующих субъектов / Е. Л. Шишко // Экономические и финансовые механизмы инновационного развития цифровой экономики : сб. науч. ст. ; в 2 ч. / под науч. ред. В. В. Пузикова, М. Л. Зеленкевич. – Минск : Институт бизнеса БГУ, 2019. – Ч. 1. – С. 311–316.
- Шишко, Е. Л. Риски в логистических системах: региональный аспект / Е. Л. Шишко, Л. П. Зенькова. – Минск : ИВЦ Минфина, 2020. – 195 с.
- Шишко, Е. Л. Управление рисками в региональных логистических системах с помощью искусственного интеллекта / Е. Л. Шишко // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Экономика. – 2025. – № 1. – С. 236–240.

References

- SHkurko, V. E. Upravlenie riskami projektov / V. E. SHkurko. – Ekaterinburg : Ural. un-t, 2014. – 184 s.
- Grachev, S. A. Ocenka i upravlenie riskami : ucheb. posobie / S. A. Grachev, M. A. Gundorova ; Vladim. gos. un-t im. A. G. i N. G. Stoletovyh. – 2-e izd., ispr. i dop. – Vladimir : VIGU, 2020. – 287 s.
- Deming, E. Vyhod iz krizisa: Novaya paradigma upravleniya lyud'mi, sistemami i processami / Edvards Deming ; per. s angl.: YU. Adler, V. SHpered, N. V. Velichko. – M. : Al'pina Biznes obzrenie, 2007. – 147 s.
- Repkina, O. B. Predprinimatel'skaya deyatel'nost' v usloviyah riska / O. B. Repkina // Putevoditel' predprinimatel'ya. – 2011. – № 10. – S. 238–243.
- Troickaya, N. N. Problema diagnostiki riskov pri razrabotke investitsionnogo projekta / N. N. Troickaya // Putevoditel' predprinimatel'ya : sb. nauch. tr. / Rossiyskaya Akademiya predprinimatel'stva. – M., 2018. – Vyp. HKHKHVIll. – S. 171–177.
- Troickaya, N. N. Upravlenie riskami investitsionnogo projekta / N. N. Troickaya // Industrial'naya ekonomika. – Vologda, 2020. – S. 27–31.
- Mezhdunarodnyy standart ISO 31000. – URL: <https://pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-31000-2018-rus.pdf> (data obrashcheniya: 12.02.2025).
- SHumpeter, J. A. Teoriya ekonomicheskogo razvitiya. Kapitalizm, socializm i demokratiya / J. A. SHumpeter ; per. s nem. – M. : Eksmo, 2008. – 864 s.
- Mal'cev, A. A. Global'nye meta-riski v postkovidnuyu eru / A. A. Mal'cev // Vestnik Instituta ekonomiki Rossijskoj akademii nauk, 2024. – № 1. – S. 124–137.
- Mal'ceva, A. P. Professional'nyy stress kak faktor riska vrachebnoj deyatel'nosti / A. P. Mal'ceva // Perm. med. zhurn. – 2006. – № 1. – S. 17–19.
- SHishko, E. L. Risk-menedzhment kak effektivnyy instrument upravleniya predpriyatiem / E. L. SHishko // Integraciya nauki i obrazovaniya kak osnova evolyucii Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza : sb. st. iz materialov Evrazijskogo nauchnogo foruma, Sankt-Peterburg, 8 dek. 2017 g. / pod obshch. nauch. red. M. YU. Spirinoj. – SPb. : Un-t pri MPA EvrAzES, 2018. – CH. 4. – S. 334–341.
- SHishko, E. L. Ustoichivost' logisticheskoy sistemy regiona v usloviyah cifrovoj transformacii / E. L. SHishko // Biznes. Obrazovanie. Ekonomika : sb. st. mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 1–2 apr. 2020 g. / redkol.: V. V. Mankevich [i dr.]. – Minsk : Institut biznesa BGU, 2020. – S. 179–183.
- SHishko, E. L. Risk kak neot'emlemyj element teoreticheskikh problem sovremennoj logistiki / E. L. SHishko // Logistika. Sovremennyye tendencii razvitiya : materialy XXIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 4–5 apr. 2024 g. / otv. red. V. S. Lukinskij. – SPb. : GUMRF im. Adm. S. O. Makarova, 2024. – CH. 2. – S. 302–309.
- SHishko, E. L. Upravlenie riskami v regional'nyh logisticheskikh sistemah / E. L. SHishko. – Minsk : IVC Minfina, 2022. – 200 s.
- Hvisevich, N. YU. Vliyanie delovyh kachestv specialista na blokirovaniye ili nejtralizaciyu riskov / N. YU. Hvisevich, E. L. SHishko // Teoriya i praktika v usloviyah menyayushchegosya global'nogo mira : sb. nauch. statej Mezhdunar. mezhvuz. nauch.-prakt. konf., Sankt-Peterburg, 13–14 dekabrya 2024 g. – SPb. : SPbCSA, 2024. – S. 413–416.
- SHishko, E. L. Konkurentosposobnost' predpriyatij i vneshnie makroekonomicheskie riski / E. L. SHishko, L. P. Zen'kova // Nauka i innovacii. – 2020. – № 7. – S. 61–66.
- SHishko, E. L. Risk kak faktor ekonomicheskogo razvitiya deyatel'nosti hozyajstvuyushchih sub'ektov / E. L. SHishko // Ekonomicheskie i finansovye mekhanizmy innovacionnogo razvitiya cifrovoj ekonomiki : sb. nauch. st. ; v 2 ch. / pod nauch. red. V. V. Puzikova, M. L. Zelenkevich. – Minsk : Institut biznesa BGU, 2019. – CH. 1. – S. 311–316.
- SHishko, E. L. Riski v logisticheskikh sistemah: regional'nyj aspekt / E. L. SHishko, L. P. Zen'kova. – Minsk : IVC Minfina, 2020. – 195 s.
- SHishko, E. L. Upravlenie riskami v regional'nyh logisticheskikh sistemah s pomoshch'yu iskusstvennogo intellekta / E. L. SHishko // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika. – 2025. – № 1. – S. 236–240.

Материал поступил 31.03.2026, одобрен 28.04.2026, принят к публикации 28.04.2026