



ISSN 1818-1112

№ 1(136)

Научно-практический журнал
Scientific and practical journal

ВЕСТНИК

Брестского государственного
технического университета

VESTNIK
of Brest State
Technical University

WWW.BSTU.BY

DOI 10.36773/1818-1112-2025-136-1

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

БАХАНОВИЧ АЛЕКСАНДР ГЕННАДЬЕВИЧ

д-р техн. наук, доцент, первый заместитель Министра образования Республики Беларусь

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, профессор ТУР ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ (ответственный редактор)

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

д-р техн. наук, профессор ПОЙТА ПЁТР 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, доцент НАЙЧУК АНАТОЛИЙ ЯКОВЛЕВИЧ

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 ОНЫСЬКО СЕРГЕЙ РОМАНОВИЧ (ответственный редактор)

канд. техн. наук, доцент ПАРФИЕВИЧ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ (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 ПЁТР 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 КАСПЕРОВИЧ СЕРГЕЙ АНТОНОВИЧ (ответственный редактор)

канд. экон. наук, доцент ЗАЗЕРСКАЯ ВИКТОРИЯ ВАСИЛЬЕВНА (зам. ответственного редактора)

д-р экон. наук, профессор ГАИБНАЗАРОВА ЗУМРАТ ТАЛАТОВНА

д-р экон. наук, доцент БЕЛЯЦКАЯ ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА

д-р экон. наук, профессор ПСАРЕВА НАДЕЖДА ЮРЬЕВНА

д-р экон. наук, профессор ХАЦКЕВИЧ ГЕННАДИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

д-р экон. наук, профессор ИВУТЬ РОМАН БОЛЕСЛАВОВИЧ

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

1(136)'2025

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТРОИТЕЛЬСТВО

БЕЛОМЕСОВА К. Ю., ПАВЛОВА И. П. Собственные деформации и жесткостные характеристики напрягающих бетонов с базальтовой фиброй. Параметрические исследования **3**

ВЛАСЮК Н. Н., БОГДАСАРОВ М. А. О реализации приоритетных направлений развития строительной отрасли в части комплексного развития пригородных территорий, повышения качества городской среды, повышения энергоэффективности возводимых объектов **8**

ГЛУШКО К. К., ГЛУШКО К. А., МАТВЕЕНКО Н. В., ШАЛОБЫТА Н. Н. Местная устойчивость сетчатых куполов с шарнирным соединением стержней в узлах при действии распределённой нагрузки **16**

ДЕРКАЧ В. Н., ДЕМЧУК И. Е., ЛАВРЕНЧУК В. В. Оценка безопасности и эксплуатационной пригодности железобетонных конструкций методом пробного нагружения **24**

ЗЕЛЕНКОВСКАЯ Ж. Л., КОВШАР С. Н. Моделирование режима термосного выдерживания бетонного массива **29**

НЕВЕРОВИЧ И. И. Трещиностойкость зон стыка разнонагруженных стен многоэтажных каменных зданий **38**

ТУР Э. А., РУСАК Е. Ю. Комплексные научные исследования здания почты в г. Лиде Гродненской области как объекта историко-культурного наследия Республики Беларусь **45**

ЧЕРНОИВАН Н. В., ПАВЛОВА И. П. Исследование энергетической эффективности эксплуатируемых крупнопанельных жилых зданий, прошедших тепловую модернизацию **53**

ЧЕРНЮК В. П., ЮСЬКОВИЧ В. И., ШЛЯХОВА Е. И. Рациональные технологии и эффективные конструкции трамбовок для устройства фундаментов в вытрамбованных котлованах **60**

МАШИНОСТРОЕНИЕ

АКУЛА И. П., ВЕРЕМЕЙЧИК А. И., ЛИННИК Д. И., ОВЧИННИКОВ Е. В., ХВИСЕВИЧ В. М., ЧЕКАН Н. М., ЭЙСЫМОНТ Е. И. Физико-механические характеристики многофункциональных покрытий на основе керамических матриц **65**

ГРОМЫКО П. Н., ХАТЕТОВСКИЙ С. Н., ГОНЧАРОВ П. С., МЕЛЬНИКОВ А. В. Снижение габаритных размеров мотор-редукторов с параллельным расположением входного и выходного валов на основе использования передач эксцентрикового типа **71**

МЕДВЕДЕВ О. А., САВЧУК С. В. Расчет толщин компенсаторов – членов геометрической прогрессии с учетом погрешностей сборочных работ при достижении точности сборки машин методом регулирования **76**

МИЩИРУК О. М., ВЕРЕМЕЙЧИК А. И., ХОЛОДАРЬ Б. Г., НЕРОДА М. В. Исследование механических характеристик стали 40Х13 после лазерной закалки и легирования **83**

МУРАВЬЕВ Г. Л., КРАПИВИН Ю. Б., САВИЦКИЙ Ю. В., ХВЕЩУК В. И. Опыт автоматизации процессов обучения инженерным дисциплинам **90**

ПОБОЛЬ А. И., ЗАЛЕСКИЙ В. Г. Моделирование и экспериментальное исследование процесса электронно-лучевой закалки сталей **96**

ПРОКОПЕНЯ О. Н., ФРАНЦЕВИЧ А. В., ВАБИЩЕВИЧ Л. И., ПИКУЛА А. И. Оптимизация управляющей подсистемы мехатронного модуля на основе трехфазного асинхронного электродвигателя **103**

ХОЛОДАРЬ Б. Г. Оценка допустимой нагрузки при продольном сжатии прямого упругого стержня **110**

ГЕОЭКОЛОГИЯ

VOLCHAK A. A., PARFOMUK S. I., SIDAK S. V. Anthropogenic impact on the rivers of the Belarusian Polesie (using the Lan river as an example) **116**

АТВИНОВСКАЯ Т. В., ЗЛОТНИКОВ И. И., НЕВЗОРОВА А. Б. Разработка и исследование свойств состава для закрепления пылящих поверхностей **123**

ВОЛЧЕК А. А., ЗУБРИЦКАЯ Т. Е. Оценка колебаний водопотребления в Республике Беларусь и странах Европы **128**

ГОРБУНОВА В. А., СЛЕПНЕВА Л. М., ЧЕРНАЯ А. О. Извлечение ионов Cu (II) из водных растворов композиционным сорбентом техногенного происхождения	133	ЕРМАКОВА Э. Э., МИШКОВА М. П. Таможенная защита прав интеллектуальной собственности в условиях развития Евразийского экономического союза	189
ГОРОДНЮК Ю. П., ВОЛЧЕК А. А., СИДАК С. В. Двухкомпонентная климатическая модель урожайности озимых зерновых на региональном уровне.....	138	ЗАХАРЧЕНКО Л. А., МЕДВЕДЕВА Г. Б. Реализация технологического суверенитета стран Союзного государства	195
ЖИТЕНЁВ Б. Н., НАУМЧИК Г. О., РЫБАК Е. С. Экономичная станция обезжелезивания воды по технологии «сухая фильтрация»	143	ЗАХАРЧУК Т. Д. Использование и движение трудовых ресурсов региона: механизм управления	199
ЖИТЕНЁВ Б. Н., СЕНЧУК Д. Д. Исследование сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов цинка	149	ЗАЦЕПИНА Е. В. Форсайт-сессии: исследования, методика проведения, практическая реализация в образовательном процессе	203
МОРЗАК Г. И., СИДОРСКАЯ Н. В., МАРТЫНЮК С. С. Методология снижения углеродного следа для предприятий	159	КАСПЕРОВИЧ С. А., ДЕРБИНСКАЯ Е. А. Продвижение бренда университета в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций	211
ЦЫГАНОВА А. А., ХРИПОВИЧ А. А., ЗЕЛЕНУХО Е. В., СКУРАТОВИЧ И. В. Использование фосфогипса при рекультивации засоленных земель	165	ПРУДНИКОВА В. А. Методологические подходы к оценке эффективности функционирования свободных экономических зон: отечественный и зарубежный опыт	218
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ		СТАНКЕВИЧ Д. В., КРАМАРЕНКО А. И. Роль университетов в цифровой трансформации: опыт Беларуси и Кыргызстана	225
АБДУЛЛАЕВА Н. К. Роль природных и экономических факторов, влияющих на развитие промышленности строительных материалов (на примере Апшерон-Хызинского и Бакинского экономического района)	171	ШАРОВА К. И. Взаимодействие искусственного интеллекта и интеллектуального капитала в современном обществе в эпоху цифровизации	231
БАКАНОВА Ю. А. Методика прогнозирования потребности в кадрах для строительства: основы формирования	177	ШИШКО Е. Л. Управление рисками в региональных логистических системах с помощью искусственного интеллекта	236
БУНЬКО С. А., НИКОНОВА Е. А. Медицинский туризм и факторы его развития в Республике Беларусь	183	ЮАНЬ ГАО, БАЙНИН ЮЙ, ЕРОФЕЕВА О. Н., ГУРНОВИЧ М. Н. Роль специализированных агентских компаний на рынке международного образовательного консалтинга	241

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 691.328.43:691.544

СОБСТВЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И ЖЕСТКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРЯГАЮЩИХ БЕТОНОВ С БАЗАЛЬТОВОЙ ФИБРОЙ. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

К. Ю. Беломесова¹, И. П. Павлова²¹ Магистр технических наук, исследователь, заместитель декана по идеологической и воспитательной работе, Архитектурно-строительный факультет, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: kbelomesova@mail.ru² К. т. н., доцент, декан архитектурно-строительного факультета, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: pavlinna@tut.by

Реферат

В материале статьи отражены результаты параметрических исследований напрягающих бетонов с базальтовой фиброй. В основе исследований лежит рассмотрение цементного композита как четырехкомпонентного материала, состоящего из заполнителя, цементной матрицы с условно выделенной из нее транзитной зоной и фибры. В модели применены основные положения теории эффективной среды с учетом влияния свойств транзитной зоны. Во введении обозначена актуальность исследований. В качестве структурного компонента отдельно выделена транзитная зона. Указана специфика структурообразования и эффекты, сопровождающие формирование транзитной зоны. Предложены подходы по оптимизации свойств транзитной зоны, в т. ч. благодаря одновременному введению расширяющихся добавок на основе высокоосновного метакеолина и дисперсного армирования. В качестве дисперсного армирования выбрана базальтовая фибра как материал совместимый с цементным камнем, обладающий повышенными адгезионными характеристиками.

Предложенная модель позволяет выявить требуемое для оптимизации структуры напрягающего бетона количество армирующего компонента – базальтовой фибры, которое имеет непостоянное значение, а варьируется в зависимости от изменения жесткостных характеристик как самой базальтовой фибры, так и всех компонентов, входящих в состав напрягающего бетона. В модели применены основные положения теории эффективной среды с учетом влияния свойств транзитной зоны.

Ключевые слова: напрягающий бетон, базальтовая фибра, модуль упругости, собственные деформации, теория эффективной среды.

SELF-STRAINS AND STIFFNESS CHARACTERISTICS OF SELF-STRESS CONCRETE WITH BASALT FIBER. PARAMETRIC STUDIES

K. Y. Belamesava, I. P. Paulava

Abstract

The article reflects the results of parametric studies of self-stressed concrete with basalt fiber. The research is based on the consideration of cement composite as a four-component material consisting of aggregate, cement matrix with a transition zone conditionally separated from it, and fiber. In the model the basic provisions of the Effective Medium Theory are applied taking into account the influence of properties of the transition zone. The introduction outlines the relevance of the research. The transit zone is singled out separately as a structural component. Specifics of structure formation and effects accompanying the formation of the transit zone are specified. Approaches to optimize the properties of the transit zone, including through the simultaneous introduction of expanding additives based on high-base metakaolin and disperse reinforcement, are proposed. As a disperse reinforcement basalt fiber as a material compatibilized with cement stone and having increased adhesion characteristics is chosen.

The proposed model makes it possible to reveal the amount of reinforcing component – basalt fiber - required to optimize the structure of self-stressed concrete, which has a non-constant value and varies depending on the change in the stiffness characteristics of both basalt fiber itself and all the components included in the self-stressed concrete. In the model the basic provisions of the theory of effective medium are applied taking into account the influence of the properties of the transit zone.

Keywords: self-stressed concrete, basalt fiber, elastic modulus, self-strains, Effective Medium Theory.

Введение

В ранее опубликованной работе [1, с. 28] представлены основные положения, геометрические параметры и жесткостные характеристики элементов расчетной аналитической модели, позволяющей определять количество армирующего компонента – базальтовой фибры, необходимое для получения напрягающих дисперсно-армированных бетонов оптимальной структуры. Упрощенная блок-схема расчета количества базальтовой фибры в соответствии с положениями разработанной теоретической структурно-механической модели представлена на рисунке 1.

Как указывалось ранее [1, с. 28], в основе предлагаемой модели лежит рассмотрение цементного композита как четырехкомпонентного материала, состоящего из заполнителя, цементной матрицы и расположенной между ними транзитной зоны, а также фиброволокон. При моделировании композитной системы учитывались количество, жесткостные и геометрические параметры всех перечисленных выше компонентов. Начальные значения характеристик (геометрических и жесткостных) заполнителя и базальтовой фибры приведены в таблице 1.

При построении структурной модели расширяющегося цементного композита было принято, что цементный композит представляется в виде непрерывной матрицы (цементный камень), в теле которой дискретно расположен т. н. «эффективный» заполнитель, представляющий собой зерна заполнителя с оболочкой транзитной зоны вокруг.

Жесткостные параметры «эффективного» заполнителя зависят как от используемого вида заполнителя с деформативными характеристиками K_{agg} , G_{agg} , так и от деформативных характеристик транзитной зоны K_{itz} , G_{itz} ($K_{it} = K_{agg} + K_{itz}$; $G_{it} = G_{agg} + G_{itz}$). И если с деформативными характеристиками используемого заполнителя все очевидно, то значение модуля упругости транзитной зоны зависит от целого ряда факторов и исследуется уже на протяжении нескольких десятков лет.

На сегодняшний день приведенные в работах [2, 3] данные позволяют утверждать, что для традиционных бетонов отношение модуля упругости транзитной зоны E_{it} к модулю упругости цементной матрицы E_m является непостоянным и колеблется в пределах от 0,5 до 0,55. Что касается расширяющих бетонов, то здесь отношение E_{it}/E_m , в силу специфики микроструктурообразования транзитной зоны, и характеристик, используемых в качестве основных компонентов расширяющей добавки материалов (высокоактивный метакеолин, природный гипс), достигает значений 0,6–0,66.

На основе собственных данных, полученных в ходе экспериментальных исследований в качестве базового предлагается использовать состав напрягающего цемента, состоящего из портландцемента и сульфаталюминатной расширяющейся добавки (РД). В качестве алюминатной составляющей РД, содержащей в своем составе от 40 до 50 % оксида алюминия, был выбран высокоактивный метакеолин (ВМК). В качестве сульфатного компонента РД использован двуводный гипс (Г).

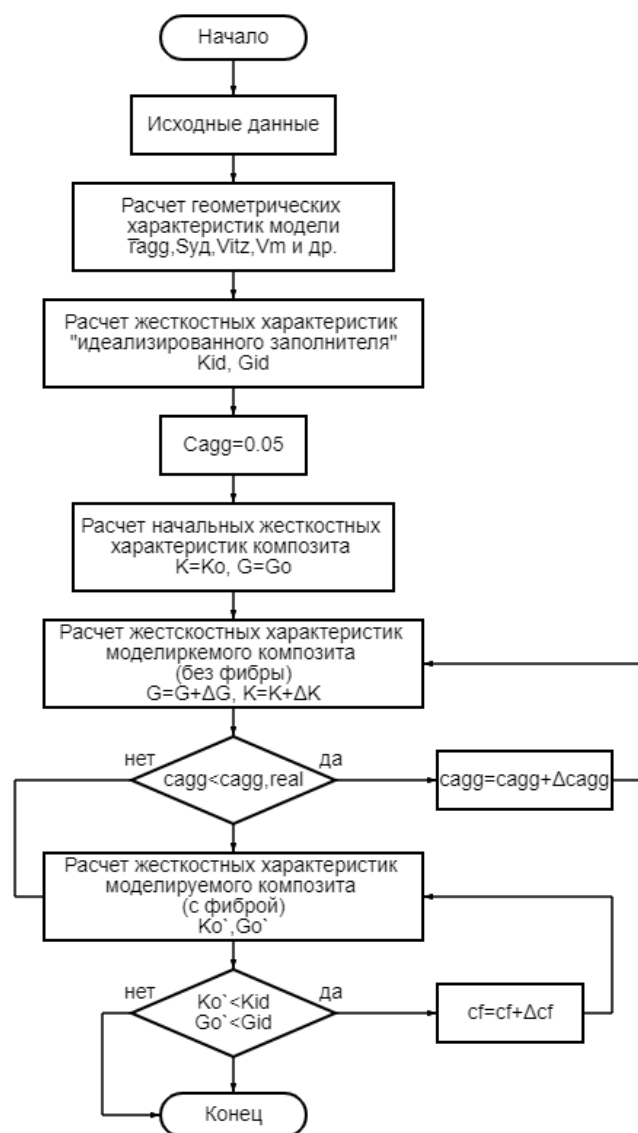


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма расчета количества базальтовой фибры для армирования напрягающих бетонов

Таблица 1 – Начальные значения характеристик заполнителя и базальтовой фибры

Параметр	Ед. изм.	Значение
Заполнитель		
Плотность	кг/м ³	2690
Коэффициент Пуассона	–	0,27
Модуль упругости	ГПа	50
Базальтовая фибра		
Плотность волокна	кг/м ³	2800
Коэффициент Пуассона	–	0,25
Модуль упругости	ГПа	80
Диаметр монофиламента (отдельного волокна)	мкм	16
Длина волокна	мм	25,4

Высокоактивный метакраолин является искусственно изготовленной пуццолановой добавкой, обладающей наиболее высокой активностью среди имеющихся активных минеральных добавок [4, с. 28; 5, с. 22]. По своей природе метакраолин представляет продукт термической обработки мономинеральных каолинистых глин ($\text{Al}_2(\text{OH})_4[\text{Si}_2\text{O}_5]$ или $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в диапазоне 650–800 °С. Микронаполняющий эффект, проявляющийся благодаря применению высокоактивного метакраолина, способствует благоприятной упаковке

частиц в транзитной зоне, снижению эффекта стены [2], и как результат – уменьшению пористости транзитной зоны, что в свою очередь ведет к повышению плотности цементного композита, его водонепроницаемости, коррозионной стойкости и долговечности (бетона и конструкции в целом) [6].

По данным [6, с. 52] применение расширяющихся добавок, в состав которых входит метакраолин, позволяет наблюдать следующие эффекты: эффект наполнения благодаря колоссальной удельной поверхности (более 200000 см²/г), пуццолановый эффект благодаря высокому содержанию SiO_2 (около 60 %) и эффект 3D-армирования благодаря высокому содержанию алюминатов (около 40 %).

При чем данные эффекты протекают параллельно, накладываясь и усиливая друг друга, в результате чего достигается синергетический эффект.

Так для дальнейших расчетов было принято для традиционного бетона рассматривать отношение модуля упругости транзитной зоны E_{itz} к модулю упругости цементной матрицы E_m , равное 0,5, а для напрягающего бетона $E_{itz}/E_m=0,66$.

1. Параметрические исследования

1.1 Исходные данные

При анализе моделируемой системы были приняты следующие варьируемые параметры:

- удельная поверхность заполнителя S_{yd} . Удельную поверхность заполнителя S_{yd} варьировали в пределах от 1,5 до 7,5 м²/кг;
- концентрация заполнителя C_{agg} . Параметрические исследования проводили для реальных концентраций $C_{agg} = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7$ и 0,8 соответственно.

При выполнении параметрических исследований неизменными были следующие параметры:

- толщина транзитной зоны δ_{itz} . Параметрические исследования проводили при величине транзитной зоны $\delta_{itz} = 50$ мкм. Принятый размер толщины транзитной зоны подтверждается экспериментальными исследованиями микроструктуры [2–19] и является наиболее распространенным для цементных композитов;
- геометрические и жесткостные характеристики базальтовой фибры: $d_f, l_f, E_{bf} = \text{const}$ (начальные значения указаны в таблице 1);
- модуль упругости и плотность заполнителя: $E_{agg}, \rho_{agg} = \text{const}$ (начальные значения указаны в таблице 1);
- модуль упругости цементной матрицы: $E_m = \text{const}$.

1.2 Результаты параметрических исследований и их анализ

На рисунках 2, 3 представлены нормализованные графики изменения модуля упругости «эффективного» заполнителя E_{id} в моделируемом композите в зависимости от удельной поверхности заполнителя S_{yd} при его различной объемной концентрации C_{agg} .

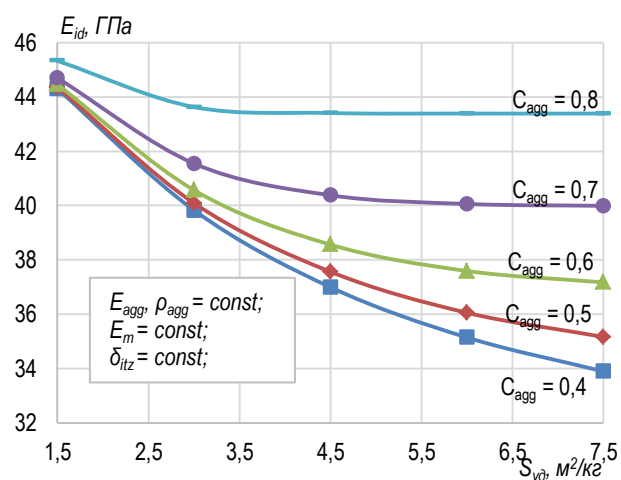


Рисунок 2 – Нормализованная зависимость изменения модуля упругости «эффективного» заполнителя E_{id} в моделируемом композите от удельной поверхности заполнителя при его различной объемной концентрации ($E_{itz}/E_m = 0,5$)

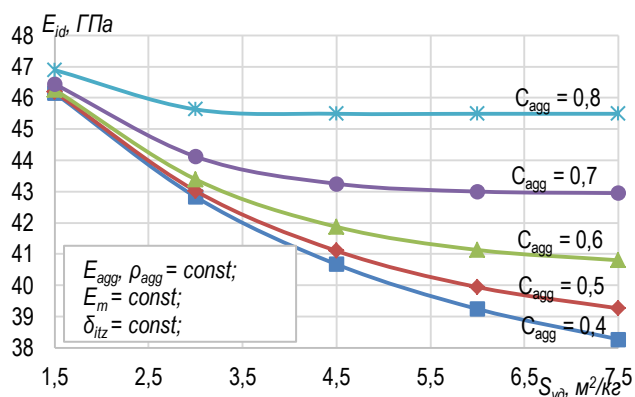


Рисунок 3 – Нормализованная зависимость изменения модуля упругости «эффективного» заполнителя E_{id} в моделируемом композите от удельной поверхности заполнителя при его различной объемной концентрации ($E_{itz}/E_m = 0,66$)

В обоих случаях ($E_{itz}/E_m = 0,5$ и $E_{itz}/E_m = 0,66$) с ростом объемной концентрации заполнителя C_{agg} в моделируемом композите при одинаковой удельной поверхности $S_{уд}$ жесткостные характеристики «эффективного» заполнителя возрастают, что объясняется увеличением в системе элемента с более высокими жесткостными характеристиками.

При этом как в случае традиционного бетона (см. рисунок 2), так и в случае напрягающего бетона (см. рисунок 3) с ростом удельной поверхности наблюдается значительное снижение модуля упругости «эффективного» заполнителя, что, в свою очередь, объясняется резким увеличением объема транзитной зоны.

Изменение объема транзитной зоны V_{itz} (с учетом перколяции транзитных зон) в моделируемом композите в зависимости от удельной поверхности заполнителя $S_{уд}$ при его различной объемной концентрации C_{agg} проиллюстрировано в работе [7, с. 51].

В соответствии с рабочей гипотезой количество базальтовой фибры должно назначаться исходя из условия достижения дисперсно-армированной базальтовой фиброй цементной матрицы жесткостных характеристик тождественных жесткостным характеристикам «эффективного» заполнителя при реальной концентрации последнего в бетоне, что позволит реализовать принцип макроскопической однородности системы.

Нормализованная зависимость количества базальтовой фибры от удельной поверхности «эффективного» заполнителя $S_{уд}$ при его различной объемной концентрации C_{agg} показана на рисунке 4 (для традиционного бетона) при отношении $E_{itz}/E_m = 0,5$ и на рисунке 5 (для напрягающего бетона) при отношении $E_{itz}/E_m = 0,66$.

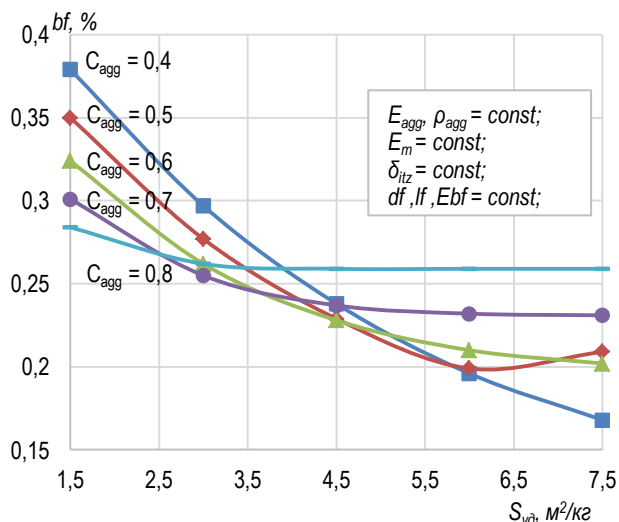


Рисунок 4 – Нормализованная зависимость изменения количества базальтовой фибры в моделируемом композите от удельной поверхности «эффективного» заполнителя при его различной объемной концентрации ($E_{itz}/E_m = 0,5$)

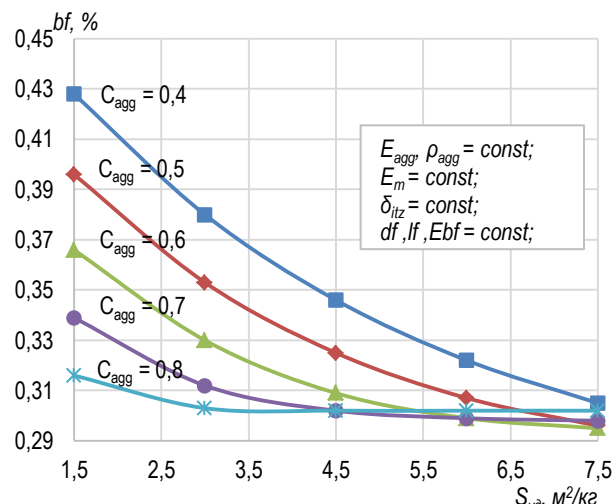


Рисунок 5 – Нормализованная зависимость изменения количества базальтовой фибры в моделируемом композите от удельной поверхности «эффективного» заполнителя при его различной объемной концентрации ($E_{itz}/E_m = 0,66$)

С ростом объемной концентрации «эффективного» заполнителя C_{agg} в моделируемом композите при одинаковой удельной поверхности $S_{уд}$ заполнителя количество базальтовой фибры bf , необходимое для оптимизации структуры бетона, снижается как для случая напрягающего бетона (рисунок 4), так и для традиционного (рисунок 5), при этом количество фибры по отношению к количеству вяжущего резко возрастает.

Происходит это за счет двух параллельно протекающих процессов: увеличения модуля упругости бетона E_0 с увеличением концентрации «эффективного» заполнителя с высокими жесткостными параметрами и уменьшения количества активной цементной матрицы, в которую вводится дисперсное волокно.

Что касается тенденции снижения модуля упругости бетона E_0 с увеличением удельной поверхности заполнителя при реальных концентрациях последнего в бетоне, то данный факт объясняется увеличением общего объема и количества перколированных транзитных зон, которые в силу специфики микроструктурообразования ослабляют жесткостные параметры «эффективного» заполнителя как в случае традиционного бетона, так и в случае напрягающего бетона.

На рисунке 6 представлена нормализованная зависимость изменения модуля упругости бетона E_0 от удельной поверхности «эффективного» заполнителя $S_{уд}$ при его реальной объемной концентрации $C_{agg} = 0,6$.

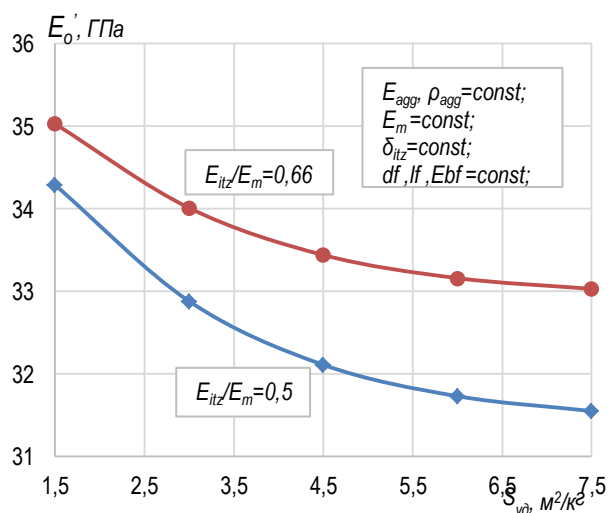


Рисунок 6 – Нормализованная зависимость изменения модуля упругости бетона E_0 от удельной поверхности «эффективного» заполнителя $S_{уд}$ при его реальной объемной концентрации $C_{agg} = 0,6$

Предлагаемая модель предусматривает использование в качестве армирующего компонента не только базальтовой фибры с фиксированными характеристиками (геометрическими и жесткостными), но и любого вида минеральных (стеклянных) и полимерных (полипропиленовых) дисперсных волокон с различными геометрическими (длина, диаметр и др.) и жесткостными характеристиками.

Многообразие существующих видов волокон открывает возможность выбора того либо иного вида волокна исходя из поставленной задачи: повышения прочности при растяжении, стойкости к динамическим воздействиям, водонепроницаемости, истираемости, ударной вязкости и т. п.

Из наиболее востребованных на сегодняшний день неметаллических волокон можно выделить стеклянные, полипропиленовые, базальтовые, углеродные. Все перечисленные волокна различаются по своим основным свойствам, поэтому к решению вопросов их применения в качестве упрочняющих компонентов необходимо подходить дифференцированно [8, с. 19]. Высокомодульная фибра (стеклянная, базальтовая) является высокопрочной, в силу чего способна обеспечить значительное упрочнение фибробетона при значительном повышении трещиностойкости как за счет высокого соотношения модулей упругости фибры и бетона (E_f/E_c), так и за счет высокого соотношения их прочностей (f_{tf}/f_c) [9, с. 22]. При этом фибробетон на основе высокомодульной фибры обладает повышенными значениями ударной стойкости, морозостойкости, водонепроницаемости и истираемости.

Низкомодульная фибра (полимерная), несмотря на то, что по жесткости ниже высокомодульной примерно на два десятичных порядка ($E_f = 2 \dots 10$ ГПа), не теряет своей популярности и с успехом используется при устройстве промышленных бетонных полов, подвергаемых интенсивным статическим и динамическим нагрузкам, а также применяется в качестве армирующего компонента торкретбетона. Данный вид армирующих волокон (низкомодульная) обеспечивает в значительной мере снижение усадки, повышает ударную вязкость и морозостойкость бетона, в частности неавтоклавного пенобетона, обеспечивает водоудерживающую способность бетонной смеси [9, с. 22].

По мнению [10] для обеспечения эффективного использования того либо иного вида волокна в качестве армирующего компонента композиционных систем должен быть соблюден ряд условий:

- предел прочности при растяжении применяемого волокна должен быть значительно выше чем у непрерывной матрицы (минимум в $2 \div 3$ раза);
- прочность сцепления волокна и матрицы должна превышать прочность самой матрицы;
- модуль упругости волокна должен быть значительно выше модуля упругости матрицы (минимум в три раза);
- волокно не должно быть хрупким;
- значение коэффициента температурного линейного расширения должно быть таким же, как и у матрицы;
- матрица должна быть химически инертной по отношению к волокну.

Заключение

Представленные выше данные и нелинейный характер изменения жесткостных параметров свидетельствуют о том, что предлагаемая расчетная модель гибко реагируя на изменение одного или нескольких входных параметров вполне применима как для традиционных, так и армированных бетонов.

На основании проведенных параметрических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Количество базальтовой фибры, необходимое для оптимизации структуры напрягающего бетона, зависит от ряда факторов, учитывающих как геометрическую, так и «механическую» стороны структурообразования. Применение модели для определения количества фибры является наиболее перспективным, поскольку позволяет достаточно гибко реагировать на изменение входных параметров, при этом избегая трудоемких и затянутых по времени опытов.
2. С ростом концентрации заполнителя в бетоне при одинаковой удельной поверхности последнего количество базальтовой фибры снижается, но соотношение «фибра/вязущее» возрастает.

3. Нелинейный характер изменения жесткостных характеристик моделируемого композита (бетона) при варьировании объемной концентрации заполнителя, что обусловлено учетом как свойств транзитной зоны, так и количества перколированных зон в предложенной модели.

4. Применение заполнителя с менее развитой удельной поверхностью (увеличение модуля крупности песка, изменение соотношения между крупным и мелким заполнителем) при прочих равных условиях позволяет получить бетоны с более высоким значением жесткостных параметров, что обусловлено со снижением количества транзитных зон в бетоне.

Список цитированных источников

1. Беломесова, К. Ю. Аналитическая модель расчета количества базальтовой фибры для получения дисперсно-армированного напрягающего бетона оптимальной структуры / К. Ю. Беломесова, И. П. Павлова // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2023. – № 1. – С. 27–31. – DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-27-31.
2. Павлова, И. П. Прогнозирование собственных деформаций и напряжений напрягающего бетона на основе структурно-механической модели расширяющегося композита : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / И. П. Павлова. – Брест, 2005. – 159 л.
3. Paulava I. Dependence of concrete strength on different methods of basalt fiber adding / I. Paulava, K. Belamesava // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 63–75.
4. Лукутцова, Н. П. Теоретические и технологические аспекты получения микро- и нанодисперсных добавок на основе шунгитосодержащих пород для бетона : монография / Н.П. Лукутцова, А. А. Пыкин. – Брянск : Изд-во БГИТА, 2013. – 231 с.
5. Кирсанова, А. А. Высокофункциональные тяжелые бетоны, модифицированные модифицированные комплексными добавками, включающими метаколин: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / А. А. Кирсанова. – Брест, 2016. – 164 л.
6. Рекомендации по использованию ВМК производства ООО «СИНЕРГО». – URL: http://metakaolin.ru/Documents/synergo_recommends.pdf (дата обращения: 07.03.2025).
7. Беломесова, К. Ю. Аналитическая модель расчета количества базальтовой фибры для получения дисперсно-армированного напрягающего бетона оптимальной структуры. параметрические исследования и верификация модели / К. Ю. Беломесова, И. П. Павлова // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 2 (134). – С. 49–52. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-49-52.
8. Рабинович, Ф. Н. Дисперсно-армированные бетоны / Ф. Н. Рабинович. – М. : Стройиздат, 1989. – 176 с.
9. Розина, В. Е. Мелкозернистый базальтофибробетон с нанокремнеземом : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / В. Е. Розина. – Улан-Удэ, 2015. – 146 л.
10. Löfgren, I. In-situ concrete building systems – Developments for industrial construction. Licentiate Thesis. Publication 02:2 / I. Löfgren // Department of Structural Engineering / Chalmers University of Technology. – Feb. 2002. – 138 p.
11. Тур, В. В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В. В. Тур. – Брест : БПИ, 1998. – 244 с.
12. Коротких, Д. Н. Многоуровневое дисперсное армирование структуры мелкозернистого цементного бетона и повышение его трещиностойкости : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Д. Н. Коротких. – Воронеж, 2001. – 188 л.
13. Титов, М. Ю. Бетоны с компенсированной усадкой на расширяющих добавках: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.23.05 / М. Ю. Титов; НИИЖБ им. А. А. Гвоздева. – М., 2012. – 22 л.
14. Потапова, Ю. И. Структура и свойства бетонов с двухстадийным расширением: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.23.05 / Ю. И. Потапова. – Ростов-на-Дону, 2015. – 254 л.

15. Павлова, И. П. Зависимость прочности бетона от метода введения базальтовой фибры / И. П. Павлова, К. Ю. Беломесова // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС ; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 63–75. – DOI: 10.35579/2076-6033-2019-11-05.
16. Михайлов, В. В. Напрягающий цемент / В. В. Михайлов // Труды совещания по химии цемента. – М. : Промстройиздат, 1956. – 120 с.
17. Lu, B. Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle system / Lu Binglin, S. Torquato // Physical Review A. – 1992. – Vol. 45, Iss. 8. – P. 5530–5544. – DOI: 10.1103/PhysRevA.45.5530.
18. Garboczi, E. J. Computer Modeling of Interfacial Transition Zone: Microstructure and Properties / E. J. Garboczi, D. P. Bentz // RILEM Report №20, Part 5, Chapter 20. – 1999. – P. 349–385.
19. Garboczi, E. J. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations / E. J. Garboczi, J. G. Berryman // Mechanics of Materials. – 2001. – P. 455–470.
20. Giordano, S. Differential schemes for the elastic characterization of dispersions of randomly oriented ellipsoids / S. Giordano // European Journal of Mechanics - A/Solids. 2023. – Vol. 22, Iss. 6. – P. 885–902. – DOI:10.1016/S0997-7538(03)00091-3.
8. Rabinovich, F. N. Dispersno-armirovannye betony / F. N. Rabinovich. – М. : Strojizdat, 1989. – 176 s.
9. Rozina, V. E. Melkozemistyj bazal'tofibrobeton s nanokremnezemom : dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / V. E. Rozina. – Ulan-Ude, 2015. – 146 l.
10. Löfgren, I. In-situ concrete building systems – Developments for industrial construction. Licentiate Thesis. Publication 02:2 / I. Löfgren // Department of Structural Engineering / Chalmers University of Technology. – Feb. 2002. – 138 p.
11. Tur, V. V. Eksperimental'no-teoreticheskie osnovy predvaritel'nogo napryazheniya konstrukcij pri primenении napryagayushchego betona / V. V. Tur. – Brest : BPI, 1998. – 244 s.
12. Korotkih, D. N. Mnogourovnevoe dispersnoe armirovanie struktury melkozemistogo cementnogo betona i povyshenie ego treshchinostojkosti : dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / D. N. Korotkih. – Voronezh, 2001. – 188 l.
13. Titov, M. YU. Betony s kompensirovannoj usadkoj na rasshiryayushchih dobavkah: avtoref. dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tekhn. nauk : 05.23.05 / M. YU. Titov; NIIZHB im. A. A. Gvozdeva. – М., 2012. – 22 l.
14. Potapova, YU. I. Struktura i svojstva betonov s dvuhstadijnym rasshireniem: dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tekhn. nauk : 05.23.05 / YU. I. Potapova. – Rostov-na-Donu, 2015. – 254 l.
15. Pavlova, I. P. Zavisimost' prochnosti betona ot metoda vvedeniya bazal'tovoj fibry / I. P. Pavlova, K. YU. Belomesova // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : sb. nauch. tr. / In-t BelNIIS ; redkol.: O. N. Leshkevich [i dr.]. – Минск, 2019. – Vyp. 11. – S. 63–75. – DOI: 10.35579/2076-6033-2019-11-05.
16. Mihajlov, V. V. Napryagayushchij cement / V. V. Mihajlov // Trudy soveshchaniya po himii cementa. – М. : Promstrojizdat, 1956. – 120 s.
17. Lu, B. Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle system / Lu Binglin, S. Torquato // Physical Review A. – 1992. – Vol. 45, Iss. 8. – P. 5530–5544. – DOI: 10.1103/PhysRevA.45.5530.
18. Garboczi, E. J. Computer Modeling of Interfacial Transition Zone: Microstructure and Properties / E. J. Garboczi, D. P. Bentz // RILEM Report №20, Part 5, Chapter 20. – 1999. – P. 349–385.
19. Garboczi, E. J. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations / E. J. Garboczi, J. G. Berryman // Mechanics of Materials. – 2001. – P. 455–470.
20. Giordano, S. Differential schemes for the elastic characterization of dispersions of randomly oriented ellipsoids / S. Giordano // European Journal of Mechanics - A/Solids. 2023. – Vol. 22, Iss. 6. – P. 885–902. – DOI:10.1016/S0997-7538(03)00091-3.

References

1. Belomesova, K. YU. Analiticheskaya model' rascheta kolichestva bazal'tovoj fibry dlya polucheniya dispersno-armirovannogo napryagayushchego betona optimal'noj struktury / K. YU. Belomesova, I. P. Pavlova // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2023. – № 1. – S. 27–31. – DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-27-31.
2. Pavlova, I. P. Prognozirovaniye sobstvennyh deformacij i napryazhenij napryagayushchego betona na osnove strukturno-mekhanicheskoy modeli rasshiryayushchegosya kompozita : dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / I. P. Pavlova. – Brest, 2005. – 159 l.
3. Paulava I. Dependence of concrete strength on different methods of basalt fiber addicting / I. Paulava, K. Belamesava // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : sb. nauch. tr. / In-t BelNIIS; redkol.: O. N. Leshkevich [i dr.]. – Минск, 2019. – Vyp. 11. – S. 63–75.
4. Lukutcova, N. P. Teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty polucheniya mikro- i nanodispersnyh dobavok na osnove shungitosoderzhashchih porod dlya betona : monografiya / N. P. Lukutcova, A. A. Pykin. – Bryansk : Izd-vo BGITA, 2013. – 231 s.
5. Kirsanova, A. A. Vysokofunkcional'nye tyazhelye betony, modifitsirovannye modifitsirovannye kompleksnymi dobavkami, vlyuchayushchimi metakaolin: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / A. A. Kirsanova. – Brest, 2016. – 164 l.
6. Rekomendacii po ispol'zovaniyu VMK proizvodstva OOO «SINERGO». – URL: http://metakaolin.ru/Documents/synergo_recommends.pdf (data obrashcheniya: 07.03.2025).
7. Belomesova, K. YU. Analiticheskaya model' rascheta kolichestva bazal'tovoj fibry dlya polucheniya dispersno-armirovannogo napryagayushchego betona optimal'noj struktury. parametricheskie issledovaniya i verifikaciya modeli / K. YU. Belomesova, I. P. Pavlova // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 2 (134). – S. 49–52. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-49-52.

Материал поступил 31.03.2025, одобрен 02.05.2025,
принят к публикации 02.05.2025

УДК 711.435

О РЕАЛИЗАЦИИ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ В ЧАСТИ КОМПЛЕКСНОГО РАЗВИТИЯ ПРИГОРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ, ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ, ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗВОДИМЫХ ОБЪЕКТОВ

(предложения в рамках круглого стола «О повышении качества проектирования» с участием министра архитектуры)

Н. Н. Власюк¹, М. А. Богдасаров²

¹ Кандидат архитектуры, доцент, профессор кафедры архитектуры УО «Брестский государственный технический университет», начальник управления архитектуры и территориального планирования комитета по архитектуре и строительству Брестского областного исполнительного комитета, Брест, Беларусь, e-mail: ulasjuk@list.ru

² Д. г.-м. н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, проректор по научной работе УО «Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина», Брест, Беларусь, e-mail: bahdasarau@gmail.com

Реферат

Градостроительная политика в Республике Беларусь направлена на обеспечение комфортности городской среды обитания человека, повышения качества объектов строительства, экологическую устойчивость городов и сельских населенных пунктов.

В статье обозначены отдельные актуальные вопросы градостроительной политики, стратегии развития строительного комплекса до 2035 года, а также приоритетные направления развития строительной отрасли Республики Беларусь.

Это вопросы разработки и внедрения новых социальных стандартов и системы оценки качества городской среды и качества жизни для населенных пунктов (в качестве примеров в Беларуси послужили предложенные ключевые цели и индикаторы с показателями эффективности развития города, разработанные и утвержденные в рамках пилотных проектов, в т. ч. стратегии пространственного развития г. Бреста до 2050 г. [2], стратегии развития городов Полоцк, Новополоцк [5], Новогрудок, показатели KPI в концепции умного города «Брест Симбиозити» в рамках реализации проекта ООН «Зеленые города», выполненные в соответствии с Национальным планом действий по развитию зеленой экономики в Беларуси. Для дальнейшего развития качества городской среды представляет интерес российская методика формирования индекса качества городской среды, позволяющая выявлять конкурентные преимущества городов и одновременно ограничения, препятствующие их развитию. Методика предназначена для определения качества городской среды городов путем расчета и присвоения им соответствующего индекса.

Следующий блок вопросов связан с комплексной малоэтажной, блокированной и усадебной застройкой жилых районов. Рассматриваются перспективные площадки в границах агломераций и пригородных зон больших и крупных городов. Для реализации данного подхода в Брестской области разрабатываются градостроительные проекты общего и специального планирования. В 2023 г. утвержден проект пригородной зоны областного центра (в радиусе 15–20 км, включая город-спутник Жабинку). Проектом пригородной зоны определены территориальные резервы в границах сельских населенных пунктов для усадебного жилищного строительства в интересах города-центра и сельской местности пригородной зоны г. Бреста.

Еще одно направление – это повышение энергоэффективности возводимых объектов при комплексной застройке. Предлагается комплексно подойти к проектированию и строительству не отдельных энергоэффективных домов, а целых городских кварталов или районов. Такой подход позволяет эффективно застраивать и экономить за счет компактности и multifunctionality застройки, ориентации групп зданий для максимального использования потенциала солнечной энергии, эффективного использования инженерных сетей, возобновляемых источников энергии и местных видов топлива.

Реализация пилотных проектов в Брестской области позволит апробировать поставленные правительством задачи по повышению качества среды населенных пунктов, сделать их конкурентными и ответить на ряд вопросов связанных с их реализацией.

Ключевые слова: комфортная городская среда, комплексная застройка, оценка качества городской среды, энергоэффективность кварталов застройки.

ON THE IMPLEMENTATION OF PRIORITY AREAS FOR THE DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY IN TERMS OF THE INTEGRATED DEVELOPMENT OF SUBURBAN AREAS, IMPROVING THE QUALITY OF THE URBAN ENVIRONMENT, AND IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF FACILITIES UNDER CONSTRUCTION

(proposals within the framework of the round table "On improving the quality of design" with the participation of the Minister of Architecture)

N. N. Vlasjuk, M. A. Bogdasarov

Abstract

Urban development policy in the Republic of Belarus is aimed at ensuring the comfort of the urban environment for human habitation, improving the quality of construction projects, and the environmental sustainability of cities and rural settlements.

The article outlines certain current issues of urban development policy, as well as priority areas for the development of the construction industry of the Republic of Belarus, which are also considered in the draft Strategy for the Development of the Construction Complex until 2035.

These are issues of development and implementation of new social standards and a system for assessing the quality of the urban environment and quality of life for populated areas (as examples in Belarus, the proposed key goals and indicators with indicators of the effectiveness of city development, developed and approved within the framework of pilot projects, including the "Strategy for Spatial Development of Brest until 2050", KPI indicators in the concept of the smart city "Brest SymbioCity" within the framework of the UN project "Green Cities", carried out in accordance with the National Action Plan for the Development of Green Economy in Belarus. Of interest is the Russian methodology for forming an index of the quality of the urban environment, which allows identifying the competitive advantages of cities and, at the same time, the limitations that hinder their development. The methodology is designed to determine the quality of the urban environment of cities by calculating and assigning them an index of the quality of the urban environment. The next block of issues is complex development within the boundaries of agglomerations and suburban areas of large and large cities. To implement this approach, urban development projects of general and special planning are being developed in the Brest region. The project of

the suburban zone of the regional center (within a radius of 15–20 km, including the satellite town of Zhabinka) has been approved. The project of the suburban zone defines territorial reserves within the boundaries of rural settlements for estate housing construction in the interests of the city-center and rural areas of the suburban zone of Brest.

Increasing the energy efficiency of constructed objects during integrated development. It is proposed to take a comprehensive approach to the design and construction of not individual energy-efficient houses, but an entire city block or district. This approach allows for efficient development and savings due to the compactness and multifunctionality of development, the orientation of groups of buildings to maximize the potential of solar energy, the efficient use of utility networks, renewable energy sources and local types of fuel.

The implementation of pilot projects in the Brest region will allow testing the tasks set by the government to improve the quality of the environment of populated areas, make them competitive and answer a number of questions related to their implementation.

Keywords: comfortable environment, integrated development, assessment of the quality of the urban environment, energy efficiency of building blocks.

Введение

В настоящее время актуальными направлениями развития строительной отрасли являются: повышение качества городской среды, комплексная застройка пригородных зон городов, повышение энергоэффективности возводимых объектов при комплексной застройке.

После введения в 2024 году в действие Кодекса Республики Беларусь об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности продолжается реформирование подходов в развитии строительного комплекса, в архитектурно-строительной и градостроительной деятельности Республики Беларусь, в том числе в части внесения изменений в техническо-правовую и нормативную документацию. Утверждена Стратегия развития строительного комплекса до 2035 года.

В соответствии с Указом Президента Республики Беларусь № 31 от 17 января 2025 года «О пятилетке качества» 2025–2029 годы объявлены пятилеткой качества. Преобразования будут направлены на достижение высоких стандартов качества жизни людей, эффективность развития экономики, рациональное использования ресурсов. Сделан акцент на реализацию высокотехнологичных и энергоемких проектов, обновление системы государственных стандартов для населенных пунктов, приоритет качественных показателей над количественными. В соответствии с Указом Президента Республики Беларусь № 1 от 3 января 2025 года «Об объявлении 2025 года Годом благоустройства» акцентируется внимание на наведении порядка на земле, благоустройстве территорий, выработке системных подходов по улучшению качества городской среды.

Направление 1. Повышение качества городской среды (формирование индекса качества)

В сегодняшней модели оценки эффективности развития городов или отдельных жилых районов в Беларуси преобладает количественный подход, эффективность роста города измеряется построенными квадратными метрами жилья, километрами дорог и улиц, измеряется процент озеленения. Данные показатели являются маркерами в республиканских отчетах городов и областей. Сегодня недостаточно говорить о количественном подходе городского развития, т. е. нужно обсуждать не только количество введенных квадратных метров, но и в целом говорить об эффективности использования городского пространства, территорий, создаваемом качестве жилой среды. Рассчитывать стоимость метра квадратного сооружения не на момент сдачи объекта, а с учетом перспективной его эксплуатации на весь период жизненного цикла с учетом его последующей утилизации. Строительство энергоэффективных зданий и целых районов, а в последующем – экономия, окупаемость, экологичность решений. Не километры построенных новых улиц, а транспортная связность и доступность: число пересадок, время в пути, удобство перемещения. Собственный безопасный двор многоквартирного дома, красивый вид из окна, благоустройство, запоминающаяся архитектура и многое другое. Данные очень важные качественные критерии сегодня остаются без должного внимания.

Существуют два основных направления управления городом – отраслевой и территориальный. Для успешного дальнейшего развития городов Беларуси сегодняшний отраслевой вариант необходимо дополнить территориальным. В первом случае успех экономики подтверждается ростом предприятий, организаций, валового продукта – все нацелено на экономический рост, во втором случае – городская среда, пространство города с деятельностью человека и есть

его экономический капитал. В таких городах и районах хочется жить, туда переезжают активные молодые люди, посещают туристы. Важно создать комфортные условия для жителей городов, а данный процесс необходимо стимулировать. Это направление сегодня особенно актуально для принятия мер, препятствующих уменьшению численности населения малых городов и поселений, для развития городов-спутников и пригородных зон крупных городов при продолжающемся росте белорусской столицы. Поэтому разработка стратегий пространственного планирования, мастер-планирование позволяют говорить о совершенствовании городского развития исходя из приоритетов конкретного города его жителей.

Хорошими примерами в Беларуси, например, могут послужить предложенные ключевые цели и индикаторы с показателями эффективности развития города, разработанные и утвержденные в рамках пилотных проектов «Стратегия пространственного развития г. Бреста до 2050 г.» [2], показатели KPI в концепции умного города «Брест СимиоСити», примеры с показателями эффективного развития малых городов Полоцка, Новополоцка, Новогрудка [4, 5] и других городов в рамках реализации проекта ООН «Зеленые города», выполненные в соответствии с Национальным планом действий по развитию зеленой экономики в Беларуси.

Среди всего многообразия подходов и методик к оценке качества жизни в городах особое место, на наш взгляд, занимает новая российская методика формирования индекса качества городской среды, позволяющая выявлять конкурентные преимущества городов и одновременно ограничения, препятствующие их развитию, а также актуальные проблемы и перспективные направления развития городов. Методика предназначена для определения качества городской среды городов путем расчета и присвоения им индекса качества городской среды, представляющего собой цифровое значение (в баллах) состояния городской среды, полученное в результате комплексной оценки количественных и поддающихся измерению индикаторов, характеризующих уровень комфорта на соответствующей территории.

На основе совокупности значений индикаторов определяются следующие уровни качества городской среды:

а) благоприятная городская среда – состояние городской среды, при котором количество набранных баллов составляет более 50 процентов максимально возможного количества баллов индекса города;

б) неблагоприятная городская среда – состояние городской среды, при котором количество набранных баллов составляет менее 50 процентов максимально возможного количества баллов индекса города.

Конкретными целями формирования индекса города при этом являются:

а) определение текущего состояния городской среды, в том числе конкурентных преимуществ города и ограничений, препятствующих его развитию, актуальных проблем и перспективных направлений развития;

б) формирование системы мониторинга процессов в сфере развития городской среды с использованием набора индикаторов, направленной на обеспечение обоснованности принимаемых на всех уровнях власти решений в сфере развития городской среды, в том числе на поддержку и вовлечение в принятие этих решений граждан;

в) обеспечение возможности сопоставления условий жизни населения в различных городах и регионах;

г) повышение открытости для граждан и общественности результатов работы органов власти в сфере развития городской среды и создание основы для оценки эффективности их работы в этой сфере;

д) стимулирование граждан и представителей бизнеса к их вовлечению в реализацию мероприятий по благоустройству городов [1].

Результаты формирования индекса на практике используются в реализации положений Указа «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации», национального проекта «Жильё и городская среда», в части определения размера денежных средств из федерального бюджета бюджетам субъектов Российской Федерации на поддержку госпрограмм субъектов и муниципальных программ.

В Беларуси необходима разработка республиканской программы по формированию комфортной городской среды, основной целью которого является создание условий для системного повышения качества и комфорта городской среды в городах и населенных пунктах Республики Беларусь. Необходима также и разработка индекса качества городской среды, создание механизмов развития комфортной городской среды, комплексного развития городов и других населенных пунктов с учетом индекса качества городской среды.

Сегодня важно дополнить существующую градостроительную документацию стратегиями пространственного развития городов и регионов, мастер-планами, направленными на качественное переосмысление развития городов и территорий. В стране уже были разработаны и утверждены ряд пилотных стратегий, в частности в 2019 г. Стратегия пространственного развития г. Бреста до 2050 г. Реализация сформулированных положений по развитию города и городской среды уже дали качественный скачок в развитии города Бреста в 2019–2024 гг. По итогам 2022 года Брест стал победителем среди крупных городов Беларуси и первым в рейтинге по развитию качества городской среды.

Направление 2. Комплексная индивидуальная и смешанная застройка пригородных зон больших и крупных городов

В рамках Директивы Президента Республики Беларусь № 8 от 4 марта 2029 года «О приоритетных направлениях развития строительной отрасли» в части принятия мер по комплексному развитию территорий сформулирован ряд мероприятий, в частности внедрение в практику возведения индивидуального жилья путем комплексной застройки земельных участков одним застройщиком, предусматривающее размещение в жилых домах встроенных и пристроенных помещений общественного назначения.

Образ современного жилья со всеми удобствами в экологически чистом месте, вблизи леса или водоема, в хорошей транспортной доступности весьма привлекателен, особенно для большой семьи, по сравнению с суетой большого города и жизнью в бетонных многоэтажных районах. Поэтому о дезурбанизации сегодня заговорили вновь, а переезд в пригород становится актуальным направлением для активного молодого поколения, особенно той его части, что живет в мегаполисах и больших городах.

Для реализации данного подхода в Брестской области разрабатываются градостроительные проекты общего и специального планирования. В 2023 году утвержден Проект пригородной зоны областного центра (в радиусе 15–20 км, включая город-спутник Жабинку, рисунок 1). Проектом пригородной зоны определены территориальные резервы в границах сельских населенных пунктов для усадебного жилищного строительства в интересах города-центра и сельской местности пригородной зоны г. Бреста. Общая площадь выявленных для доосвоения площадок составила около 1,6 тыс. га, что полностью обеспечивает имеющийся дефицит земельных участков. Из общего числа выбрано 36 сельских населенных пунктов, имеющих площадки для доосвоения. Из них 25 расположены в Брестской части пригородной зоны, 11 – в Жабинковской. Это населенные пункты, имеющие удобные автодорожные, железнодорожные транспортные связи с городами Брестом и Жабинкой. Из числа выбранных для доосвоения площадок в населенных пунктах Брестской части пригородной зоны намечен ряд приоритетных для освоения площадок. Они расположены в ближайшем окружении областного центра.

Все площадки расположены в освоенной части населенных пунктов, удобно связаны с городом сетью автодорог. В большинстве из них имеются объекты социальной и инженерной инфраструктуры, что немаловажно на начальном этапе освоения площадок. К ним относятся: в Мотыкальском сельсовете – д. Ковердяки, д. Скоки; в Тельминском сельсовете – д. Малые Косичи, д. Тельмы-1; в Мухавецком сельсовете – д. Подлесье Каменецкое, д. Каменца Жировецкая; в Знаменском сельсовете – аг. Страдечь, д. Прилуки; в Чернавчицком сельсовете – д. Козловичи; в Чернинском сельсовете – аг. Черни, д. Большая Курница. Общая площадь приоритетных (первая очередь) для освоения площадок составила более 400 га.

Параллельно с вопросами размещения участков необходимо обратить внимание на современный комплексный подход и регламенты архитектуры и застройки. Важно говорить в целом о культуре застройки. К сожалению, сложившиеся усадебные поселки в регионах страны редко обладают архитектурной эстетикой. Как правило, разнообразные ограждения – по высоте, материалу, светопрозрачности, цвету; отсутствие стилистики домов; пестрящие разнообразием цвета и фактуры кровель; зачастую несоблюдение отступов от красных линий и хаотичное размещение хозяйственных построек не лучшим образом характеризуют общую культуру застройки.

Чтобы предотвратить хаотичное застраивание доосваиваемых территорий населенных пунктов, необходимо вести строительство после разработки архитектурных концепций и совмещенных проектов генерального и детального планирования. При едином застройщике проще добиться соблюдения общей архитектурной концепции, комплексной застройки. Перед выделением участков под жилищное строительство необходимо обеспечить комплексную подготовку территории с прокладкой необходимых инженерно-транспортных коммуникаций. Это серьезные бюджетные либо инвестиционные вложения, поэтому дешевым такое жилье не назовешь.

Сегодня в Брестской области разрабатываются новые комплексные проекты генпланов сельсоветов, включающих несколько деревень, населенных пунктов, в основном это территории вокруг больших городов, городов внутриобластного подчинения, где имеется большой спрос на жилье. Это новый опыт разработки таких комплексных проектов. По результатам градостроительной документации определены приоритетные площадки для развития с учетом имеющихся сетей и земель сельхозназначения. Затем в упрощенном порядке разрабатываются архитектурные концепции кварталов застройки, а площадки могут предоставляться для инвесторов или УКСов для комплексного освоения. По такому принципу УКСом Брестского района ведется строительство квартала смешанной застройки в д. Ковердяки пригородной зоны Бреста.

Интересным опытом может служить строительство в Российской Федерации поселков эконом-, комфорт- и бизнес класса. Данный фактор зависит от механизма предоставления участка, а также удаленности от областного центра, близости транспортной и инженерной инфраструктуры, близости природных комплексов (лес, река, озеро), наличия или отсутствия единого стиля застройки, оригинальных, современных архитектурных решений, размера участков, ширины улиц и проездов, наличия парковых зон, плотности застройки, социальной и бытовой инфраструктуры, благоустройства.

Размер земельного участка при усадебном доме в сельских населенных пунктах пригородной зоны может варьироваться до 0,15 га. На участках доосвоения предлагается размещать преимущественно малоэтажную жилую застройку высоких потребительских качеств. В качестве примеров в г. Бресте могут служить районы комплексной застройки «Малиновка», «Стимово», застройка по ул. Высоковской, «Скандинавское предместье».

Для комплексности и ансамбливости застройки в рамках архитектурной концепции определяется стилевое и архитектурно-планировочное решение. В регламентах предлагается обозначать требования к жилому дому, хозяйственной постройке (цвет кровли, отделка фасада, этажность, вид и высота ограждений, требования к территории и озеленению). Приоритет отдавать усадебной застройке со средним участком 8–12 соток, примерно 15–20 % – многоквартирной малоэтажной застройке и еще 15–30 % – блокированной застройке с участками 2–8 соток. В поселках для нуждающихся предлагается увеличить процент блокированной застройки для удешевления строительства инфраструктуры и реализации единой концепции застройки [4].

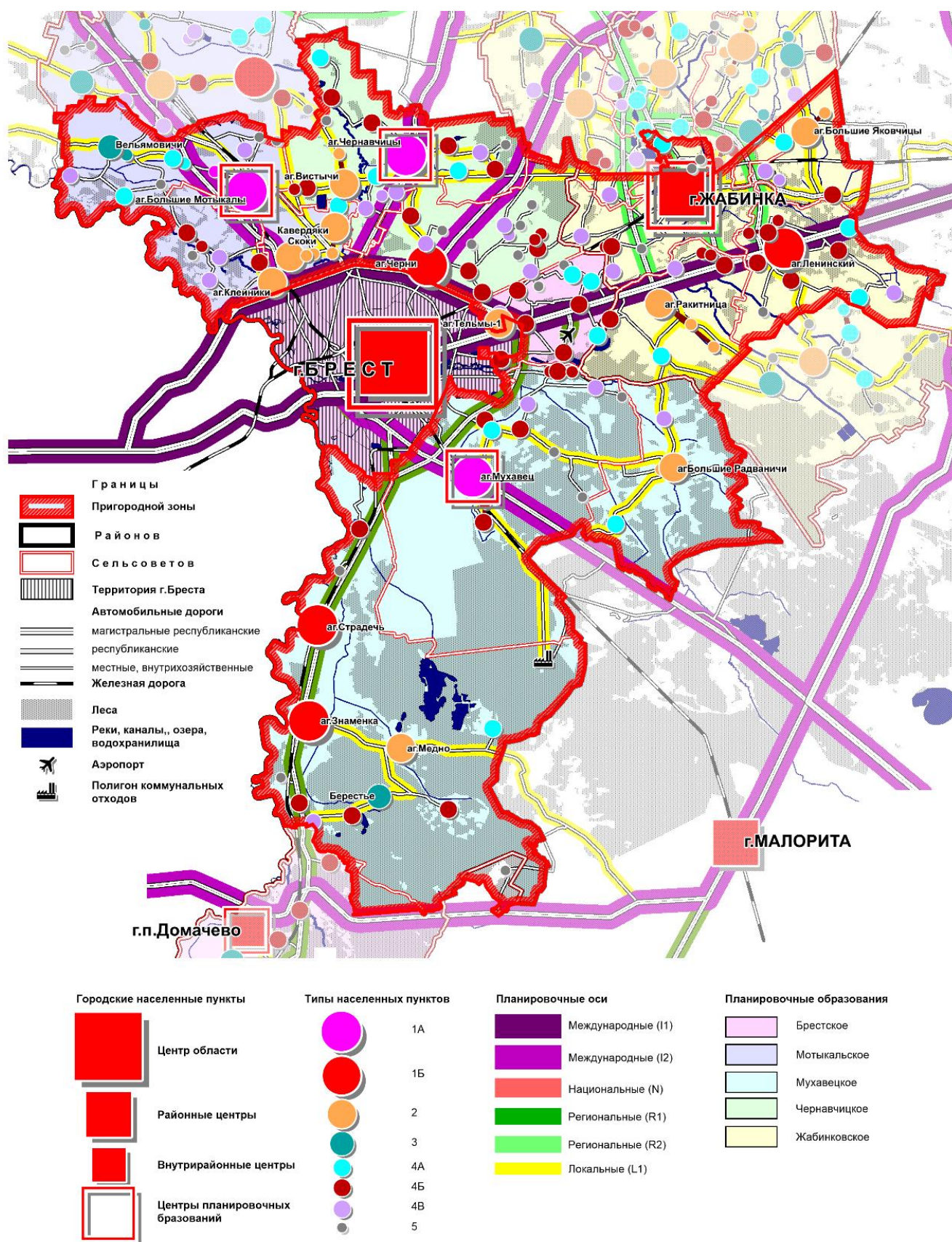


Рисунок 1 – Проект пригородной зоны Бреста. УП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА»

Размещение нового жилищного строительства должно непременно сопровождаться соответствующим развитием сферы услуг, формированием полноценных комплексов обслуживания соответ-

ствующего уровня. В населенных пунктах пригородной зоны необходимо предусматривать повышение уровня инженерного оборудования и транспортного обеспечения территории для создания комфор-

та проживания и отдыха населения, а также снижения нагрузки на природный комплекс проектируемой территории.

Государственной программой «Строительство жилья» на 2021–2025 годы развитие индивидуального жилищного строительства определено в качестве одного из приоритетных направлений. Доля ввода индивидуального жилья по Брестской области традиционно составляет порядка 50 % от общего ввода жилья по региону, что выше среднереспубликанского значения. По данному показателю область за период 2020–2024 годы занимает второе место в республике после Минской области.

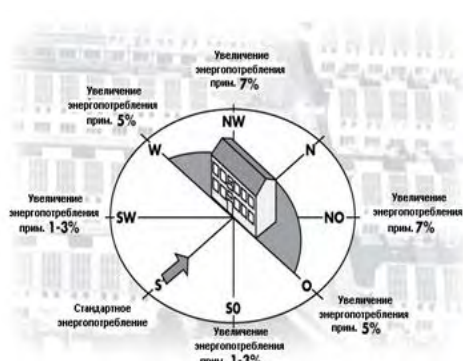
Предложенные подходы и пилотные проекты позволяют определять наиболее подготовленные площадки, системно формируя и реконструируя застройку существующих деревень, а также позволяет комплексно застраивать жилые кварталы смешанной блокированной, усадебной и малоэтажной блокированной застройки.

Направление 3. Строительство жилья, объектов социальной инфраструктуры и административных зданий в энергоэффективном исполнении

Работа, проводимая в Беларуси по повышению энергоэффективности в строительной сфере, имеет достаточно развитую законодательную основу, что способствует повышению рейтинга страны среди высокоразвитых промышленных государств по

показателям рационального использования ресурсов. Тем не менее, до настоящего времени вопросы энергосбережения рассматривались лишь в рамках создания отдельных объектов – зданий, технологий, элементов инфраструктуры. В рамках проекта «Инициатива по энергосбережению» (ESIB) с участием Министерства архитектуры и строительства Беларуси предлагалось использовать интегральный подход к вопросам повышения энергоэффективности, а именно – рассматривать возможность экономии ресурсов через развитие городского пространства, где отдельные объекты, в частности жилые здания, являются лишь одним из его составляющих.

Предлагается комплексно подойти к проектированию и строительству не отдельных энергоэффективных домов, а целого городского квартала или района. Такой подход позволяет эффективно застраивать и экономить за счет компактности и многофункциональности застройки, правильной ориентации групп зданий для максимального использования потенциала солнечной энергии, минимальной протяженности, длины инженерных сетей, возобновляемых источников энергии и местных видов топлива (биомассы), когенерации и тригенерации, использования потенциала дождевой канализации, популяризации экологического транспорта и велодвижения, использование потенциала озелененных и водных территорий (рисунок 2). Нужны пилотные проекты.



ФАКТОРЫ ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

1. Компактность и многофункциональность застройки.
2. Правильная ориентация групп зданий для максимального использования потенциала солнечной энергии.
3. Минимальная протяженность инженерных сетей.
4. Возобновляемые источники энергии и местных видов топлива (биомассы), когенерация и тригенерация.
5. Использование потенциала дождевой канализации.
6. Развитая сеть общественного экологического транспорта, популяризация велодвижения.
7. Использование потенциала озелененных и водных территорий.

Рисунок 2 – Модель энергоэффективного модуля; факторы, влияющие на энергоэффективность

С этой целью на основе теоретической модели нового жилого модуля с высокими качествами застройки и энергоэффективными планировочными, архитектурными и инженерными решениями была разработана методика исследования, а в качестве объекта исследования определен *жилой район «Березовка»* в городе Бресте (Беларусь). Для проведения анализа и оценки разработано *три варианта застройки* данной территории (рисунок 3):

1. Модель типового микрорайона с высотой жилых зданий 9–10 этажей, разработанная на основе технико-экономических показателей существующей застройки г. Бреста белорусской архитектурной мастерской URBANPLUNGER (с учетом проектных решений микрорайонов проектного института ОАО «Брестпроект»).

2. Модульная застройка, предложенная УП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА» и характеризующаяся небольшой этажностью (3–5 этажей), полузакрытыми дворовыми пространствами, организа-

цией мест хранения автотранспорта за пределами жилых дворов, наличием широких пешеходных дорожек, использованием более эффективных инженерных сетей, уличного освещения, развитым благоустройством территории с учетом принципов «универсального дизайна», разнообразием номенклатуры зеленых насаждений и т. п.

3. Строчная микрорайонная застройка с высокими показателями энергоэффективности зданий, предложенная международным экспертом инженером-архитектором, специалистом по энергоэффективности компании «Sofresco». В этом варианте основной акцент сделан на ориентацию и форму зданий, позволяющую максимально использовать солнечную энергию наружными поверхностями зданий.

Основным критерием эффективности градостроительного использования жилых территорий является показатель плотности жилой застройки, которая обусловлена: типологией жилых домов, характером их блокировки, организацией междомовых территорий

(количество автостоянок, площадок для отдыха, озелененных пространств). Сегодня в белорусских городах плотность застройки в среднем гораздо ниже нормативной. В предложенной модели застройки со средней этажностью 4–7 этажей при соответствии требо-

ваний санитарных, инсоляции, противопожарной защиты, прокладки инженерных сетей и технологических коммуникаций, показатели плотности жилищного фонда получились сопоставимыми или значительно выше застраиваемых.



Рисунок 3 – Эскизные планировочные решения района Березовка г. Бреста для сравнительного анализа

Помимо обеспечения компактности застройки, обеспечивающей экономии всех ресурсов территории – инженерных, транспортных, природных, человеческих, данная модель учитывает сомасштабность зданий человеку; создание зеленых зон и современное благоустройство (доля территорий, занятых газонами и зелеными насаждениями, составляет 57 % всей территории модуля); наличие мест отдыха для различных возрастных групп населения, пешеходных улиц и велодорожек (застройка с местами для спокойного отдыха и прогулок, интересного и полезного времяпрепровождения, спортивные площадки и детские городки); доступность всех необходимых сервисов и услуг, в том числе размещение чистого производства, обеспечивающее занятость в шаговой доступности и сокращающее ежедневные миграционные перемещения граждан и нагрузку на городской транспорт; повышение качества работы транспортной системы в жилом районе и в городе в целом, что будет способствовать использованию общественного транспорта вместо автомобиля; активное использование в отечественной практике альтернативных источников энергии (фотогальванических панно, геотермальных установок и др.); преимущественное использование зданий класса А+, А и В по показателю энергоэффективности (уменьшение расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию; применение эффективных утеплителей и материалов в строительстве зданий; активное применение эффективных пространственных объемно-планировочных решений, обеспечивающих многоплановость застройки, композиционную привлекательность, узнаваемость и индивидуальность места взамен сложной детализированной пластики фасадов, удорожающей стоимость строительства объекта; эффективную систему управления отходами, позволяющую вторично использовать ресурсы; минимизацию необходимости пересечения улиц с интенсивным движением особенно для безопасности детей и пожилых граждан; сокращение уровня шума (за счет создания бестранспортных соседств, стимулирования пешеходного и велосипедного движения внутри модуля), соответствующую инсоляцию и аэрацию территории; планирование территории по принципу создания безлестничной и безбарьерной среды; обеспечением вечернего освещения территории; бесперебойное обслуживание территории и объектов (внедрение автономных источников энергообеспечения).

В условиях рыночных отношений и экономии ресурсов участники процесса планирования должны оперативно реагировать и отвечать возрастающим стандартам качества проекта развития инвестиционной площадки (территории), адаптироваться к сжатым срокам проектирования и обеспечивать планировочное решение, отвечающее требованиям удешевления проектных работ и застройки.

В соответствии с приоритетами градостроительной политики Республики Беларусь основным условием застройки населенных пунктов является соблюдение принципов безопасности, комфортности и эффективности.

1. В контексте пространственной организации рассматриваемого района **безопасность** обеспечивается:

- отсутствием (минимизацией) необходимости пересечения улиц с интенсивным движением для детей (по дороге в школу, детский сад, на игровую площадку) и пожилых граждан (по дороге в магазин, аптеку, парк);
- качеством воздуха, минимизацией уровня шума (за счет создания бестранспортных соседств, стимулирования пешеходного и велосипедного движения внутри модуля), инсоляцией и аэрацией территории;
- планированием территории по принципу создания безлестничной и безбарьерной среды;
- обеспечением соответствующего санитарного состояния территории (использованием передовых технологий мусороудаления);
- обеспечением вечернего освещения территории;
- наличием социальных связей – «комьюнити» (жильцы контролируют территорию);
- бесперебойным обслуживанием территории и объектов (внедрение автономных источников энергообеспечения).

2. В контексте пространственной организации модуля **комфортность** обеспечивается:

- застройкой сомасштабными человеку зданиями малой и средней этажности с активными первыми этажами;
- наличием зеленых зон, современного благоустройства и озеленением территории с учетом разнообразия зеленых насаждений;
- наличием мест отдыха для различных возрастных групп населения;
- шаговой доступностью всех необходимых сервисов и услуг;

- наличием достаточного количества общественных пространств, мест проведения свободного времени и культурного развития (обеспечивающих возможность творческой самореализации, проявления индивидуальности, личностного развития, а также занятия спортом);

- наличием пешеходных улиц, велодорожек и безбарьерных спусков с тротуаров.

3. В контексте пространственной организации модуля **эффективность** обеспечивается:

- компактностью застройки (обеспечивающей экономию всех ресурсов территории – инженерных, транспортных, природных, человеческих);

- качественной работой транспортной системы в жилом районе и в городе в целом (стимулирующей использование общественного транспорта и велосипеда вместо автомобиля);

- наличием на территории достаточного количества рабочих мест (способствующих минимизации ежедневных перемещений населения от дома до работы и снижающих нагрузку на транспорт);

- активным использованием в отечественной практике альтернативных источников энергии (фотогальванических панно, геотермальных установок и др.);

- преимущественным использованием зданий класса А+, А и В по показателю энергоэффективности (удельного расхода тепловой

энергии на отопление и вентиляцию, применением эффективных утеплителей и материалов в строительстве зданий;

- ресурсосбережением при создании архитектурно-градостроительных объектов (активное применение эффективных пространственных объемно-планировочных решений, обеспечивающих многоплановость застройки, композиционную привлекательность, узнаваемость и индивидуальность места; минимизация использования сложной детализированной пластики фасадов, удорожающей стоимость строительства объекта);

- вторичным использованием ресурсов.

Также должны оцениваться:

энергоэффективность, где в расчет принимается ориентация зданий, инсоляция застройки, форма зданий, площадь и ориентация окон, теплопотери зданий, проектные решения системы центрального отопления, уличного освещения, эффективное использование возобновляемых источников энергии, дождевой воды;

качество окружающей среды, включающее благоустройство территории, озеленение, общественный транспорт, загрязнение CO₂;

эффективное использование территории, учитывающее этажность застройки, наличие объектов социальной инфраструктуры, досягаемость мест приложения труда, функциональный комфорт проживания (таблица 1).

Таблица 1 – Разработанная методика для проверки оптимальности энергоэффективных, экологических планировочных решений

Энергоэффективность	Окружающая среда и качество жизни	Эффективное использование городской территории
1. Ориентация по солнцу. 2. Предотвращение падения тени на поверхность здания. 3. Коэффициент формы здания. 4. Площадь окон в соответствии с ориентацией. 5. Потери тепла зданием. 6. Уличное освещение. 7. Проект системы центрального отопления. 8. Использование возобновляемых источников энергии. 9. Ливневая канализация	1. Ориентация по солнцу. 2. Пешеходные, велосипедные дорожки. 3. Детские площадки. 4. Раздельный сбор мусора ТБО, подземные контейнеры. 5. Проект инженерных систем. 6. Общественный транспорт. 7. Экологичные материалы. 8. Общее качество жизни	1. Уменьшение этажности зданий. 2. Организация местной общественной жизни. 3. Городские усовершенствования (принципы «зеленого градостроительства». 4. Создание мест приложения труда в пешеходной доступности

По ряду критериев, например, таких как ориентация застройки по солнцу и по ветру, затенение поверхности зданий, ориентированных на юг, площадь окон, теплопотери зданий, третий вариант имеет больше преимуществ. Однако он учитывает только энергоэффективные технические решения, позволяющие уменьшить расходы энергии на отопление зданий. Поэтому второй вариант, продемонстрировавший холистический подход к планированию, с учетом энергоэффективности всех ресурсов территории, комфортности и безопасности проживания, является наиболее приемлемым по количеству баллов. Кроме того, данный вариант застройки в 2,5 раза эффективнее традиционной микрорайонной системы (рисунок 3).

При разработке градостроительного проекта каждый компонент – улица, здания, энергосеть, зеленое пространство, объекты обслуживания, пешеходный тротуар – должен рассматриваться как элемент единой концепции, в центре которой находится комфорт и безопасность проживания для человека.

Предполагается, что разработанный модуль жилого района в г. Бресте станет альтернативой существующей микрорайонной системе и в других городах Беларуси. В модульной застройке должны быть учтены все преимущества существующих подходов к организации жилых районов с учетом основных принципов градостроительной политики Беларуси для населенных пунктов – безопасности, комфортности и эффективности [2, 8].

Заключение

В данной статье обозначены актуальные вопросы градостроительной политики, а также приоритетных направлений развития строительной отрасли Республики Беларусь, Стратегии развития строительного комплекса до 2035 года. Это вопросы разработки и

внедрения новых социальных стандартов и системы оценки качества городской среды и качества жизни для населенных пунктов; вопросы комплексной застройки в границах агломераций и пригородных зон больших и крупных городов; повышение энергоэффективности возводимых объектов при комплексной застройке.

Реализация пилотных проектов в Брестской области позволит апробировать поставленные правительством задачи по повышению качества среды населенных пунктов, сделать их конкурентными и ответить на ряд вопросов, связанных с их реализацией.

Список цитированных источников

1. Об утверждении методики формирования индекса качества городской среды : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 23 марта 2019 г. № 510-п // Гарант.ру : информационно-правовой портал. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72104984> (дата обращения: 28.02.2025).
2. Власюк, Н. Н. Город-сад. Стратегия и тактика пространственного развития города Бреста: концепция / Н. Н. Власюк. – Брест : БрГТУ, 2023. – 400 с.
3. Власюк, Н. Н. Брест: Эволюция и современные тенденции городского планирования / Н. Н. Власюк // Актуальные проблемы наук о земле: Исследования трансграничных регионов : IV Международная научно-практическая конференция / НАА РБ, УО «БрГУ им. А. С. Пушкина». – Брест, 2023. – С. 31–35.
4. Власюк, Н. Н. Брестская область: вектор градостроительного развития / Н. Н. Власюк // Архитектура и строительство. – 2021. – № 5. – С. 16–20.

5. Новополоцк-2040. План зеленого градостроительства. Снова новый Версия 2.0 (проект) / ПРООН-ГЭФ-Минприроды «Зеленые города». – Новополоцк, 2019. – 96 с.
 6. Лебедева, Л. С. «Качество жизни»: ключевые подходы и структура понятия / Л. С. Лебедева // Мониторинг общественного мнения: Экономические и социальные перемены. – 2018. – № 4. – С. 68–80.
 7. Урбанология – новый взгляд на изучение городов в условиях глобализации / М. А. Богдасаров, Ю. В. Богдасарова, Н. Н. Власюк, Д. В. Капский // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. – 2023. – № 2. – С. 3–16.
 8. Ułasiuk, M. Shifts in Urban planning in Belarus, Experience of Brest / M. Ułasiuk, C. Neugebauer // RWTH Aachen University. – Germany, 2020. – P. 46–55.
 9. World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities. – URL: <https://unhabitat.org/world-cities-report-2022-envisaging-the-future-of-cities> (дата обращения: 29.02.2024).
 3. Vlasjuk, N. N. Brest: Evolyuciya i sovremennye tendencii gorodskogo planirovaniya / N. N. Vlasjuk // Aktual'nye problemy nauk o zemle: Issledovaniya transgranichnyh regionov : IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya / NAA RB, UO «BrGU im. A. S. Pushkina». – Brest, 2023. – S. 31–35.
 4. Vlasjuk, N. N. Brestskaya oblast': vektor gradostroitel'nogo razvitiya / N. N. Vlasjuk // Arhitektura i stroitel'stvo. – 2021. – № 5. – S. 16–20.
 5. Novopolock-2040. Plan zelenogo gradostroitel'stva. Snova novyj Versiya 2.0 (proekt) / PROON-GEF-Minprirody «Zelenye goroda». – Novopolock, 2019. – 96 s.
 6. Lebedeva, L. S. «Kachestvo zhizni»: klyuchevye podhody i struktura ponyatiya / L. S. Lebedeva // Monitoring obshchestvennogo mneniya: Ekonomicheskie i social'nye peremeny. – 2018. – № 4. – S. 68–80.
 7. Urbanologiya – novyj vzglyad na izuchenie gorodov v usloviyah globalizacii / M. A. Bogdasarov, YU. V. Bogdasarova, N. N. Vlasjuk, D. V. Kapskij // Zhurn. Belorus. gos. un-ta. Geografiya. Geologiya. – 2023. – № 2. – S. 3–16.
 8. Ułasiuk, M. Shifts in Urban planning in Belarus, Experience of Brest / M. Ułasiuk, C. Neugebauer // RWTH Aachen University. – Germany, 2020. – P. 46–55.
 9. World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities. – URL: <https://unhabitat.org/world-cities-report-2022-envisaging-the-future-of-cities> (data obrashcheniya: 29.02.2024).
- References**
1. Ob utverzhdenii metodiki formirovaniya indeksa kachestva gorodskoj sredy : rasporyazhenie Pravitel'stva Ros. Federacii ot 23 marta 2019 g. № 510-r // Garant.ru : informacionno-pravovoj portal. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72104984> (data obrashcheniya: 28.02.2025).
 2. Vlasjuk, N. N. Gorod-sad. Strategiya i taktika prostranstvennogo razvitiya goroda Bresta: koncepciya / N. N. Vlasjuk. – Brest : BrGTU, 2023. – 400 s.
- Материал поступил 05.03.2025, одобрен 17.03.2025, принят к публикации 17.03.2025*

УДК 624.014

МЕСТНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СЕТЧАТЫХ КУПОЛОВ С ШАРНИРНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ СТЕРЖНЕЙ В УЗЛАХ ПРИ ДЕЙСТВИИ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ НАГРУЗКИ

К. К. Глушко¹, К. А. Глушко², Н. В. Матвеев³, Н. Н. Шалобыта⁴

¹ К. т. н., доцент кафедры архитектуры, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: konstantin.glushko@bk.ru

² К. т. н., доцент, доцент кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: diki69niki@mail.ru

³ Старший научный сотрудник ОП НИЦИС, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nikifarych@yandex.ru

⁴ К. т. н., доцент, проректор по научной работе, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nnshalobyta@bstu.by

Реферат

Сетчатые купола в качестве несущих конструкций покрытий зданий применяются с второй половины XIX века, тем не менее совершенствование методов расчёта таких конструкций ведётся и до сих пор. Особую сложность вызывает оценка критических нагрузок, вызывающих их потерю устойчивости, поскольку деформирование сетчатых куполов изначально геометрически нелинейно. В настоящее время существуют два основных метода решения подобных задач: численный и аналитический. Несмотря на широкое развитие численных методов, аналитические методы по-прежнему остаются актуальными из-за своей простоты и однозначности решений. Развитие систем компьютерной математики позволяет уменьшить количество математических упрощений, снижающих точность аналитических методов, увеличить количество наиболее значимых переменных на стадии формализации и построения математических моделей устойчивости сетчатых куполов. Одним из вопросов, не решённым однозначно до настоящего времени, является вопрос местной устойчивости сетчатых куполов, а именно определения критической нагрузки, вызывающей продавливание их узлов к центру кривизны описанной поверхности.

В результате анализа существующих подходов к решению задачи потери устойчивости формы однослойных сетчатых куполов с шарнирными узлами отдано предпочтение разработке методики проверки устойчивости их формы, основанной на аналитических зависимостях изменения внутренних усилий в стержнях, учитывающих геометрически нелинейное деформирование образующих их стержневых многогранников.

В представленной работе рассмотрена задача местной устойчивости стальных сетчатых куполов с шарнирным соединением стержней в узлах при действии внешней нагрузки на стержни, распределённой по треугольному закону. Определены зависимости изменения параметров критической нагрузки, распределённой по длине стержней. Для более точного описания продольно-поперечного изгиба в стержнях применён метод конечных разностей. Сформулировано условие местной устойчивости сетчатых куполов.

Ключевые слова: сетчатый купол, устойчивость, продольно-поперечный изгиб, жёсткость, критическая нагрузка, узел.

LOCAL STABILITY OF MESH DOMES WITH HINGED CONNECTION OF RODS IN NODES UNDER DISTRIBUTED LOAD ACTIONS

K. K. Hlushko, K. A. Hlushko, N. V. Matweenko, N. N. Shalobyta

Abstract

Mesh domes as load-bearing structures of building coverings have been used since the second half of the 19th century; nevertheless, the methods of calculation of such structures are still being improved. The evaluation of critical loads causing their loss of stability is particularly difficult, since the deformation of mesh domes is initially geometrically nonlinear. Currently, there are two main methods for solving such problems: numerical and analytical. Despite the wide development of numerical methods, analytical methods are still relevant because of their simplicity and unambiguity of solutions. The development of computer mathematics systems allows to reduce the number of mathematical simplifications that reduce the accuracy of analytical methods, to increase the number of the most important variables at the stage of formalization and construction of mathematical models of stability of mesh domes. One of the issues that has not been solved unambiguously up to the present time is the issue of local stability of mesh domes, namely, the determination of the critical load that causes their nodes to push through to the center of curvature of the described surface.

As a result of the analysis of existing approaches to solving the problem of loss of stability of the shape of single-layer mesh domes with hinged nodes, preference was given to the development of a technique for checking the stability of their shape based on analytical dependences of changes in the internal forces in the rods, taking into account geometrically nonlinear deformation of the rod polyhedrons forming them.

In the presented work the problem of local stability of steel mesh domes with hinged connection of rods in nodes under the action of external load on the rods distributed according to the triangular law is considered. The dependences of changes in the parameters of the critical load distributed along the length of the rods have been determined. For a more accurate description of longitudinal-transverse bending in the rods, the finite difference method is applied. The condition of local stability of mesh domes is formulated.

Keywords: mesh dome, stability, longitudinal-transverse bending, stiffness, critical load, knot.

Введение

Необходимость перекрытия больших пролётов вызывает необходимость применения пространственных конструкций, которые наиболее эффективны по расходу материалов к единице перекрываемой площади, имеют высокую жёсткость и опыт применения в строительстве [1].

В работах [1–15] изложены решения задачи местной устойчивости сетчатых куполов с жёсткими, податливыми и шарнирными узлами при действии сосредоточенной узловой нагрузки. Малая изученность отдельных видов устойчивости конструкций такого вида, как, например, вопрос о наступлении местной устойчивости сетчатых куполов, нагру-

женных распределённой по поверхности нагрузкой, передаваемой на стержни, не сосредоточенно в узлах, а распределённо по длине, препятствуют широкому применению [1]. Как правило, такое нагружение характерно для беспрогонной кровли (в сетчатых куполах, применяемых в качестве световых фонарей для верхнего света в помещениях зданий различного назначения), внешняя оболочка покрытия при этом соединена со стержнями непосредственно. При этом длины стержней сетчатых куполов позволяют устроить остекление без дополнительных несущих конструкций. В этом случае внешняя нагрузка, распределённая по криволинейной поверхности по некоторому закону, передаётся на стержни с переменной шириной грузовой площадки. При незначительной разнице

в длинах стержней максимальные значения распределённой нагрузки на стержни будут находиться в их середине. Стержни сетчатого купола будут при этом испытывать продольно-поперечный изгиб, сопровождающийся поворотом их концов и изменением проекций внутренних усилий. Поскольку угол поворота хорды стержня при перемещении узлов сетчатого купола при потере местной устойчивости имеет тот же порядок малости, что и угол поворота концов стержня, необходимо учесть влияние последних на величину критической нагрузки, приводящей к продавливанию узлов стержневых многогранников, образующих сетчатый купол, к центру описанной сферы.

Построение методики проверки устойчивости сетчатых куполов с шарнирными узлами

Целью представленной работы является определение параметра критической величины распределённой внешней нагрузки по длине стержня в сетчатых куполах, составленных из шарнирно-стержневых многогранников.

На рисунке 1 представлен план радиально-кольцевого сетчатого купола и его фрагмент в пределах смежных плоскостей симметрии.

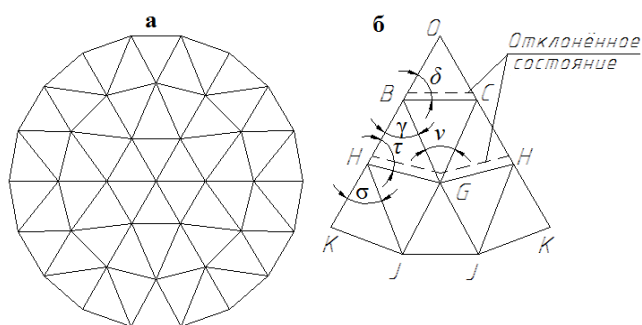


Рисунок 1 – План двухъярусного фрагмента сетчатого купола (а), его сегмент в исходном и в равновесном отклонённом состоянии в плане (б)

Следует рассмотреть деформирование стержней трёхъярусного фрагмента сетчатого купола, приняв его опирание шарнирно-неподвижным.

Основные предпосылки, принятые в расчёте:

- 1) форма равновесия симметрична, вертикально действующая внешняя нагрузка является осесимметричной;
- 2) длины стержней различаются незначительно и могут быть приняты одинаковыми;
- 3) моменты инерции относительно горизонтальной оси поперечного сечения стержня и площади поперечных сечений стержней одинаковы;

$$\frac{N_{CG}}{\rho_1^2 EA} = \bar{\varepsilon}_{CG} = 9\chi_2(1 - 0.5\chi_2) - 0.5 \cdot \varepsilon_{BC} \sec \delta \cos \gamma; \quad (3)$$

из условий равновесия продольных сил в узлах типа В, пренебрегая проекциями поперечных сил на касательную плоскость в этих узлах:

$$\frac{N_{BC}}{\rho_1^2 EA} = \bar{\varepsilon}_{BC} = \frac{9\chi_2(1 - 0.5\chi_2)(1 + 2 \cos \gamma) - \chi_1(1 - 0.5\chi_1)}{2 \cos \delta + \sec \delta(1 + \cos^2 \gamma)}, \quad (4)$$

где χ_1, χ_2 – безразмерные параметры перемещений узлов, численно равные отношению перемещения узла в пределах яруса купола f к высоте яруса Δ ;

N_i – продольная сила в стержне, м;

ρ_1 – угол наклона стержней верхнего яруса к касательной плоскости в точке касания узла О описанной сферы.

В работах [16–18, 20] изложено построение методики проверки устойчивости сетчатых куполов с жёсткими узлами, в которых учтено влияние продольно-поперечного изгиба стержней, приводящего к изменению поперечной силы. Следует использовать дифференциальное уравнение продольного изгиба для установления изменения величины поперечной силы в стержнях также и для шарнирно-

4) материал стержней изотропен, деформирование стержней является упругим;

5) размерами узлов на напряжённо-деформированное состояние сетчатых куполов можно пренебречь;

6) воздействия на сетчатые купола являются силовыми;

7) стержни кольцевых рядов горизонтальны как в исходном состоянии, так и в отклонённом равновесном состоянии в силу симметрии;

8) кривизна стержней велика, продольные деформации изогнутых стержней принимаются равными продольным деформациям их хорд.

Вывод зависимостей, позволяющих определить величины безразмерных параметров продольных деформаций стержней относительно безразмерных параметров перемещений, приведён в работе, посвящённой исследованию местной устойчивости сетчатых куполов с шарнирными узлами с учётом их деформирования [16–20]. В работах [16, 17, 19] произведено сравнение характера деформирования стержневого многогранника в составе двухъярусного и трёхъярусного сетчатых куполов. При сравнении параметров критических нагрузок, которые являются локальными максимумами на полученных диаграммах равновесных состояний, выявлено, что расхождение между ними не превышает 0,7 % – 1 %. Из этого следует, что влияние напряжённо-деформированного состояния стержней, находящихся за пределами двух верхних ярусов купола, оказывает малое влияние на характер деформирования верхнего стержневого многогранника. При этом выявлено, что в нагруженной части сетчатого купола можно выделить двухъярусный фрагмент, нагрузка на узлы которого может быть принята осесимметричной и перпендикулярной его основанию без значительной погрешности. Геометрические параметры двухъярусного сетчатого купола и геометрические характеристики поперечных сечений его стержней должны быть аналогичны выделенному в полноразмерном сетчатом куполе двухъярусному фрагменту. Таким образом, проверку местной устойчивости сетчатых куполов можно производить не только при осесимметричном их нагружении в целом, но и при нагружении некоторой области, внутри которой нагрузка на выделенные двухъярусные фрагменты может быть принята осесимметричной.

Принимая неизменным обозначения узлов двухъярусного фрагмента сетчатого купола, эти зависимости можно записать в следующем виде:

$$\frac{N_{OC}}{\rho_1^2 EA} = \bar{\varepsilon}_{OC} = \chi_1(1 - 0.5\chi_1) + 0.5 \cdot \varepsilon_{BC} \sec \delta; \quad (1)$$

$$\frac{N_{CH}}{\rho_1^2 EA} = \bar{\varepsilon}_{CH} = 9\chi_2(1 - 0.5\chi_2) - 0.5 \cdot \varepsilon_{BC} \sec \delta; \quad (2)$$

стержневых сетчатых куполов. Для этого следует рассмотреть дифференциальное уравнение изгиба стержня четвёртого порядка:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + N \frac{d^2 w}{dx^2} = q(x), \quad (5)$$

$q(x)$ – закон изменения распределённой нагрузки по длине стержня, Н/м,

N – величина продольной силы в стержне, Н.

Для установления закона действующей нагрузки на стержень необходимо рассмотреть фрагмент однослойного сетчатого купола, находящийся в секторе симметрии. На рисунке 2 показан рассматриваемый фрагмент и верхний стержневой многогранник с обозначением грузовых площадей.

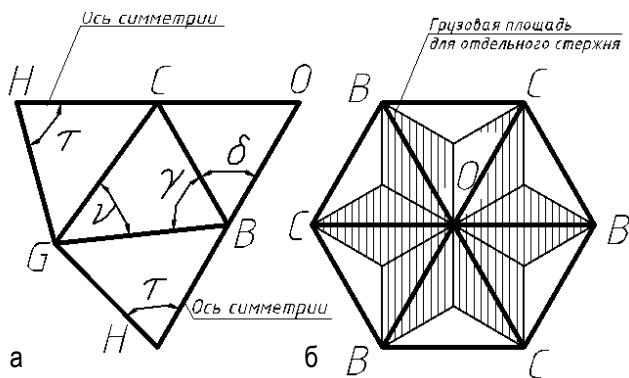


Рисунок 2 – Фрагмент сетчатого купола (а) и определение грузовых площадей (б)

В силу переменной ширины грузовой площадки величина распределённой нагрузки будет изменяться по длине стержня, при этом максимальное значение придётся на его середину. Решение дифференциального уравнения (5) произведено для случая действия нагрузки на стержень, распределённой по длине по закону параболы

$$w = \frac{q_{\max} L^4}{u^6 EI} \left(6 \left(\cos(u \cdot \xi) - \frac{\sin(u \cdot \xi)(\cos u - 1)}{\sin u} \right) - \frac{1}{4} \left(u^4 \xi^4 - 2u^4 \xi^3 + 12u^2 \xi^2 + \xi u^2 (u^2 + 12) + 24 \right) \right), \quad (7)$$

где u – безразмерный параметр продольной силы в стержне:

$$u = l \sqrt{\frac{N}{EI}} = \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_1^2 L^2 EA}{EI}} = n \sqrt{\varepsilon}, \quad (8)$$

n – эквивалентная гибкость, параметр, связывающий геометрические характеристики выбранного сечения и геометрические характеристики стержневого многогранника [12]:

$$n = \sqrt{\frac{L^2 \rho_1^2 EA}{EI}} = \frac{\rho_1 \cdot L}{i} = \frac{\Delta_1}{i}, \quad (9)$$

Δ_1 – стрела подъёма верхнего стержневого многогранника, м,

i – радиус инерции поперечного сечения, м.

Выражение для определения величины поперечной силы на концах стержня может быть получено из уравнения (7):

$$\theta = \frac{q_{\max} L^3}{EI} \cdot \left(\frac{1}{4u^2} + \frac{3}{u^4} + \frac{12(\cos^2(0.5u) - 1)}{u^5 \sin u} \right). \quad (13)$$

Уравнение равновесия внутренних сил в узлах меридиональной дуги при отсутствии сосредоточенных внешних сил можно записать в следующем виде:

$$N_{CH} \cdot (3\rho_1(1 - \chi_2) + \theta_{CH}) + 2N_{CG} \cdot (3\rho_1(1 - \chi_2) + \theta_{CG}) - N_{OC}(\rho_1(1 - \chi_1) + \theta_{OC}) = Q_{OC} - Q_{CH} - 2Q_{CG}; \quad (14)$$

$$N_{OC}(\rho_1(1 - \chi_1) + \theta_{OC}) = Q_{OC}, \quad (15)$$

разделив которые на $\rho_1^3 EA$ и соотнеся правые и левые части, можно получить следующее уравнение, которое решается относительно безразмерных параметров перемещений узлов χ_2 нижнего

$$\frac{3(1 - \chi_2)(\varepsilon_{CH} + 2\varepsilon_{CG}) - \varepsilon_{OC}(1 - \chi_1)}{\varepsilon_{OC}(1 - \chi_1)} = \frac{Q_{OC} - \omega \cdot (Q_{CH} + 2Q_{CG})}{Q_{OC}} + n^2 \frac{\Theta_{OC} - \omega \cdot (\Theta_{CH} + 2\Theta_{CG})}{Q_{OC}}, \quad (16)$$

где ω – соотношение максимальных величин распределённых нагрузок в верхнем и нижележащем ярусе рассматриваемого двухъярусного фрагмента сетчатого купола;

Θ – правая часть выражения (13), стоящая внутри скобок, применённая для соответствующего стержня.

В случае растяжения в стержнях типа BC кольцевых направлений в выражении (11) тригонометрические функции необходимо заменить на одноимённые гиперболические.

как непрерывной функции, площадь которой равна площади нагрузки, распределённой по треугольному закону. Таким образом, равнодействующие величины нагрузок, распределённых по длине стержня по треугольному закону и по закону параболы, равны по значению, величины значений поперечных сил на концах также равны. Непрерывная функция распределённой нагрузки может быть записана в следующем виде:

$$q(\xi) = 3q_{\max} \xi(1 - \xi), \quad (6)$$

где $q(\xi)$ – закон изменения непрерывной параболической нагрузки по длине стержня, Н/м;

$\xi = x/L$ – безразмерная координата длины;

x – текущая координата, м;

L – длина стержня, м.

Такое представление формы внешней нагрузки является несколько приближённым, однако при значительной разнице длин смежных стержней изменение распределённой нагрузки может быть аппроксимировано при помощи выражения (6). Приняв равным нулю вертикальные перемещения концов стержней, а также приняв равными нулю изгибающие моменты на концах, общее решение дифференциального уравнения (5) теперь запишется в следующем виде:

$$Q = EI \frac{d^3 w}{dx^3} = \frac{q_{\max} L}{4} \varphi(u), \quad (10)$$

где $\varphi(u)$ – функция изменения величины поперечной силы на конце стержня из-за поворота концевой поперечной сечения:

$$\varphi(u) = 12 \frac{4 \sin^2(0.5u) - u \sin u}{u^3 \sin u}, \quad (11)$$

при этом

$$\lim_{u \rightarrow 0} \varphi(u) = 1. \quad (12)$$

Выражение для определения величины углов поворота концов стержней может быть получено путём дифференцирования уравнения (7):

яруса рассматриваемого двухъярусного фрагмента сетчатого купола, при задании параметров перемещения узлов верхнего яруса χ_1 и эквивалентной гибкости n :

$$\Delta^4 w + \frac{u^2}{k^2} \Delta^2 w = \frac{L^4}{k^4 EI} q, \quad (17)$$

где функция нагрузки представлена в следующем виде:

$$q = q_{\max} \cdot \begin{cases} \frac{2}{k} i, & i \leq \frac{k}{2}; \\ 1 - \frac{2}{k} i, & \frac{k}{2} < i \leq k; \quad i = 1, 2, 3 \dots k, \end{cases} \quad (18)$$

k – число участков разбиения стержня по длине;

i – порядковый номер участка разбиения длины стержня, порядковый номер узла (при начале нумерации узлов, в которых составляются конечные разности по длине стержня $i = 0$).

В матричной записи уравнение (16) может быть представлено в виде:

$$[D_4] = \begin{bmatrix} \text{Область граничных условий} \\ \text{(2 строки)} \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & \dots \\ \dots & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ \text{Область граничных условий} \\ \text{(2 строки)} \end{bmatrix}, [D_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix}, [\bar{q}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ q_2 / q_{\max} \\ \dots \\ q_{k-2} / q_{\max} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (20)$$

$$[D] = [D_4] + \frac{u^2}{k^2} [D_2]. \quad (21)$$

Схема деления стержня на узлы, в которых производится решение уравнения (17), и нумерация участков длиной L/k приведена на рисунке 3.

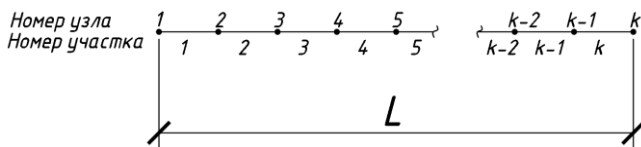


Рисунок 3 – Схема разбиения стержня по длине

Формулировка возможных граничных условий для шарнирного закрепления обоих концов

$$\Delta^2 w_0 = 0, \Delta^2 w_k = 0; \quad (22)$$

$$w_0 = 0, w_k = 0. \quad (23)$$

Чтобы производные функции изогнутой оси стержня в начальной и конечной точках одного порядка точности при формулировании граничных условий, следует использовать интерполяционный полином Лагранжа:

$$L(x) = \sum_{i=0}^k w_i l_i(x), \quad (24)$$

где

$$l(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^k \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \cdot \frac{x - x_{j+1}}{x_i - x_{j+1}} \cdot \frac{x - x_{j+2}}{x_i - x_{j+2}} \dots \frac{x - x_k}{x_i - x_k}. \quad (25)$$

Тогда конечные разности первого и второго порядка в начальной и конечной точках запишутся в следующем виде:

$$\Delta w_0 = -\frac{137}{60} w_0 + 5w_1 - 5w_2 + \frac{10}{3} w_3 - \frac{5}{4} w_4 + \frac{1}{5} w_5; \quad (26)$$

$$\Delta w_k = \frac{137}{60} w_k - 5w_{k-1} + 5w_{k-2} - \frac{10}{3} w_{k-3} + \frac{5}{4} w_{k-4} - \frac{1}{5} w_{k-5}; \quad (27)$$

$$\Delta^2 w_0 = \frac{1}{12} (45w_0 - 154w_1 + 214w_2 - 156w_3 + 61w_4 - 10w_5); \quad (28)$$

$$\Delta^2 w_k = \frac{1}{12} (45w_k - 154w_{k-1} + 214w_{k-2} - 156w_{k-3} + 61w_{k-4} - 10w_{k-5}). \quad (29)$$

Уравнение (19) может быть решено матричным методом:

$$[w] = \frac{q_{\max} L^4}{k^4 EI} [D]^{-1} [\bar{q}] \quad (30)$$

или

$$[w] = \frac{q_{\max} L^4}{k^4 EI} [W], \quad (31)$$

где

$$[W] = [D]^{-1} [\bar{q}] \quad (32)$$

является функцией-формой безразмерных ординат прогибов стержня, и члены которой численно равны w/L .

Величина поперечной силы на левом конце стержня может быть найдена при помощи следующего выражения:

$$\frac{EI k^3}{L^3} \Delta^3 w_{0,j} = \frac{q_{\max,j} L}{4} \varphi_j, \quad (33)$$

$$\Delta^3 w_{0,j} = \frac{1}{4} (-17W_{0,j} + 71W_{1,j} - 118W_{2,j} + 98W_{3,j} - 41W_{4,j} + 7W_{5,j}), \quad (35)$$

здесь j – наименование стержня (ОС, ВС, СН и СГ).

С учётом выражений (26) – (29) выражение (16) можно переписать в следующем виде:

$$\frac{3(1-\chi_2)(\varepsilon_{CH} + 2\varepsilon_{CG}) - \varepsilon_{OC}(1-\chi_1)}{\varepsilon_{OC}(1-\chi_1)} =$$

$$= \frac{\Delta^3 w_{0,OC} - \omega \cdot (\Delta^3 W_{k,CH} + 2\Delta^3 W_{k,CG})}{\Delta^3 w_{0,OC}} + n^2 \frac{\Delta W_{0,OC} - \omega \cdot (\Delta W_{k,CH} + 2\Delta W_{k,CG})}{k^2 \Delta^3 w_{0,OC}}. \quad (36)$$

Решение уравнения (33) производится в следующем порядке:

1) первоначально решается уравнение (16) относительно параметров χ_1 , задавшись параметрами χ_1 , n и ω ;

2) параметры χ_1 , n и ω подставляются в выражения (1) – (4) и (8);

3) производится решение уравнения (32) с нормализацией вектора полученного решения;

4) производится решение уравнения (36) относительно параметров χ_2 , задавшись параметрами χ_1 и ω , полученные значения будут несколько уточнены от найденных первоначально в уравнении (16);

5) далее повторно производится решение уравнений (32) и (36) согласно п. 2–4 до достижения результата вычисления параметров χ_1 с необходимой точностью.

Функциональная зависимость, описывающая процесс деформирования верхнего стержневого многогранника, может быть получена из уравнения равенства вертикальных проекций продольных и поперечных усилий в стержнях, соединяемых в верхнем узле:

$$R = \frac{\varepsilon_{OC}(1-\chi_1)}{k(\Delta^3 k^2 W_{k,OC} - n^2 \Delta W_{k,OC})_{OC}}, \quad (37)$$

величина R здесь комплексно связывает нагрузку на стержень, его жёсткость на растяжение и сжатие, длину стержня и стрелу подъёма верхнего стержневого многогранника:

$$R = \frac{q_{\max,OC} L}{EA} \left(\frac{L}{\Delta_1} \right)^3. \quad (38)$$

Условие местной устойчивости сетчатого купола может быть сформулировано в виде следующего неравенства:

$$\frac{q_{\max,OC} L}{EA} \left(\frac{L}{\Delta_1} \right)^3 < \frac{\varepsilon_{OC}(1-\chi_1)}{k(\Delta^3 k^2 W_{k,OC} - n^2 \Delta W_{k,OC})}. \quad (39)$$

В представленной работе применён метод экстраполяции производных Рунге-Ромберга для определения такого количества k участков разбиения стержня по длине, при котором величина экстраполированного приращения производной была бы сопоставима с погрешностью её округления. Решение уравнения (32) производилось с числом участков $N = 6, 12, 24, 48$ разбиения стержня по длине. При этом погрешность вычисления производных второго порядка точности уменьшалась в 4, 16 и 64 раз соответственно. Величина погрешности первой численной производной безразмерной функции изогнутой оси по методу Рунге-Ромберга [19] произведена следующим образом:

$$O = \frac{W_{h/2} - W_h}{3}, \quad (40)$$

откуда

$$\varphi_j = \frac{4}{k} \Delta^3 w_{0,j}, \quad (34)$$

где $W_{h/2}$ – численная производная безразмерной функции изогнутой оси, определённая с использованием дробного (уменьшенного вдвое) шага; W_h – то же, с использованием принятого шага.

Оценка погрешности старших численных производных производилась путём последовательного дифференцирования первой производной.

При подстановке величин χ_1 , χ_2 в уравнение (36) при фиксировании переменной n можно построить графические зависимости изменения приращений вертикальной проекции продольной силы в стержнях вблизи узла O , которые в каждом случае будут являться диаграммами равновесных состояний. На рисунке 4 изображены диаграммы равновесных состояний для шестиугольного плане стержневого многогранника, полученные для параметров эквивалентной гибкости $n = 1$ и $n = 40$ и неравномерности осесимметричного нагружения $\omega = 1; 0,75; 0,25; 0$ распределённой нагрузкой.

Максимальное значение величины параметра нагрузки R на графиках 4а, 4б соответствует критическому значению. При превышении этих значений равновесие между вертикальными проекциями внутренних усилий в стержнях стержневых многогранников невозможно в их выпуклом состоянии и достигается только в вогнутом. Условие устойчивости сетчатого купола в случае продавливания его узлов можно сформулировать следующим образом:

$$\frac{q_{\max,OC} L}{EA} \left(\frac{L}{\Delta_1} \right)^3 < R_{кр}, \quad (41)$$

где величина $R_{кр}$ – значение критического безразмерного параметра нагрузки;

$R_{\text{уз}}$ – узловая нагрузка, приложенная к центральному узлу рассматриваемого стержневого многогранника, Н;

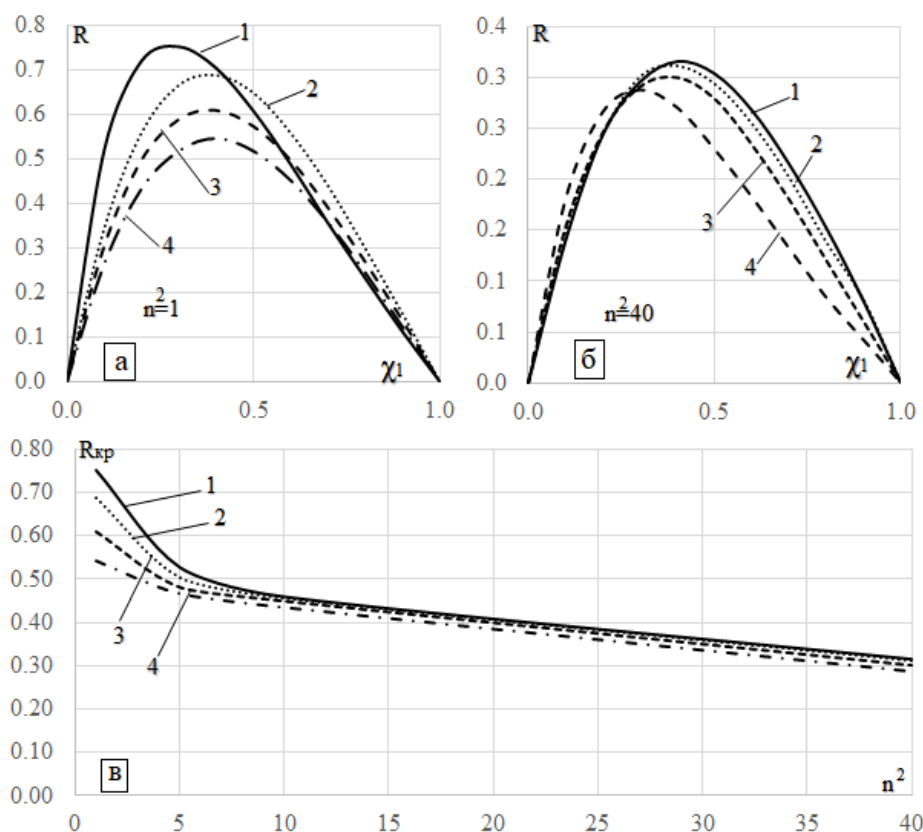
$R_{кр}$ – критическое значение безразмерного параметра нагрузки, определённое из диаграммы 4в.

Задача о местной потере устойчивости сетчатых куполов с действием распределённой внешней нагрузки на стержни рассматривается, по всей видимости, впервые. По этой причине верификация предложенной выше методики проведена с использованием конечно-элементного программного комплекса SAP 2000.

Было произведено сравнение диаграмм равновесных состояний, полученных на основе представленной численно-аналитической методики, и диаграмм деформирования для верхнего стержневого многогранника шарнирно-стержневых двухъярусных сетчатых куполов, сеть которых построена по радиально-кольцевой схеме (рисунок 1). Длины стержней меридионального направления, моменты инерции поперечных сечений в плоскости изгиба, стрелы подъёма стержневого многогранника верхнего яруса подбирались так, чтобы соблюдались квадраты эквивалентных гибкостей были бы равны тем, которые принимались для решения местной устойчивости сетчатых куполов по представленной выше методике: $n^2 = 1, n^2 = 5, n^2 = 10, n^2 = 20, n^2 = 40$, форма верхнего стержневого многогранника в плане – правильный шестиугольник. Опираемые рассматриваемого двухъярусного фрагмента сетчатого

купола принималось шарнирно-неподвижным. Были произведены численные расчёты в программе SAP2000 с учётом геометрической нелинейности, полагая модуль упругости материала стержней постоянным (материал – сталь, $E = 206000$ МПа) и не рассматривая иные формы потери устойчивости. На рисунке 5а показан рассмотренный способ приложения перемещений ко всем узлам, на

рисунке 5(б) – общий вид расчётной модели. Перемещения найдены по описанной выше методике так, чтобы суммы вертикальных проекций внутренних усилий были равны ($\omega = 1$). Такое сравнение результатов, безусловно, является выборочным из произвольного количества вариантов, однако не влияет на общность полученных выводов.



а – диаграммы равновесных состояний стержневого многогранника сетчатого купола при $n^2 = 1$, б – то же при $n^2 = 40$, в – графики изменения параметров критических нагрузок при различных величинах квадрата эквивалентной гибкости;
1 – $\omega = 1$, 2 – $\omega = 0,75$, 3 – $\omega = 0,5$, 4 – $\omega = 0$

Рисунок 4 – Диаграммы равновесных состояний шестиугольного стержневого многогранника

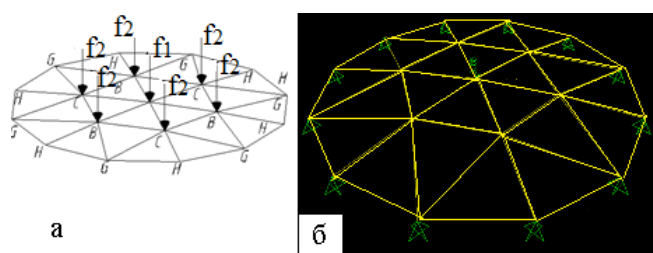


Рисунок 5 – Варианты задания перемещений узлов двухъярусного фрагмента сетчатого купола (а), общий вид расчётной модели (б)

В качестве аргумента при проведении численных расчётов принимались вертикальные перемещения узлов, найденные по изложенным выше зависимостям, их горизонтальные перемещения не ограничивались. Величины вертикальных перемещений узлов второго яруса f_2 , вычисленные по представленной выше методике, и в SAP2000 различаются не более чем на 12 %, что приводит к расхождению безразмерных параметров нагрузок на 5–30 %, причём большей величине расхождений соответствуют меньшие значения ординат, кроме этого наблюдаются разные характеры деформирования стержневых многогранников в отдельных случаях диаграмма равновесных состояний, полученная при использовании численного метода расчёта не имеет критических точек, в отличие от одноимённой диаграммы, полученной

аналитически. Следует также отметить, что величины критических нагрузок, полученные с использованием численного метода расчёта, всегда завышены относительно аналогичных значений, полученных по предложенным выше зависимостям. Также следует отметить, что в конечно-элементных программных комплексах для расчёта конструкций зданий и сооружений отсутствуют критерии, по которым можно судить о наступлении (или ненаступлении) такого вида потери устойчивости.

В работе [5, 10, 11] приведены методики оценки местной устойчивости сетчатых куполов, созданных из стержневых многогранников с шестью стержнями, соединяющимися шарнирно в каждом узле, при действии узловой нагрузки, определённые для случая центрального сжатия в стержнях без учёта влияния продольно-поперечного изгиба. Безразмерные критические параметры узловых нагрузок определяются как $P/EA \cdot (L/\Delta_1)^3$. Преобразовав их во внешнюю равномерно распределённую нагрузку на поверхность

покрытия, поделив на $\frac{3\sqrt{3}}{8} L^2$ – грузовую площадь, приходящуюся на каждый узел сетчатого купола и умножив на $L/2$ – максимальную ширину грузовой площадки на стержень, можно получить значения максимальных параметров безразмерных значений, распределённых по длине стержня нагрузок. При этом величина внешней распределённой по площади покрытия нагрузки остаётся неизменной. В таблице 1 приведены значения безразмерных параметров узловых нагрузок и приведение их к распределённым по длине стержней.

Таблица 1 – Безразмерные параметры узловых нагрузок, приведенных к распределённым по длине стержней

Безразмерный параметр узловой нагрузки $\frac{P}{EA} \left(\frac{L}{\Delta_1} \right)^3$	
$\omega = 1$	1,155
$\omega = 0$	0,577
Безразмерный параметр узловой нагрузки, приведенной к максимальному значению распределённой по длине стержня с $\frac{q_{\max, OC} L}{EA} \left(\frac{L}{\Delta_1} \right)^3 = \frac{P}{EA} \left(\frac{L}{\Delta_1} \right)^3 \cdot \frac{8}{3\sqrt{3}L^2} \cdot \frac{L}{2} \approx 0,769 \frac{P}{EAL} \left(\frac{L}{\Delta_1} \right)^3$	
$\omega = 1$	$0,769 \cdot 1,155 = 0,888$
$\omega = 0$	$0,769 \cdot 0,577 = 0,443$

Используя выше изложенную методику, можно определить параметры максимальных значений нагрузок при величине эквивалентной гибкости $n \rightarrow 0$. Так, при этом $\omega = 1$ соответствует

$$\frac{q_{\max, OC} L}{EA} \left(\frac{L}{\Delta_1} \right)^3 = 0,725, \quad \text{а при } \omega = 1$$

$$\frac{q_{\max, OC} L}{EA} \left(\frac{L}{\Delta_1} \right)^3 = 0,411.$$

Расхождения при этом соответ-
ствуют от 22 % до 8 %.

В работе [21] исследован вопрос о местной устойчивости сетчатых куполов с шарнирным соединением стержней в узлах при действии сосредоточенной узловой нагрузки. Было произведено сравнение результатов расчёта критических нагрузок на примере двухъярусного фрагмента сетчатого купола диаметром 5 м, радиус описанной сферы 12,625 м, материал стержней – сталь, $E = 206000$ МПа, тип поперечного сечения – труба $\phi 60 \times 4$ мм, стержни опорного контура закреплены шарнирно-неподвижно. Величины критических нагрузок для верхнего стержневого многогранника были найдены для коэффициентов неравномерности загрузки $\omega = 1$, $\omega = 0,75$, $\omega = 0,5$, $\omega = 0$ и приведены к распределённой нагрузке на стержень. Найденные величины критических нагрузок, приведенных к распределённым превосходят значения критических нагрузок на стержень по изложенной выше методике на 20–46 % по причине совместного сжатия и изгиба стержней.

Выводы

1. Получены зависимости, позволяющие определить величины проекций внутренних усилий на концах шарнирно-опёртых стержней, нагруженных распределённой нагрузкой по треугольному закону с максимальным значением посередине.

2. Получены зависимости, описывающие процесс деформирования стержневых многогранников, образующих шарнирно-стержневые сетчатые купола, которые позволяют учитывать их геометрически нелинейное деформирование, продольно-поперечный изгиб стержней, изменение углов поворота их концов, что даёт возможность вычислить величины критических значений распределённых нагрузок.

3. Разработана и предложена методика проверки местной устойчивости шарнирно-стержневых сетчатых куполов. Нагрузка на стержни которых передаётся непосредственно, без использования прогонов. Сформулировано условие их местной устойчивости формы.

Список цитированных источников

1. Журавлев, А. А. Пространственные деревянные конструкции / А. А. Журавлев, Г. Б. Вержбовский, Н. Н. Ерёменко. – Ростов н/Д : РГСУ, 2003. – 518 с.
2. Тур, В. И. Влияние податливости узловых соединений на напряженно-деформированное состояние металлического сетчатого купола / В. И. Тур, А. В. Тур // Фундаментальные исследования. Технические науки. – 2014. – № 6. – С. 1165–1168.
3. Abedi, K. Progressive collapse of single-layer braced domes / K. Abedi, G. A. R. Parke // International Journal of Space Structures. – 1991. – № 11 (3). – P. 291–306.

4. Abedi, K. Propagation of local instabilities in braced domes / K. Abedi : doctoral dissertation. – University of Surrey, 1997. – 333 p.
5. Gioncu, V. Buckling of Reticulated Shells: State-of-the-Art / V. Gioncu // International Journal of Space Structures. – 1995. – Vol. 10, Iss. 1. – P. 1–46.
6. Sumirin, N. Snap-Through Buckling Problem of Spherical Shell Structure / Nuroji Sumirin, Besari Sahari // International Journal of Science and Engineering (IJSE). – 2015. – Vol. 8, Iss. 1. – P. 54–59.
7. Zabojszcza, P. Stability analysis of the single-layer dome in probabilistic description by the Monte Carlo method / P. Zabojszcza, U. Radoń // Journal of theoretical and applied mechanics. – 2020. – Vol. 58, Iss. 2. – P. 425–436.
8. Zhuravlev, A. Local stability and natural motions of the multi-face dome rod structure / A. A. Zhuravlev, D. A. Zhuravlev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2020. – Vol. 19, Iss. 2. – P. 32–40.
9. Савельев, В. А. Влияние начальных несовершенств и неравномерности загрузки на устойчивость сферического купола с жёсткими узлами / В. А. Савельев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1971. – № 5. – С. 32–34.
10. Савельев, В. А. Теоретические основы проектирования металлических куполов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / В. А. Савельев. – М., 1995. – 39 с.
11. Klöppel, K. Zur Berechnung von Netzkuppeln / K. Klöppel, R. Schardt // Der Stahlbau. – 1962. – Vol. 5. – S. 129–136.
12. Kato, S. Dynamic Elasto-Plastic Buckling Simulation System for Single Layer Reticular Domes with Semi-Rigid Connections under Multiple Loadings / S. Kato, M. Murata // International Journal of Space Structures. – 1997. – Vol. 12, Iss. 3–4. – P. 161–172.
13. Lopez, A. Numerical model and experimental tests on single-layer latticed domes with semi-rigid joints / A. Lopez, I. Puente, M. A. Serna // Computers and Structures. – 2007. – Vol. 85. – P. 360–374.
14. Журавлев, А. А. К вопросу о местной устойчивости сетчатых куполов с треугольной решеткой / А. А. Журавлев // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1971. – № 5. – С. 77–80.
15. Журавлев, А. А. Устойчивость стержневых систем в форме выпуклых конфигураций на плоскости и в пространстве / А. А. Журавлев // Известия РГАС. – 1996. – № 1. – С. 42–48.
16. Глушко, К. К. Влияние начальных несовершенств формы на местную устойчивость сетчатого купола при действии осесимметричной узловой нагрузки / К. К. Глушко // Актуальные проблемы исследования материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте : сборник статей II Международной научной конференции, Брест, 18–20 октября 2017 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2017. – С. 32–36.
17. Глушко, К. К. Исследование устойчивости формы стержневых многогранников сетчатых куполов / К. К. Глушко // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 29–30 марта 2018 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2018. – С. 24–33.

18. Глушко, К. К. Потеря местной устойчивости формы сетчатых куполов с жёсткими узлами / К. К. Глушко // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 29–30 марта 2018 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2018. – С. 33–42.
19. Калиткин, Н. Н. Об экстраполяции на сгущающихся сетках / Н. Н. Калиткин // Математическое моделирование. – 1994. – № 1(6). – С. 86–98.
20. Драган, В. И. Определение продольных сил в стержнях и критических нагрузок, вызывающих местную потерю устойчивости сетчатого купола / В. И. Драган, К. К. Глушко // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 30–31 марта 2017 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2017. – С. 39–46.
21. Глушко, К. К. Местная устойчивость стальных сетчатых куполов с шарнирным соединением стержней в узлах / К. К. Глушко, К. А. Глушко // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2020. – № 1. – С. 36–42.
10. Savel'ev, V. A. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya metallicheskih kupolov : avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.23.01 / V. A. Savel'ev. – M., 1995. – 39 s.
11. Klöppel, K. Zur Berechnung von Netzkuppeln / K. Klöppel, R. Schardt // Der Stahlbau. – 1962. – Vol. 5. – S. 129–136.
12. Kato, S. Dynamic Elasto-Plastic Buckling Simulation System for Single Layer Reticular Domes with Semi-Rigid Connections under Multiple Loadings / S. Kato, M. Murata // International Journal of Space Structures. – 1997. – Vol. 12, Iss. 3–4. – P. 161–172.
13. Lopez, A. Numerical model and experimental tests on single-layer latticed domes with semi-rigid joints / A. Lopez, I. Puente, M. A. Serna // Computers and Structures. – 2007. – Vol. 85. – P. 360–374.
14. Zhuravlev, A. A. K voprosu o mestnoj ustojchivosti setchatyh kupolov s treugol'noj reshetkoj / A. A. Zhuravlev // Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. – 1971. – № 5. – S. 77–80.
15. Zhuravlev, A. A. Ustojchivost' sterzhnevnyh sistem v forme vypuklykh konfiguracij na ploskosti i v prostranstve / A. A. Zhuravlev // Izvestiya RGAS. – 1996. – № 1. – S. 42–48.
16. Glushko, K. K. Vliyanie nachal'nyh nesovershenstv formy na mestnyuyu ustojchivost' setchatogo kupola pri dejstvii osesimmetrichnoj uzlovoj nagruzki / K. K. Glushko // Aktual'nye problemy issledovaniya materialov, konstrukcij, tekhnologij i organizacii stroitel'stva v transgranichnom aspekte : sbornik statej II Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, Brest, 18–20 oktyabrya 2017 g. / Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: S. M. Semenyuk [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2017. – S. 32–36.
17. Glushko, K. K. Issledovanie ustojchivosti formy sterzhnevnyh mnogogrannikov setchatyh kupolov / K. K. Glushko // Teoriya i praktika issledovanij i proektirovaniya v stroitel'stve s primeneniem sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya (SAPR) : sb. st. II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Brest, 29–30 marta 2018 g. / Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: S. M. Semenyuk [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2018. – S. 24–33.
18. Glushko, K. K. Poterya mestnoj ustojchivosti formy setchatyh kupolov s zhyostkimi uzlami / K. K. Glushko // Teoriya i praktika issledovanij i proektirovaniya v stroitel'stve s primeneniem sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya (SAPR) : sb. st. II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Brest, 29–30 marta 2018 g. / Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: S. M. Semenyuk [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2018. – S. 33–42.
19. Kalitkin, N. N. Ob ekstrapolyacii na sgushchayushchihsya setkah / N. N. Kalitkin // Matematicheskoe modelirovanie. – 1994. – № 1(6). – S. 86–98.
20. Dragan, V. I. Opredelenie prodol'nyh sil v sterzhnyah i kriticheskikh nagruzok, vyzyvayushchih mestnyuyu poteryu ustojchivosti setchatogo kupola / V. I. Dragan, K. K. Glushko // Teoriya i praktika issledovanij i proektirovaniya v stroitel'stve s primeneniem sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya (SAPR) : sb. st. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Brest, 30–31 marta 2017 g. / Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: S. M. Semenyuk [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2017. – S. 39–46.
21. Glushko, K. K. Mestnaya ustojchivost' stal'nyh setchatyh kupolov s sharnirnym soedineniem sterzhnej v uzлах / K. K. Glushko, K. A. Glushko // Vestn. Brest. gos. tekhn. un-ta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2020. – № 1. – S. 36–42.

References

1. Zhuravlev, A. A. Prostranstvennye derevyannye konstrukcii / A. A. Zhuravlev, G. B. Verzhbovskij, N. N. Eryomenko. – Rostov n/D : RGSU, 2003. – 518 s.
2. Tur, V. I. Vliyanie podatlivosti uzlovyh soedinenij na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie metallicheskogo setchatogo kupola / V. I. Tur, A. V. Tur // Fundamental'nye issledovaniya. Tekhnicheskie nauki. – 2014. – № 6. – S. 1165–1168.
3. Abedi, K. Progressive collapse of single-layer braced domes / K. Abedi, G. A. R. Parke // International Journal of Space Structures. – 1991. – № 11 (3). – P. 291–306.
4. Abedi, K. Propagation of local instabilities in braced domes / K. Abedi : doctoral dissertation. – University of Surrey, 1997. – 333 p.
5. Gioncu, V. Buckling of Reticulated Shells: State-of-the-Art / V. Gioncu // International Journal of Space Structures. – 1995. – Vol. 10, Iss. 1. – P. 1–46.
6. Sumirin, N. Snap-Through Buckling Problem of Spherical Shell Structure / Nuroji Sumirin, Besari Sahari // International Journal of Science and Engineering(IJSE). – 2015. – Vol. 8, Iss. 1. – P. 54–59.
7. Zabojszcza, P. Stability analysis of the single-layer dome in probabilistic description by the Monte Carlo method / P. Zabojszcza, U. Radoń // Journal of theoretical and applied mechanics. – 2020. – Vol. 58, Iss. 2. – P. 425–436.
8. Zhuravlev, A. Local stability and natural motions of the multi-face dome rod structure / A. A. Zhuravlev, D. A. Zhuravlev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2020. – Vol. 19, Iss. 2. – P. 32–40.
9. Savel'ev, V. A. Vliyanie nachal'nyh nesovershenstv i neravnomernosti zagruzheniya na ustojchivost' sfericheskogo kupola s zhyostkimi uzlami / V. A. Savel'ev // Stroitel'naya mekhanika i raschyot sooruzhenij. – 1971. – № 5. – S. 32–34.

Материал поступил 27.03.2025, одобрен 13.04.2025,
принят к публикации 14.04.2025

УДК 693.22

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ПРОБНОГО НАГРУЖЕНИЯ

В. Н. Деркач¹, И. Е. Демчук², В. В. Лавренчук³

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

² К. т. н., начальник отдела, филиал «Научно-технический центр» НППРУП «Стройтехнорм», Брест, Беларусь, e-mail: 7263712@mail.ru

³ Инженер-конструктор 2 категории, филиал «Научно-технический центр» НППРУП «Стройтехнорм», Брест, Беларусь, e-mail: lawren4uk.ntc@mail.ru

Реферат

В статье приведен анализ методик испытания железобетонных конструкций методом пробного нагружения. Такие испытания позволяют относительно легко и быстро оценить техническое состояние строительной конструкции или ее отдельного элемента. В Республике Беларусь отсутствуют ТНПА или методические документы, содержащие методику испытаний пробной нагрузкой строительных конструкций в составе зданий и сооружений, включая критерии оценивания полученных результатов. В статье выполнен анализ значений пробных нагрузок и критериев оценки результатов испытаний по разным литературным источникам и нормативным документам. Показано, что оценка надежности железобетонных конструкций при действии эксплуатационной нагрузки производится на основании критериев эксплуатационной пригодности, согласно которым прогиб конструкции, измеряемый после стабилизации прироста деформаций, и ширина раскрытия трещин не должны превышать предельно допустимых значений, установленных нормативными документами. Дополнительными характеристиками являются прирост прогиба за промежутки времени между моментом приложения полной испытательной нагрузки и моментом стабилизации деформаций, а также значение остаточного прогиба конструкции после стабилизации деформаций. Указано на необходимость разработки стандарта, устанавливающего единые требования к методике проведения испытаний строительных конструкций пробным нагружением, а также к критериям оценивания полученных результатов.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, пробное нагружение, критерии оценки, трещины, прогибы, приращение деформаций.

EVALUATION OF THE SAFETY AND SERVICEABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BY THE TEST LOADING METHOD

V. N. Derkach, I. E. Demchuk, V. V. Lavrenchuk

Abstract

The article provides an analysis of the methods for testing reinforced concrete structures using the test loading method. Such tests allow for a relatively easy and quick assessment of the technical state of a building structure or its individual elements. In the Republic of Belarus there are no technical regulations or methodological documents containing the methodology for testing by the test load of building structures as part of buildings and structures, including criteria for evaluating the results obtained. The article analyzes the values of test loads and criteria for evaluating test results based on various literary sources and normative documents. It is shown that the assessment of the reliability of reinforced concrete structures under the action of operational load is carried out on the basis of the criteria of serviceability, according to which the deflection of the structure, measured after stabilization of the increase in deformations, and the width of the crack opening should not exceed the maximum permissible values established by normative documents. Additional characteristics are the increase in deflection over the time interval between the moment of application of the full test load and the moment of deformation stabilization, as well as the value of the residual deflection of the structure after deformation stabilization. It is pointed out that it is necessary to develop a standard that establishes uniform requirements for the methodology of testing building structures by test loading, as well as criteria for evaluating the results obtained.

Keywords: reinforced concrete structures, test loading, evaluation criteria, cracks, deflections, increment of deformations.

Введение

При обследовании строительных конструкций часто возникают ситуации, когда не удается установить фактическую расчетную схему конструкции, или обычными методами обследования не представляется возможным выявить фактическое техническое состояние, параметры дефектов, а проверочные расчеты не дают достаточно надежных результатов. В этом случае нормы [1] рекомендуют прибегать к испытаниям конструкций пробной нагрузкой. Такие испытания позволяют относительно легко и быстро оценить техническое состояние строительной конструкции или ее отдельного элемента. В строящихся зданиях их выполняют, когда возникают сомнения в несущей способности конструкции, например, в связи с нарушениями ТНПА при производстве строительно-монтажных работ или с качеством используемых материалов. При обследовании существующих зданий, в случае отсутствия проектной документации, испытание конструкций пробной нагрузкой позволяют принять обоснованное решение по дальнейшему использованию объекта. Испытания пробной нагрузкой часто применяют для подтверждения безопасности сложных конструктивных систем,

расчеты которых сопряжены с большим количеством неопределенностей. Поэтому они широко используются в мостостроении и геотехнике. В Республике Беларусь действуют стандарт [2], устанавливающий методы испытаний нагружением и правила оценки прочности жесткости и трещиностойкости железобетонных изделий заводского изготовления. При этом ТНПА, содержащие методику испытаний пробной нагрузкой строительных конструкций в составе зданий и сооружений, включая критерии оценивания полученных результатов, отсутствуют.

Пробные нагрузки

Значение испытательной нагрузки зависит от цели испытаний, которая может заключаться в определении несущей способности конструкции или в оценке безопасности и эксплуатационной пригодности конструкции при действии эксплуатационной нагрузки.

В первом случае определяют нагрузку, при которой относительные деформации материала конструкции (бетона и арматурной стали) в наиболее нагруженном сечении достигают своих предельных значений.

При назначении испытательной нагрузки для второго случая существуют разные подходы. Согласно [3] испытательную нагрузку рекомендуется принимать равной нормативному значению. Эта нагрузка по величине прогиба и ширине раскрытия трещин позволяет выполнить прямую проверку предельного состояния эксплуатационной пригодности конструкции. Кроме того, по косвенным показателям, путем сопоставления измеренных деформаций с их теоретическими значениями, возможно судить о предельном состоянии несущей способности конструкции при расчетном значении нагрузки. Если пробную нагрузку требуется довести до расчетного значения, то это можно сделать только по решению специальной экспертизы и с принятием мер техники безопасности (устройство предохранительных лесов, использование дистанционных приборов для измерения деформаций и т. п.). В исключительных случаях конструкцию по условиям испытаний доводят до разрушения.

В соответствии с [1] железобетонные конструкции, испытываемые в условиях эксплуатации без извлечения из здания, подвергают действию пробной статической нагрузки, значение которой принимают равным значению эксплуатационной нагрузки. Под эксплуатационной нагрузкой понимают сумму характеристических значений постоянной и переменной нагрузок. Такие же значения пробной нагрузки приводятся в методических рекомендациях [4].

В нормах Великобритании [5] указано, что значение пробной нагрузки должно приниматься не ниже суммы характеристических значений постоянной G_k и переменной Q_k нагрузок. При этом в качестве испытательной нагрузки рекомендуется принимать большее из значений:

$$G_k + 1,25Q_k \text{ или } 1,125(G_k + Q_k). \quad (1)$$

Нормы США [6] испытание конструкций пробной нагрузкой рекомендуют производить в тех случаях, когда вызывают сомнения прочностные характеристики материалов или поверочные расчеты показывают недостаточную несущую способность конструкции. Значение пробной нагрузки принимают равным большему из следующих значений:

$$1,15G_k + 1,5Q_k + 0,4(R_k \text{ или } S_k); \quad (2)$$

$$1,15G_k + 0,9Q_k + 1,5(R_k \text{ или } S_k); \quad (3)$$

$$1,3G_k, \quad (4)$$

где R_k и S_k , соответственно, характеристические значения нагрузки от дождя или снега на покрытие здания.

При испытании конструкций статической нагрузкой можно применять любые грузы, находящиеся на месте испытаний. При этом главными условиями является точное определение веса грузов, а также то, что они не должны образовывать самостоятельную несущую конструкцию. Таким условиям соответствует нагрузка, создаваемая с помощью калиброванных штучных грузов, воды, кирпича, песка и т. п. (рисунок 1).



а) – емкостями с водой; б) – штучными грузами; в) – мешками с песком

Рисунок 1 – Примеры нагружения перекрытий

Распределение нагрузки на испытуемом объекте должно соответствовать схеме, по которой рассчитывалась конструкция, при этом иногда приходится отступать от этого правила, так как реальная конструкция не всегда отвечает идеальной схеме, принятой в расчете [3]. Нагрузку прилагают ступенями, каждая из которых составляет примерно 10–20 % от планируемой максимальной испытательной нагрузки с выдержкой на каждом этапе не менее

10 минут, пока по приборам не будет зафиксировано прекращение нарастания деформаций. Рекомендуется использовать условие: прирост прогиба за последние 10 минут наблюдения не должен превышать прирост за последние 30 минут. Продолжительность пребывания железобетонной конструкции под нагрузкой, по данным разных норм, должна составлять от 6 до 12 часов. После истечения необходимого срока действия пробной нагрузки на испы-

туемую конструкцию производится ее разгрузка и определяется остаточная деформация. При разгрузке конструкции следует соблюдать те же правила, что и при ее загрузке.

Критерии оценки результатов испытаний

Оценку безопасности и пригодности к нормальной эксплуатации строительных конструкций по результатам их испытаний пробной нагрузкой производят, как правило, на основании критериев эксплуатационной пригодности: деформациям и ширине раскрытия трещин. При испытаниях следует дифференцировать остаточные и упругие деформации, а также учитывать, подвергалась ли конструкция нагружению до испытания или первой является пробная нагрузка. При этом очень ценной характеристикой конструкции является ее остаточная деформация. Если конструкция до испытаний не подвергалась действию эксплуатационной нагрузки, то остаточная деформация может быть зафиксирована полностью; если конструкция была ранее нагружена, то остаточная деформация проявляется не в полной мере, так как часть этой деформации, образовавшейся при первоначальной загрузке, установится не представляется возможным [3]. Согласно [3] в железобетонных балочных конструкциях остаточный прогиб после первого нагружения может быть допущен не более чем до одной трети величины полного прогиба под нагрузкой, т. е.

$$f_{ост} \leq 0,33f_{полн}. \quad (5)$$

В соответствии с нормами Великобритании [5] результат испытания можно считать положительным, если измеренный прогиб под нагрузкой и ширина раскрытия трещин меньше допустимых значений. Если прогиб конструкции при действии пробной нагрузки превысил $l_t/1000$ (где l_t – пролет конструкции), фиксируют значение остаточного прогиба. При этом испытания пробной нагрузкой проводят в два этапа. Значения остаточного прогиба после второго нагружения не должно быть выше остаточного прогиба после первого нагружения и не превышать 0,25 общего прогиба – для железобетонных элементов без преднапряжения и 0,15 общего прогиба – в случае предварительно напряженных элементов.

Нормы [1] считают конструкции выдержавшими испытания пробной нагрузкой, если при эксплуатационной нагрузке после выдержки прогиб конструкции a_0 и ширина раскрытия трещин не превышают предельно допустимых значений и выполняется условие $a_t \leq 0,25a_0$, где a_t – остаточный прогиб конструкции.

В методических рекомендациях [4] критериями приемки конструкции при ее испытании пробной нагрузкой являются:

- отсутствие видимых последствий нагружения, прежде всего – трещин чрезмерной ширины раскрытия;
- выполнение условия

$$a_0 \leq a_{lim}, \quad (6)$$

где a_0 – прогиб при действии пробной нагрузки, измеряемый после стабилизации прироста деформаций;

a_{lim} – допустимый прогиб, установленный по требованиям норм с учетом продолжительности действия испытательной нагрузки (кратковременное нагружение).

В случае повторного нагружения проверяют условие

$$a_0 < 1,1a_{cal}, \quad (7)$$

где a_{cal} – расчетное значение прогиба.

При использовании в качестве критерия отношение a_t/a_0 следует проверять условия:

– для железобетонных изделий без предварительного напряжения $a_t \leq 0,15a_0$, (8a)

– для предварительно напряженных изделий $a_t \leq 0,1a_0$, (8б)

где a_t – прирост прогиба за промежутки времени между измерением (через 10 минут после приложения испытательной нагрузки) и измерением после стабилизации прироста.

В случае, когда при пробном нагружении условия (8a) или (8б) не выполняются, назначается повторное нагружение. При повторном нагружении проверяют условия:

– для железобетонных изделий без предварительного напряжения $a_t \leq 0,05a_0$, (9a)

– для предварительно напряженных изделий $a_t \leq 0,03a_0$. (9б)

В работе [7] при невыполнении условий (8a) или (8б) рекомендуется дополнительно проверить условие, $a_t - a_{ост} < 0,15a_0$, ($a_{ост}$ – остаточный прогиб конструкции после ее разгрузки и стабилизации деформаций). При выполнении данного условия конструкция признается пригодной к эксплуатации и повторного ее нагружения не требуется.

Результаты и обсуждение

Анализ существующих методик испытаний строительных конструкций в составе зданий пробным нагружением показывает, что оценка безопасности и пригодности к нормальной эксплуатации конструкций при действии эксплуатационной нагрузки производится на основании критериев эксплуатационной пригодности, согласно которым прогиб конструкции, измеряемый после стабилизации прироста деформаций a_0 , и ширина раскрытия трещин не должны превышать предельно допустимых значений установленных ТНПА. Важными характеристиками при оценке безопасности и эксплуатационной пригодности конструкций являются прирост прогиба за промежутки времени между моментом приложения полной испытательной нагрузки и моментом стабилизации деформаций a_t , а также значение остаточного прогиба конструкции $a_{ост}$ после стабилизации деформаций (рисунок 2).

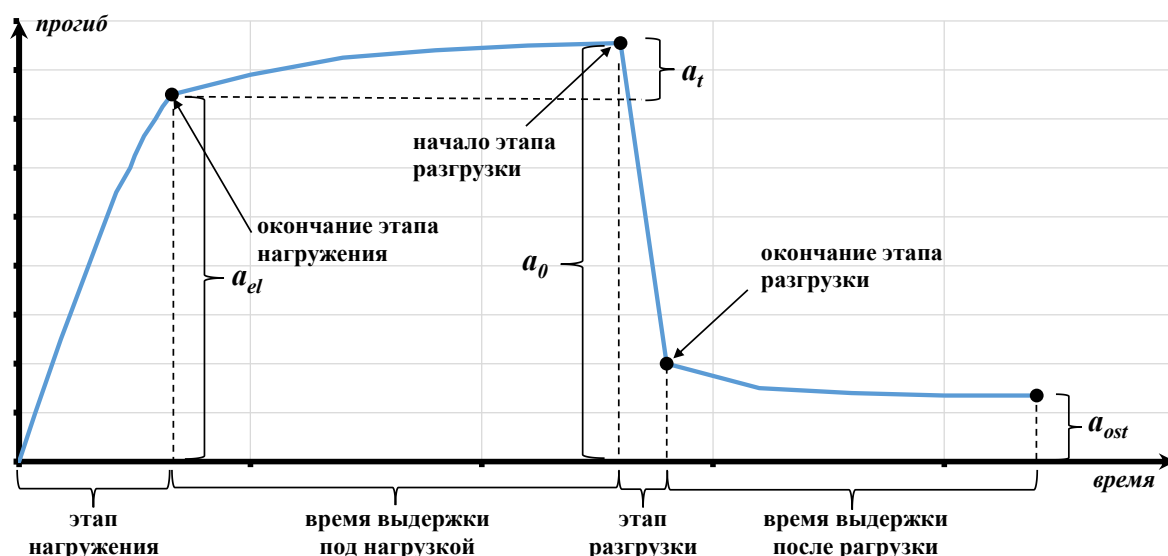


Рисунок 2 – График изменения прогиба конструкции во времени

Если испытания конструкции показывают, что приращение деформаций при выдержке конструкции под нагрузкой прекратилось и не превышает установленного уровня, а полная деформация не превосходит допустимого ТНПА значения, то конструкцию следует признать пригодной для эксплуатации.

Для практического применения рекомендуется приемку железобетонных конструкций по результатам пробного нагружения осуществлять по следующим критериям:

- в качестве испытательной пробной нагрузки принимается суммарное значение характеристической постоянной и переменной эксплуатационных нагрузок;

- при максимальном значении нагрузки ширина раскрытия трещин не должна превышать допустимого ТНПА значения и выполняется условие $a_0 \leq a_{lim}$ (a_{lim} – предельно допустимый прогиб согласно ТНПА);

- при выдержке конструкции под нагрузкой соблюдаются условия:

- для железобетонных конструкций без предварительного напряжения:

$$a_t = a_0 - a_{el} \leq 0,15a_0,$$

- для предварительно напряженных конструкций:

$$a_t = a_0 - a_{el} \leq 0,1a_0.$$

Если при испытании конструкций установлено, что $a_0 > a_{lim}$ или ширина раскрытия трещин превысила допустимое значение, конструкцию признают непригодной к эксплуатации.

В случае превышения a_t значений $0,15a_0$ для конструкций без преднапряжения и $0,1a_0$ для преднапряженных конструкций проверяется дополнительное условие $a_t - a_{ost} < 0,15a_0$. При соблюдении данного условия конструкция считается пригодной к эксплуатации. В противном случае проводится повторное нагружение и проверяется соблюдение условий 9а или 9б.

Приведенные критерии можно использовать при оценке безопасности и эксплуатационной пригодности железобетонных конструкций, предельное состояние несущей способности которых определяется сопротивлением изгибу. При других условиях испытания пробной нагрузкой следует выполнять по методике, разработанной для конкретного случая испытаний при контроле относительных деформаций бетона и арматуры в наиболее нагруженном сечении элемента.

Проведению испытаний пробным нагружением должен предшествовать тщательный анализ проектной документации и обследование железобетонной конструкции, в результате которого определяют прочностные характеристики бетона и арматуры, геометрические характеристики сечений, условия опирания конструкции и выполняют ее поверочный расчет. Общие указания по обследованию строительных конструкций приведены в нормативных документах и методических рекомендациях [1, 8–11], а также в работах [12–20].

Заключение

Испытания строительных конструкций и их элементов пробным нагружением являются одним из самых наукоемких и сложных видов инженерных изысканий. Пробное нагружение в ряде случаев позволяет получить более достоверные данные о безопасности и эксплуатационной пригодности строительных конструкций при действии эксплуатационных нагрузок по сравнению с анализом, основанным на результатах обследования конструкций и их поверочных расчетах. Такие испытания целесообразно применять при оценке работоспособности конструкций как исторических зданий, объектов культурного наследия, на которые обычно отсутствует техническая документация и информация о свойствах материалов, так и конструкций существующих и строящихся зданий в случаях изменения условий их эксплуатации или в ситуациях, вызывающих сомнения в соблюдении требований ТНПА при проектировании и возведении конструкций. С целью регулирования процедуры проведения испытаний строительных конструкций пробной нагрузкой следует разработать стандарт, устанавливающий единые требования к организации и технологии проведения данных испытаний, а также к критериям оценивания полученных результатов.

Список цитированных источников

1. Общие положения по обследованию строительных конструкций зданий и сооружений : СП 1.04.02-2022. – Введ. 2.03.2022. – Минск : МАиС, 2022. – 73 с.
2. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости : ГОСТ 8829-94. – Введ. 11.01.1998. – Минск : МАиС, 1997. – 26 с.
3. Аистов, Н. Н. Испытания сооружений / Н. Н. Аистов. – Л. : Госстройиздат, 1960. – 315 с.
4. Рекомендации по оценке прочности, жесткости и трещиностойкости сборных бетонных и железобетонных изделий, периодичности их испытаний нагружением и применению методов неразрушающего контроля : Р 1.03.042.07. – Брест : БрГТУ, 2010. – 48 с.
5. Structural use of concrete : BS 8110-2:1985. – Part 2: Code of practice for special circumstances, 1985. – 61 p.
6. Building Code Requirements for Structural Concrete : ACI 318-11. – 2011. – 503 p.
7. Lewicki, B. Obciążenia próbne konstrukcji istniejących budynków / B. Lewicki. – Warszawa : ITB, 1997. – 260 s.
8. Техническое состояние и техническое обслуживание зданий и сооружений : СН 1.04.01-2020. – Введ. 27.10.2020. – Минск : МАиС, 2020. – 101 с.
9. Основы проектирования конструкций. Оценка существующих конструкций : СТБ ISO 13822-2017. – Введ. 11.04.2017. – Минск : Госстандарт, 2017. – 40 с.
10. Рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений. – М. : НИИСК Госстроя СССР, 1989. – 104 с.
11. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий. – М. : АО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ», 2004. – 275 с.
12. Лазовский, Д. Н. Проектирование реконструкции зданий и сооружений: учеб.- метод. комплекс: в 3 ч. / Д. Н. Лазовский. – Новополоцк : ПГУ, 2010. – Ч. 2. Оценка состояния и усиление строительных конструкций. – 340 с.
13. Добромислов, А. Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам : справочное пособие / А. Н. Добромислов. – М. : АСВ, 2008. – 72 с.
14. Многоуровневая система оценки надежности железобетонных конструкций эксплуатируемых и реконструируемых зданий и сооружений / В. В. Тур, Т. М. Пецольд, В. В. Малева, Д. М. Марковский // Строительная наука и техника. – № 4. – 2007. – С. 4–19.
15. Гроздов, В. Т. Техническое обследование строительных конструкций, зданий и сооружений / В. Т. Гроздов. – СПб. : Общерос. общ. фонд «Центр качества стр-ва», 1998. – 142 с.
16. Гроздов, В. Т. О некоторых ошибках проектирования железобетонных и каменных конструкций и технического обследования зданий и сооружений / В. Т. Гроздов. – СПб. : Общерос. общ. фонд «Центр качества стр-ва», 2006. – 48 с.
17. Критерии для оценки категории технического состояния железобетонных колонн, ригелей, балок и ферм / В. С. Федоров, Н. Н. Трекин, Э. Н. Кодыш, И. А. Терехов // Безопасность зданий и сооружений. – № 3. – 2023. – С. 58–68.
18. Методика определения эксплуатационной безопасности зданий и их конструкций / Н. Н. Трекин, Э. Н. Кодыш, И. А. Терехов [и др.] // Academia. Архитектура и строительство. – 2022. – № 4. – С. 152–159.
19. Прядко, Н. В. Обследование и реконструкция жилых зданий / Н. В. Прядко // Макеевка : ДонНАСА, 2006. – 156 с.
20. Diagnostyka konstrukcji żelbetowych / W. Starosolski, L. Drobic, R. Jasitiski [i.t.d.] // XI Konferencja Naukowo-Techniczna. Problemy rzeczoznawstwa budowlanego, Warszawa Miedzeszyn, 14–16 kwietnia 2010. – Warszawa, 2010. – 16 s.

References

1. Obschie polozheniya po obsledovaniyu stroitel'nykh konstrukcij zdaniy i sooruzhenij : SP 1.04.02-2022. – Vved. 2.03.2022. – Minsk : MAIS, 2022. – 73 s.

2. Izdeliya stroitel'nye zhelezobetonnye i betonnye zavodskogo izgotovleniya. Metody ispytaniy nagruzheniem. Pravila ocenki prochnosti, zhestkosti i treshchinostojkosti : GOST 8829-94. – Vved. 11.01.1998. – Minsk : MAiS, 1997. – 26 s.
3. Aistov, N. N. Ispytaniya sooruzhenij / N. N. Aistov. – L. : Gosstrojizdat, 1960. – 315 s.
4. Rekomendacii po ocenke prochnosti, zhestkosti i treshchinostojkosti sbornyh betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij, periodichnosti ih ispytaniy nagruzheniem i primeneniyu metodov nerazrushayushchego kontrolya : R 1.03.042.07. – Brest : BrGTU, 2010. – 48 s.
5. Structural use of concrete : BS 8110-2:1985. – Part 2: Code of practice for special circumstances, 1985. – 61 p.
6. Building Code Requirements for Structural Concrete : ACI 318-11. – 2011. – 503 p.
7. Lewicki, B. Obciążenia próbne konstrukcji istniejących budynków / B. Lewicki. – Warszawa : ITB, 1997. – 260 s.
8. Tekhnicheskoe sostoyanie i tekhnicheskoe obsluzhivanie zdaniy i sooruzhenij : SN 1.04.01-2020. – Vved. 27.10.2020. – Minsk : MAiS, 2020. – 101 s.
9. Osnovy proektirovaniya konstrukcij. Ocenka sushchestvuyushchih konstrukcij : STB ISO 13822- 2017. – Vved. 11.04.2017. – Minsk : Gosstandart, 2017. – 40 s.
10. Rekomendacii po ocenke sostoyaniya i usileniyu stroitel'nyh konstrukcij promyshlennyh zdaniy i sooruzhenij. – M. : NIISK Gosstroya SSSR, 1989. – 104 s.
11. Posobie po obsledovaniyu stroitel'nyh konstrukcij zdaniy. – M. : AO «CNIIPROMZDANIJ», 2004. – 275 s.
12. Lazovskij, D. N. Proektirovanie rekonstrukcii zdaniy i sooruzhenij: ucheb.- metod. kompleks: v 3 ch. / D. N. Lazovskij. – Novopolock : PGU, 2010. – CH. 2. Ocenka sostoyaniya i usilenie stroitel'nyh konstrukcij. – 340 s.
13. Dobromyslov, A. N. Ocenka nadezhnosti zdaniy i sooruzhenij po vneshnim priznakam : spravochnoe posobie / A. N. Dobromyslov. – M. : ASV, 2008. – 72 s.
14. Mnogourovnevaya sistema ocenki nadezhnosti zhelezobetonnyh konstrukcij ekspluatiruemyh i rekonstruirovannyh zdaniy i sooruzhenij / V. V. Tur, T. M. Peco'd, V. V. Malyha, D. M. Markovskij // Stroitel'naya nauka i tekhnika. – № 4. – 2007. – S. 4–19.
15. Grozdov, V. T. Tekhnicheskoe obsledovanie stroitel'nyh konstrukcij, zdaniy i sooruzhenij / V. T. Grozdov. – SPb. : Obshcheros. obshch. fond «Centr kachestva str-va», 1998. – 142 s.
16. Grozdov, V. T. O nekotoryh oshibkah proektirovaniya zhelezobetonnyh i kamennyh konstrukcij i tekhnicheskogo obsledovaniya zdaniy i sooruzhenij / V. T. Grozdov. – SPb. : Obshcheros. obshch. fond «Centr kachestva str-va», 2006. – 48 s.
17. Kriterii dlya ocenki kategorii tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnyh kolonn, rigelej, balok i ferm / V. S. Fedorov, N. N. Trekin, E. N. Kodysh, I. A. Terekhov // Bezopasnost' zdaniy i sooruzhenij. – № 3. – 2023. – S. 58–68.
18. Metodika opredeleniya ekspluatacionnoj bezopasnosti zdaniy i ih konstrukcij / N. N. Trekin, E. N. Kodysh, I. A. Terekhov [i dr.] // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. – 2022. – № 4. – S. 152–159.
19. Pryadko, N. V. Obsledovanie i rekonstrukciya zhilyh zdaniy / N. V. Pryadko // Makeevka : DonNASA, 2006. – 156 s.
20. Diagnostyka konstrukcji zelbetowych / W. Starosolski, L. Drobiec, R. Jasitiski [itd.] // XI Konferencja Naukowo-Techniczna. Problemy rzeczoznawstwa budowlanego, Warszawa Miedzeszyn, 14–16 kwietnia 2010. – Warszawa, 2010. – 16 s.

Материал поступил 25.02.2025, одобрен 12.03.2025, принят к публикации 14.03.2025

УДК 666.97.035.5:69.05

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ТЕРМОСНОГО ВЫДЕРЖИВАНИЯ БЕТОННОГО МАССИВА**Ж. Л. Зеленковская¹, С. Н. Ковшар²**¹ Старший преподаватель кафедры «Технология строительства и строительные материалы», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: zelenkovskaya@bntu.by² К. т. н., доцент, доцент кафедры «Технология строительства и строительные материалы», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: kovsharsn@bntu.by**Реферат**

Высокое качество бетонных изделий, конструкций и сооружений является результатом комплекса мероприятий: правильного выбора материалов, рационального подбора состава бетонной смеси, надлежащей организации и пооперационного контроля бетонных работ, использования обоснованных технологических приёмов приготовления, транспортирования, укладки бетонной смеси и режимов твердения бетона.

Рациональный подбор состава и оптимальные условия твердения бетона определяют не только его высокую прочность, водонепроницаемость, морозостойкость, коррозионную стойкость, но и, что особенно важно, себестоимость конструкции. Потребность в снижении расходов и экономии энергоресурсов при возведении бетонных и железобетонных конструкций привела к необходимости решения проблемы расчета параметров бетона, твердеющего в переменном температурном режиме, которая остается достаточно актуальной, несмотря на наработанный к настоящему времени существенный научный и практический опыт. Для решения данной проблемы нами ведется разработка новых аналитических зависимостей, связывающих температуру и время твердения с формированием структурно-механических характеристик бетона.

Моделирование процессов твердения бетона с помощью ЭВМ – развивающееся перспективное направление в технологии бетона и производстве строительных работ. Это направление имеет особую значимость при расчете режимов твердения бетона как для массивных сооружений различного назначения, так и для бетонирования конструкций сложных архитектурных форм, трудно поддающихся традиционным аналитическим методам расчета режима твердения бетона.

Использование представленного в статье программного обеспечения позволит проектировать состав бетона и выбирать режим его твердения, который обеспечит достижение требуемых структурных и физико-механических характеристик. Это избавит инженера-технолога от необходимости проводить большой объем работы для экспериментальной проверки подобранных составов бетона и режимов его твердения.

Авторами ведется дальнейшая апробация математической модели, взаимно увязывающей технологическую (кинетика изменения характеристик бетона) и теплотехническую (текущая температура окружающей среды и способы подвода тепла) стороны процесса твердения бетона.

Ключевые слова: бетон, состав бетона, термосное выдерживание, влияющие факторы, совершенствование метода, режим твердения, математическая модель, программное обеспечение.

SIMULATION OF CONCRETE MASS THERMAL HOLDING MODE**Zh. L. Zelenkovskaya, S. N. Kovshar****Abstract**

High quality of concrete products, structures and buildings is the result of a set of measures: correct choice of materials, rational selection of concrete mix composition, proper organization and step-by-step control of concrete works, use of reasonable technological methods of preparation, transportation, laying of concrete mix and concrete hardening modes. Rational selection of composition and optimal conditions of concrete hardening determine not only its high strength, water resistance, frost resistance, corrosion resistance, but also, what is especially important, the cost of the structure. The need to reduce costs and save energy resources when erecting concrete and reinforced concrete structures has led to the need to solve the problem of calculating the parameters of concrete hardening in a variable temperature regime, which remains quite relevant, despite the significant scientific and practical experience accumulated to date. To solve this problem, we are developing new analytical dependencies linking the temperature and time of hardening with the formation of structural and mechanical characteristics of concrete.

Computer-aided modeling of concrete hardening processes is a developing promising area in concrete technology and construction work. This area is of particular importance in calculating concrete hardening modes for both massive structures of various purposes and for concreting structures of complex architectural forms that are difficult to calculate using traditional analytical methods of calculating concrete hardening mode. Using the software presented in the article will allow designing the concrete composition and selecting its hardening mode, which will ensure the achievement of the required structural and physical-mechanical characteristics. This will relieve the process engineer from the need to carry out a large amount of work for experimental verification of the selected concrete compositions and its hardening modes. The authors are conducting further testing of the mathematical model, which mutually links the technological (kinetics of changes in concrete characteristics) and heat engineering (current ambient temperature and methods of heat supply) aspects of the concrete hardening process.

Keywords: concrete, concrete composition, thermal exposure, influencing factors, method improvement, hardening mode, mathematical model, software.

Введение

Ранее нами было разработано программное обеспечение для расчёта параметров предварительного электроразогрева бетонной смеси и соответствующего метода подбора состава бетона [1]. В процессе расчетов, задавая значения объема разогреваемой бетонной смеси, начальную и конечную температуры, а также время разогрева, конструктивные особенности бункера, напряжение в сети, производительность установки получают информацию о конструктивных особенностях бункера для разогрева смеси. Выбор наиболее подходящего

трансформатора, а также сечение подводящих кабелей оператор производит по расчетной мощности трансформатора и силе тока.

Кроме того, в данном приложении нами представлена опция, предназначенная для расчета модуля поверхности колонны и балок прямоугольного и квадратного сечений, куба, отдельно стоящего и прилегающего к массиву параллелепипеда, плит и стен, а также цилиндра. Значения температуры наружного воздуха, скорости ветра и времени транспортирования бетонной смеси, а также модуля поверхности бетонируемой конструкции позволяют оптимизировать

параметры последующего твердения бетона, а справочная система приложения предоставляет инженеру-технологу информацию об оптимальных параметрах электронагрева, характеристиках комплексов трансформаторных подстанций и трансформаторов.

Дальнейшие разработки ведутся в области моделирования режима выдерживания бетонного массива. Основные сложности, на наш взгляд, заключаются в имеющем место разрыве теплотехнической и бетоноведческой стороны проблемы, т. е. в теплотехнике рассматриваются вопросы переноса тепла в бетонном массиве, а в бетоноведении упор делается на прочностные и структурные характеристики бетона. Поэтому особое внимание уделяется решению следующих задач.

Система расчета должна в каждый момент времени взаимно связывать внешние погодные условия с температурой массива, а также с особенностями конструкции, техническими характеристиками теплоизоляции опалубки и составом бетона. Математическая модель и созданная на ее основе компьютерная программа должны быть реализованы так, чтобы в режиме реального времени, варьируя составом бетона или конструкцией опалубки, возможно было бы получать проектные характеристики бетона в заданные сроки твердения с минимальными ресурсными и энергетическими затратами.

Правильное назначение режима твердения может быть реализовано только с учетом многочисленного количества влияющих факторов (например, состав бетона, вид конструкции, температура наружного воздуха, начальная температура бетонной смеси, вид опалубки и т. д.), что ставит инженера-технолога перед необходимостью проводить большой объем работы по назначению на основе экспериментальных данных, таблиц и графиков (весьма условно) времени выдерживания и остывания бетона в опалубке, начальной температуры, температуры разогрева [2–8]. Именно поэтому целесообразно оптимальный режим твердения в каждом конкретном случае проектировать, а не получать в результате экспериментальной переборки вариантов. Осуществить это невозможно без соответствующих алгоритмов расчета.

Для достижения бетонным массивом прочности, требуемой проектом, самым простым и экономичным является метод термоса, основанный на принципе использования тепла, введенного в бетон путем прогрева материалов или бетонной смеси, до укладки её в опалубку или экзотермического тепла, выделяемого цементом в процессе его гидратации [9]. Поэтому термосное выдерживание рекомендуется применять в первую очередь при возведении монолитных конструкций. Возможность и целесообразность применения метода термоса устанавливается теплотехническим расчетом и технико-

экономическим обоснованием. Сочетание метода термоса с другими способами интенсификации твердения бетона позволяет расширить границы его применения для производства строительных работ при возведении монолитных конструкций. Следует учесть, что при всём многообразии методов тепловой обработки выбор каждого из них в отдельности или рациональное сочетание их с методом термоса в каждом конкретном случае должны осуществляться строителями и технологами совместно с строительной лабораторией, для чего необходимы актуальные и практичные математические системы расчётов, а так же соответствующие программные приложения.

Разработка элементов прогнозирования структурно-механических характеристик цементного камня и бетона при переменном температурном воздействии

При выполнении работ методом термоса, задача технолога – создать благоприятные условия твердения бетона, используя теплоту в его объеме, и поддерживать за этот счет положительную температуру бетона в течение времени выдерживания. Общий запас тепла в бетоне должен соответствовать его потерям при остывании конструкции (при соответствующем утеплении) до набора бетоном заданной прочности. Продолжительность выдерживания определяется временем, достаточным для достижения бетоном критической прочности.

В принципе, если известна температура самого бетонного массива, параметры теплоизоляции и прогноз погоды на предстоящий период, то теплотехнические расчеты изменения температуры массива можно осуществить по общеизвестным зависимостям [9, 10], как показано на рисунке 1.

Как известно, температура твердения бетона влияет на его прочность. Однако практически все предложенные для инженеров-технологов аналитические зависимости имеют один общий недостаток – они привязаны к проектному сроку твердения бетона, а именно 28 суткам. Температурно-влажностные условия и время твердения учитываются весьма усредненно. А как учесть влияние разнообразных химических добавок (пластифицирующих, воздухововлекающих, ускорителей твердения, противоморозных), без которых создание бетона, обеспечивающего проектную долговечность бетонных конструкций, весьма затруднительно? К сожалению, зависимости, учитывающие все влияющие факторы, либо отсутствуют, либо пока не доведены до практической реализации.

Следует отметить, что бетонный массив не инертен. В силу продолжающихся процессов гидратации его свойства непрерывно изменяются. Изменяется структура материала, физико-механические характеристики, тепловыделение цемента.

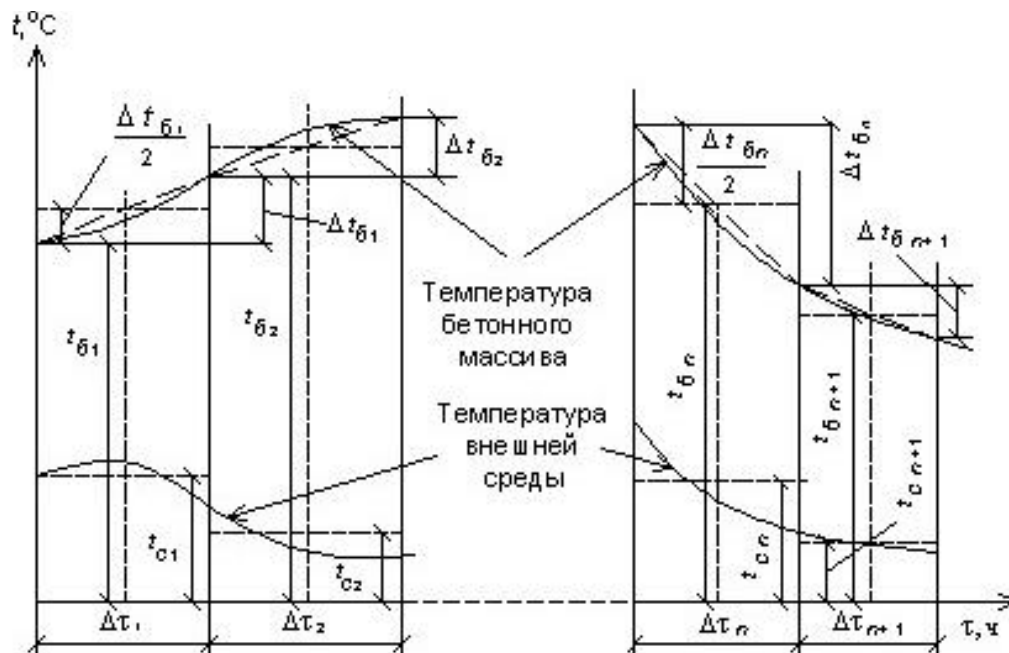


Рисунок 1 — Процессы изменения температуры бетонного массива $t_{бi}$ и внешней среды t_{ci} во времени τ

Тепловыделение является одной из важнейших характеристик, поскольку позволяет прогнозировать весь процесс твердения бетона. Обычно при его расчетах прибегают к использованию традиционных графиков или таблиц, увязывающих удельное тепловыделение с маркой и видом цемента, температурой и временем твердения бетона. На основании анализа и обработки данных, представленных в таблицах и графиках, авторами получены и обобщенные аналитические зависимости [11].

На практике же использование таблиц не позволяет учесть все многообразие возникающих ситуаций. Существенно облегчается расчет, если предположить, что тепловыделение цемента определяется степенью гидратации цемента. То есть каждый процент прогидратированного цемента определенного минералогического состава дает соответствующее количество выделенного тепла. В этом случае нет необходимости прибегать к существующим таблицам, в которых удельное тепловыделение находится в зависимости от активности и вида цемента. Достаточно применить соответствующие формулы и зависимости (1–4), где в процессе твердения учитываются и взаимно увязываются многочисленные влияющие внутренние и внешние факторы [14].

На основании вышеизложенного, а также учитывая предложенную ранее математическую модель для описания процесса гидратации цемента [12], как функцию внутренних (минералогический состав и марка цемента, водоцементное отношение, вид и количество химических добавок) и внешних (температура, время) факторов, используем предположение, что величина степени гидратации вяжущего определяет удельное тепловыделение цемента. Со степенью гидратации цемента увязывается также и текущая прочность бетона твердеющего массива. Таким образом, обеспечивается бетоноведческая часть общего процесса твердения – расчет общего количества тепла, выделяемого бетонным массивом в единицу времени.

$$q_u = (0,01668 \cdot C_3 S + 0,00251 \cdot C_2 S + 0,02808 \cdot C_3 A + 0,00238 \cdot C_4 AF) \cdot \alpha_\tau, \text{ кДж/кг.} \quad (1)$$

В результате получено аналитическое выражение (2) [15] для количественной оценки интенсивности гидратационных процессов цемента, где относительная степень гидратации цемента (α_τ в долях от значения в возрасте 28 суток) определяется временем (τ) и температурой (коэффициент k_t) твердения цементного камня (бетона),

$$\alpha_\tau = \frac{1 - \frac{C_3 S}{100} \cdot \exp(-\beta_1 \cdot \tau \cdot k_{\text{общ}}) - \left(1 - \frac{C_3 S}{100}\right) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \tau \cdot k_{\text{общ}})}{1 - \frac{C_3 S}{100} \cdot \exp(-\beta_1 \cdot 28 \cdot k_{\text{общ}}) - \left(1 - \frac{C_3 S}{100}\right) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot 28 \cdot k_{\text{общ}})}, \text{ д. ед.} \quad (2)$$

При этом удалось расширить число влияющих факторов, включив коэффициент, зависящий от вида и дозировки противоморозных добавок ($k_{\text{пм}}$). Таким образом, общая оценка влияющих факторов ($k_{\text{общ}}$) может быть представлена в виде произведений указанных коэффициентов:

$$k_{\text{общ}} = k_t \cdot k_m \cdot k_s \cdot k_{\text{so}_3} \cdot k_w \cdot k_{dp} \cdot k_{du} \cdot k_{\text{пм}}. \quad (3)$$

Все коэффициенты находятся в функциональной связи с соответствующими факторами и рассчитываются по достаточно сложным зависимостям. Универсальность выражения (2) заключается в том, что оно позволяет включать в себя дополнительные влияющие факторы.

Статистическая проверка предложенной модели расчета степени гидратации цемента показала, что коэффициент вариации отклонений рассчитываемых величин степени гидратации цемента от фактических, полученных различными исследователями, не превышает 12 % [8], что подтверждает практическую приемлемость данной системы расчетов и не требует дополнительных исследований.

Прочность бетона на любой стадии твердения (f_6) может быть рассчитана в зависимости от свойств используемого заполнителя (k_s), активности цемента (f_u), водоцементного отношения бетонной смеси (В/Ц) и соотношения текущего значения степени гидратации (α_τ) и степени гидратации цемента, твердеющего 28 суток в нормальновлажных условиях ($\alpha_{\text{нв}}$) (4) [14]:

Включение в модель и теплотехнических характеристик (конструктивные особенности опалубки, температура наружного воздуха) позволяет рассчитывать эмиссию тепла. Разность же величин поступившего и ушедшего тепла определяет температуру бетона. В свою очередь, температура бетона изменяет процесс гидратации цемента и тепловыделения и т. д. Таким образом, если непрерывно отслеживать процессы твердения, то по нашему мнению это позволит повысить точность вычислений. Важным представляется и то, что в данном случае можно учитывать и текущую температуру окружающего воздуха, а не некое ее усредненное значение на предстоящий период времени.

Нами ведётся работа над усовершенствованием математической модели, отражающей кинетику изменения прочности бетона. На основе предыдущих предположений о том, что при прочих равных условиях прочность бетона на любой стадии твердения является функцией степени гидратации цемента (или, что в принципе одно и то же, – количества химически связанной цементной воды) и, следовательно, если знать степень гидратации цемента, можно рассчитать как прочность бетона, так и иные параметры – например, его морозостойкость, водонепроницаемость, коррозионную стойкость [14].

Руководствуясь предположением о том, что количество выделенного при твердении бетона тепла прямо пропорционально степени гидратации вяжущего, можно прогнозировать величину тепловыделения бетонного массива. Основанием для такого предположения послужил анализ известных формул расчета относительной прочности бетона [13–20]. Анализ и статистическая обработка этих данных дала возможность получить зависимость, связывающую удельное тепловыделение цемента (q_u в кДж/кг) с величиной текущей степени его гидратации (α_τ в %) на конкретном этапе твердения цементного камня (1) [14]:

видом (коэффициент β_1), активностью (k_m), тонкостью помола (k_s) и минералогическим составом цемента (содержание C_3A – учитывается коэффициентом β_2 , гипса – k_{so_3}), начальным плодосодержанием цементного теста (k_w), видом и количеством пластифицирующих добавок (k_{dp}), добавок ускорителей твердения (k_{du}):

$$f_6 = \frac{0,3 \cdot k_s \cdot f_u}{В/Ц - 0,1} \cdot \left(\frac{\alpha_\tau}{\alpha_{\text{нв}}}\right)^{1,7}, \text{ МПа.} \quad (4)$$

Данная зависимость – основа для количественной оценки прочности бетона как функции степени гидратации цемента.

Тогда расчеты параметров твердеющего бетонного массива можно производить в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2 [2].

С учетом удельного тепловыделения цемента, степени его гидратации и содержания в бетонном массиве рассчитывают общее количество выделяемого тепла. Количество же тепла, потерянного бетонным массивом, определяется конструктивными особенностями опалубки, габаритами конструкции, текущей температурой окружающего воздуха, скоростью ветра и характером контакта бетонируемой конструкции с окружающей средой. Разность тепла, выделенного в результате гидратационных процессов (а также привнесенного извне в случае применения внешнего нагревателя) и тепла, ушедшего в окружающее пространство и на нагрев арматуры, опалубки, компонентов бетона, определяет текущую температуру твердеющего бетонного массива. В свою очередь, новое значение температуры (большее или меньшее предыдущей) вызывает и соответствующее изменение скорости гидратации, тепловыделения и т. д. Таким образом, разбив весь времен-

ной процесс твердения на достаточно малые равные отрезки, можно постоянно отслеживать изменение температуры бетонного массива и прочности бетона, отражая кинетику твердения в виде графиков. В этом случае достигается достаточная точность вычислений, поскольку устраняется усреднение внешней температуры за определенный период времени – ее изменение непрерывно учитывается. В модель легко вводится долгосрочный прогноз погоды.

Мы пришли к многофакторной математической модели, позволяющей при переменных температурных условиях, в зависи-

мости от интенсивности тепловыделения бетонного массива, рассчитывать конструкционные и теплотехнические параметры опалубки и режима выдерживания, а также параллельно корректировать состав бетона для получения массива с требуемыми характеристиками.

На практике использование программной реализации данной модели не потребует большого опыта технолога и исключит ошибки, которые могут возникнуть из-за громоздких вычислений, постоянного обращения к справочным материалам, таблицам и графикам.



Рисунок 2 — Схема расчётов температуры бетонного массива и прочности бетона

Реализация математической модели в программном обеспечении

Компьютерная программа, реализованная на последних версиях языка программирования C#, параллельно решает задачу оптимизации состава бетона и конструкции опалубки, учитывая свойства компонентов бетонной смеси и прогноз погоды на период твердения бетонного массива. Ввод цифровой и текстовой информации посредством ручного набора на клавиатуре сведен к минимуму так как реализуется только слайдерами и комбинированными списками, что существенно ускоряет выбор параметров и практически исключает возможные ошибки и сбои в работе программы. Проект включает три основных модуля для проектирования состава бетона и параллельного определения оптимального режима твердения. Интерфейс этих модулей размещён на трёх вкладках:

- «Общие характеристики»;
- «СОСТАВ БЕТОНА»;
- «Режим твердения».

Вкладка «Общие характеристики» предназначена для ввода исходных данных (рисунок 3).

Интерфейс оформлен таким образом, чтобы пользователю было интуитивно понятно, как выбрать нужные значения. Форма разделена на области по группам параметров.

Раздел «Прогноз погоды на период твердения» содержит два слайдера для ввода температуры наружного воздуха и скорости ветра.

В разделе «Характеристики конструкции» задают геометрические размеры конструкции, а из комбинированного списка выбирают вид конструкции. После чего автоматически запускается расчёт модуля теплоотдающей поверхности, результат отображается в текстовом окне.

Далее указывают характеристики опалубки в разделе «Конструкция опалубки». Количество и номера слоёв выбирают посредством переключателей. Толщина каждого слоя устанавливается слайдером. Из раскрывающегося списка выбирают соответствующий материал слоя опалубки и получают его основные свойства для дальнейших расчётов.

Вкладка «СОСТАВ БЕТОНА» позволяет открыть ещё три вкладки для подбора материалов, установления требований и расчёта состава бетона (рисунок 4).

Моделирование режима твердения бетона

Файл Общие характеристики СОСТАВ БЕТОНА Предварительный разогрев Режим твердения Графики Раздел находится в разработке

Прогноз погоды на период твердения

Температура воздуха, град.С: -5

Скорость ветра, м/с: 5

Характеристики конструкции

Толщина, м: 2.4

Длина, м: 1.8

Ширина, м: 1.8

Вид конструкции: Массивный фундамент

Модуль теплоотдающей поверхности, 1/м: 4.6

Конструкция опалубки

Верх опалубки

№ слоя: 1 2 3 4 5 6 7

Толщина, мм: 20+100

Материал (плотность кг/м куб.; теплопроводность, Вт/(м град. С)): Доска + опилки

Стенки опалубки

№ слоя: 1 2 3 4 5 6 7

Толщина, мм: 50+100

Материал (плотность кг/м куб.; теплопроводность, Вт/(м град. С)): АИ профиль + минвата

Днище опалубки

№ слоя: 1 2 3 4 5 6 7

Толщина, мм: 0

Материал (плотность кг/м куб.; теплопроводность, Вт/(м град.С)):

Рисунок 3 – Вкладка «Общие характеристики» (окно ввода исходных данных)

Моделирование режима твердения бетона

Файл Общие характеристики СОСТАВ БЕТОНА Предварительный разогрев Режим твердения Графики Раздел находится в разработке

Подбор материалов для бетона Требования к бетону Состав бетона

Цемент

Производитель цемента: ОАО "Красносельскстройматериалы"

$f_{ц}$, МПа: 50

НГ, %: 25

Группа по коэффициенту эффективности при тепловой обработке: 1 2 3

Минералогический состав

Алит: 54 %

Белит: 21 %

Алюминат: 7 %

Браунмиллерит: 14 %

Заполнители

Крупный заполнитель

Вид: гранитный щебень известняковый щебень базальтовый щебень гравий щебень из гравия

Крупность: 10 мм 20 мм 40 мм 70 мм

Мелкий заполнитель

стандартный дробленый

Модуль крупности: 2

Рисунок 4 – Вкладка «СОСТАВ БЕТОНА» (Подбор материалов для бетона)

Если используется цемент известного завода-поставщика, то при выборе завода из комбинированного списка в разделе «Цемент» автоматически заполняются поля его основных характеристик: активность, нормальная густота, группа по коэффициенту эффективности при тепловой обработке, минералогический состав. В противном случае все поля заполняются с помощью соответствующих слайдеров. Затем в разделе «Заполнители» в группе «Крупный заполнитель», используя переключатели, выбирают вид и крупность крупного заполнителя, а в группе «Мелкий заполнитель» – разновидность и модуль крупности мелкого заполнителя.

На вкладке «Требования к бетону» (рисунок 5) реализован интерфейс программного модуля, позволяющего установить, какой бетон мы должны получить в результате проектирования и выбрать химиче-

ские добавки, которые разделены на группы по назначению. В программный продукт введены пластифицирующие добавки, ускорители твердения и противоморозные добавки (Стахемент 3000, Хидетал-ГП-9альфа, FRAME GIPER S-SB, Стахемент C3, FRAME C3, Темп Ж45, Стахемент NS, Криопласт Премиум, Зимняя-П-3-НК и др.).

В разделе «Проектные характеристики бетона и бетонной смеси» задают класс бетона и марку бетонной смеси по удобоукладываемости. Указывают требуемое значение относительной прочности бетона. Справочно приводится значение средней прочности бетона применительно к нормативному коэффициенту вариации. В области «Химические добавки», варьируя слайдерами, подбирают количество каждой добавки в % от массы цемента. Результаты вычислений можно посмотреть на вкладке «Состав бетона» (рисунок 6).

Моделирование режима твердения бетона

Файл Общие характеристики СОСТАВ БЕТОНА Предварительный разогрев Режим твердения Графики Раздел находится в разработке

Подбор материалов для бетона Требования к бетону Состав бетона

Проектные характеристики бетона и бетонной смеси

Класс бетона: C50/60 Относительная прочность бетона: 70 % Коэффициент вариации: 13.5 % Средняя прочность бетона: 53.98 МПа

Марка бетонной смеси по удобоукладываемости: ПЗ (ОК=10-15см)

Химические добавки

Пластификатор

Добавка: Хидетал-ГП-9 альфа Дозировка по массе цемента: 0.6 %

Ускоритель твердения

Добавка: Стахемент NS (CrNS) Дозировка по массе цемента: 1 %

Противоморозная добавка

Добавка: Дозировка по массе цемента: 0 %

Рисунок 5 – Вкладка «СОСТАВ БЕТОНА» (Требования к бетону)

Моделирование режима твердения бетона

Файл Общие характеристики СОСТАВ БЕТОНА Предварительный разогрев Режим твердения Графики Раздел находится в разработке

Подбор материалов для бетона Требования к бетону Состав бетона

Расход материалов, кг/м куб.

	Первичный подбор состава:	Откорректированный состав с учётом условий твердения:
Цемент	341	340
Вода	172	150
В/Ц	0.5	0.44
Песок	710	717
Щебень	1195	1195

Химические добавки в бетон:

Пластификатор	Хидетал-ГП-9 альфа	0.6	0.5
Ускоритель твердения	Стахемент NS (CrNS)	1	1.2
Противоморозная добавка	-	0	0

Рисунок 6 – Вкладка «СОСТАВ БЕТОНА» (Состав бетона)

Существует возможность в производственных условиях производить корректировку состава с учетом технологических требований. Данный модуль обеспечивает реализацию основной цели проектирования состава бетона с комплексными химическими добавками – получение требуемых свойств бетонной смеси и бетона (заданная удобоукладываемость бетонной смеси, характеризующая подвижностью или жесткостью и требуемый класс бетона).

Вкладка «Режим твердения» позволяет рассчитывать температурные условия твердения бетона, обеспечивающие получение заданной прочности при минимальных затратах, и отображает результаты графически (рисунок 7).

Непосредственно на вкладке «Режим твердения» в соответствующих текстовых окнах выводятся параметры режима твер-

дения, полученные в результате расчетов: предположительное время твердения бетонного массива, требуемая температура бетонной смеси в момент укладки, температура бетона в начальный момент времени твердения, удельная мощность источника подогрева, если осуществляется подвод тепла. Примеры выбора режимов твердения и конструкций опалубок для фундамента приведены в таблице 1.

Полученные результаты можно просмотреть в виде графиков, наглядно иллюстрирующих максимально эффективный режим (рисунок 8, 9). Если результаты первичного расчета показали, что данный состав или режим твердения не позволяют обеспечить заданные свойства бетона, то по нажатию на соответствующую командную кнопку можно пересчитать состав или изменить режим.

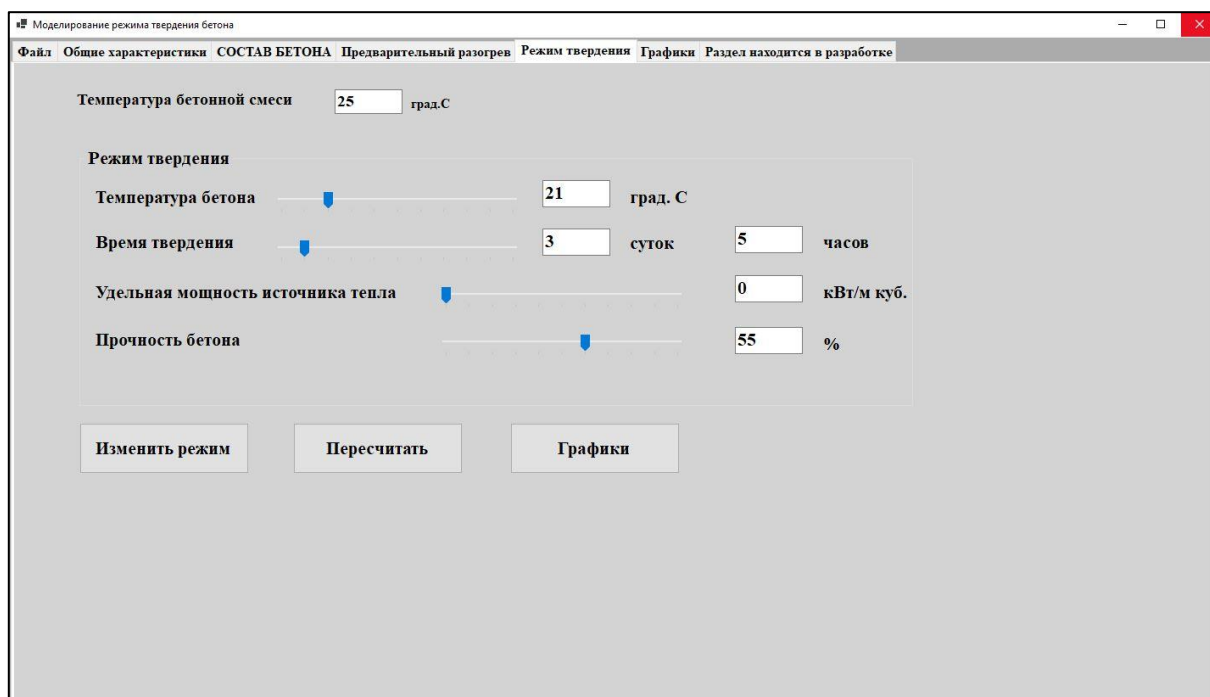


Рисунок 7 – Вкладка «Режим твердения»

Таблица 1 – Режимы твердения и конструкции опалубок для фундамента

Способы выдерживания			Соответствующие конструкции опалубки (количество, толщина слоев, материал)		
Режимы твердения	Применение предварительного разогрева смеси	Химические добавки	Верх опалубки	Стенки опалубки	Днище опалубки
Режим твердения № 1	нет	нет	Доска 20 мм	Сталь 5 мм	нет
Режим твердения № 2	нет	Ускоритель твердения	Доска 20 мм Опилки 100 мм	Сталь 5 мм утеплитель минвата 100 мм	нет
Режим твердения № 3	Предварительный разогрев смеси	нет	Доска 20 мм Опилки 100 мм	Доска 20 мм	нет
Режим твердения № 4	Предварительный разогрев смеси	Ускоритель твердения	Доска 20 мм Опилки 100 мм	Доска 20 мм минвата 100 мм	нет
Режим твердения № 5	Предварительный разогрев смеси	Ускоритель твердения + пластифицирующая добавка	Доска 20 мм Опилки 100 мм	Алюминиевый профиль 50 мм минвата 100 мм	нет

Полученные результаты можно просмотреть в виде графиков, наглядно иллюстрирующих максимально эффективный режим (рисунки 8, 9). Если результаты первичного расчёта показали, что данный состав или режим твердения не позволяют обеспечить заданные свойства бетона, то необходимо пересчитать состав или изменить режим.

Программа позволяет в случае получения неудовлетворительных результатов для обеспечения более интенсивного и экономичного режима твердения бетона применить цемент с другим минералогическим составом и активностью, изменить вид и (или) количество добавок ускорителя твердения, использовать пластифицирующие и другие виды добавок, подобрать состав бетона с большей

фактической прочностью, изменить начальную температуру бетонной смеси. Для оптимизации можно изменить конструкцию опалубки, назначая другие значения толщины и материала теплоизолирующего слоя.

Предложенная программа продолжает тестироваться авторами с целью её усовершенствования. Рассматривается возможность разработки приложения с введением других влияющих факторов, оценочной стоимости реализации различных вариантов режима твердения, включение в выходные текущие характеристики не только температуры и прочности, но иных важных параметров – морозостойкости, водонепроницаемости, коррозионной стойкости и модуля упругости бетона.

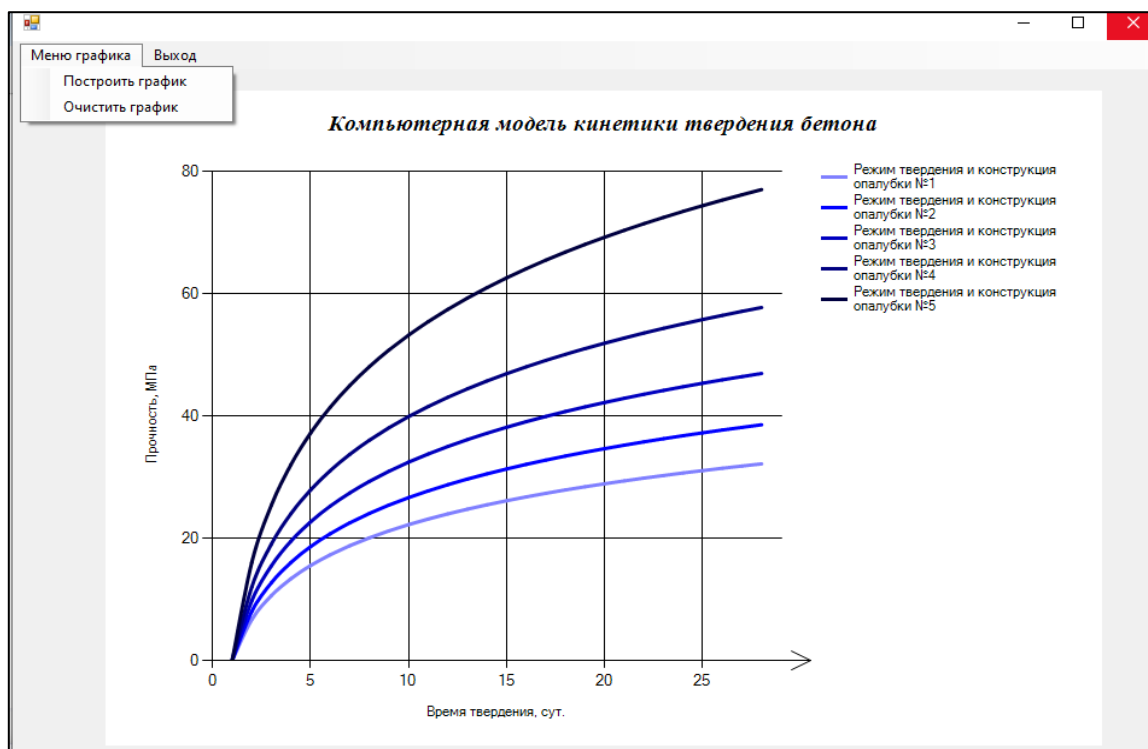


Рисунок 8 – Зависимость прочности бетона от времени твердения для различных режимов и конструкций опалубки

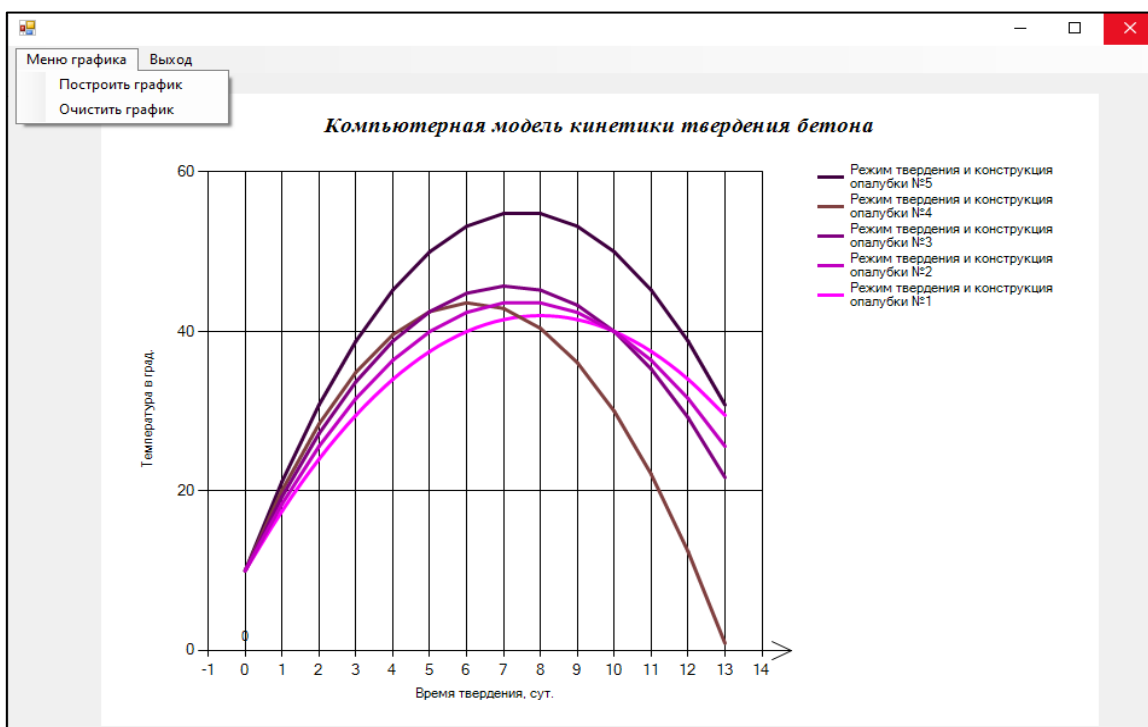


Рисунок 9 – Зависимость температуры бетона от времени твердения для различных режимов и конструкций опалубки

Заключение

Использование представленной математической модели и созданного на её основе программного продукта позволит проектировать состав бетона с химическими добавками и выбирать режим его твердения, обеспечивающие достижение требуемой прочности в интерактивном режиме. Это избавит инженера-технолога от необходимости проводить большой объем работы для экспериментальной проверки подобранных составов бетона и режимов его твердения.

Список цитированных источников

1. Бабицкий, В. В. Программное обеспечение расчетов параметров предварительного электронагрева бетонной смеси / В. В. Бабицкий, Ж. Л. Зеленковская // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства : сборник трудов Междуна. науч.-техн. конф. – Минск, 2015. – С. 43–48.

2. Батяновский, Э. И. Технология зимнего монолитного бетонирования / Э. И. Батяновский, Н. М. Голубев, В. В. Бабицкий, М. Ф. Марковский. – Минск : БНТУ, 2005. – 237 с.
3. Михайлов, В. В. Новая технология тепловлажностной обработки конструкций / В. В. Михайлов, А. К. Караковский, В. С. Волков // Бетон и железобетон. – М. : Стройиздат. – 1988. – № 12. – С. 4–10.
4. Синякин, А. Г. Совершенствование режимов твердения бетонов с учетом неизо термического тепловыделения цемента : автореферат канд. техн. н. / А. Г. Синякин. – Харьков, 1995. – 18 с.
5. Мчедлов-Петросян, О. П. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов / О. П. Мчедлов-Петросян, А. В. Ушеров-Маршак, А. М. Урженко. – М. : Стройиздат, 1984. – 224 с.
6. Шифрин, С. А. Кинетика тепловыделения цемента и выбор эффективных режимов теплового воздействия на монолитный бетон : автореферат канд. техн. н. / С. А. Шифрин. – М., 1979. – 20 с.
7. Лысов, В. П. Формирование ресурсосберегающих технологических процессов возведения конструкций из монолитного бетона : автореферат доктора техн. н. / В. П. Лысов. – М., 1984. – 38 с.
8. Бобко, Ф. А. Обоснование режимов возведения бетонных и железобетонных конструкций на основе оптимизации энергетического потенциала технологических процессов. Результаты исследований, основы моделирования и прогнозирования : автореферат доктора техн. н. / Ф. А. Бобко. – Мн., 1998. – 39 с.
9. Дворкин, Л. И. Проектирование состава бетона при термосном выдерживании конструкции / Л. И. Дворкин, Ю. В. Гарницкий // Бетон и железобетон. – 2000. – № 6. – С. 9–15.
10. Лукьянов, В. С. Расчеты температурного режима бетонных и каменных конструкций при зимнем производстве работ / В. С. Лукьянов. – М. : НКПС Трансжелдориздат, 1934. – 91 с.
11. Запорожец, И. Д. Тепловыделение бетона / И. Д. Запорожец, С. Д. Окорков, А. А. Парийский. – Ленинград : Стройиздат, 1966. – 316 с.
12. Бабицкий, В. В. Температура, как фактор интенсивности роста прочности бетона / В. В. Бабицкий, Ж. Л. Зеленковская // Проблемы повышения качества и ресурсосбережения в дорожной отрасли : сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Минск, 2013. – С. 82–86.
13. Попович, С. Кинетика прочности портландцементного камня / С. Попович // Бетон и железобетон. – 1972. – № 3. – С. 6–14.
14. Бабицкий, В. В. Прогнозирование кинетики твердения бетона при термосном выдерживании конструкций / В. В. Бабицкий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века: информационный научно-технический журнал. – 2005. – № 4. – С. 66–67.
15. Бабицкий, В. В. Прогнозирование характеристик твердеющего тяжелого бетона / В. В. Бабицкий, С. Д. Семенюк, М. С. Бибик // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць. – Рівне, 2009. – Випуск 18. – С. 3–12.
16. Ушеров-Маршак, А. В. «Термобетон-М» – информационная технология монолитного бетона / А. В. Ушеров-Маршак, Ю. Б. Гиль, А. Г. Синякин // Бетон и железобетон. – 2000. – № 4. – С. 2–5.
17. Марцинкевич, В. Л. Энергосберегающая технология ускоренного твердения бетона / В. Л. Марцинкевич. – Минск : Наука и техника. – 1990. – 248 с.
18. Интенсификация теплообмена при ТВО изделий / В. П. Абрамов, В. В. Шмалько, В. П. Виноградов [и др.] // Бетон и железобетон. – 1988. – № 4. – С. 10–14.
19. Non-linear material modelling strategy for conventional and high-performance concrete assisted by testing / N. Pressmair, F. Brosch, M. Hammerl, B. Kromoser // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 161. – Paper 106933. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106933.
20. Сафаров, А. Р. Реализация численной модели бетона CSCM применительно к отечественным классам бетонов / А. Р. Сафаров, В. Б. Дорожнинский, В. И. Андреев // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 4. – С. 545–555. – DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.545-555.

References

1. Babickij, V. V. Programmnoe obespechenie raschetov parametrov predvaritel'nogo elektrorazogreva betonnoj smesi / V. V. Babickij, ZH. L. Zelenkovskaya // Sovremennye problemy vnedreniya evropejskikh standartov v oblasti stroitel'stva : sbornik trudov Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. – Minsk, 2015. – S. 43–48.
2. Batyanovskij, E. I. Tekhnologiya zimnego monolitnogo betonirovaniya / E. I. Batyanovskij, N. M. Golubev, V. V. Babickij, M. F. Markovskij. – Minsk : BNTU, 2005. – 237 s.
3. Mihajlov, V. V. Novaya tekhnologiya teplovlazhnostnoj obrabotki konstrukcij / V. V. Mihajlov, A. K. Karakovskij, V. S. Volkov // Beton i zhelezobeton. – M. : Strojizdat. – 1988. – № 12. – S. 4–10.
4. Sinyakin, A. G. Sovershenstvovanie rezhimov tverdeniya betonov s ucheto m neizotermicheskogo teplovydeleniya cementa : avtoreferat kand. tekhn. n. / A. G. Sinyakin. – Har'kov, 1995. – 18 s.
5. Mchedlov-Petrosyan, O. P. Teplovydelenie pri tverdenii vyazhushchih veshchestv i betonov / O. P. Mchedlov-Petrosyan, A. V. Ushero v-Marshak, A. M. Urzhenko. – M. : Strojizdat, 1984. – 224 s.
6. SHifrin, S. A. Kinetika teplovydeleniya cementa i vybor effektivnyh rezhimov teplovogo vozdeystviya na monolitnyj beton : avtoreferat kand. tekhn. n. / S. A. SHifrin. – M., 1979. – 20 s.
7. Lysov, V. P. Formirovanie resursosberegayushchih tekhnologicheskikh processov vozvedeniya konstrukcij iz monolitnogo betona : avtoreferat doktora tekhn. n. / V. P. Lysov. – M., 1984. – 38 s.
8. Bobko, F. A. Obosnovanie rezhimov vozvedeniya betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij na osnove optimizacii energeticheskogo potenciala tekhnologicheskikh processov. Rezul'taty issledovanij, osnovy modelirovaniya i prognozirovaniya : avtoreferat doktora tekhn. n. / F. A. Bobko. – Mn., 1998. – 39 s.
9. Dvorkin, L. I. Proektirovanie sostava betona pri termosnom vyderzhivanii konstrukcii / L. I. Dvorkin, YU. V. Garnickij // Beton i zhelezobeton. – 2000. – № 6. – S. 9–15.
10. Luk'yanov, V. S. Raschety temperaturnogo rezhima betonnyh i kamennyh konstrukcij pri zimnem proizvodstve rabot / V. S. Luk'yanov. – M. : NKPS Transzheldorizdat, 1934. – 91 s.
11. Zaporozhec, I. D. Teplovydelenie betona / I. D. Zaporozhec, S. D. Okorokov, A. A. Parijskij. – Leningrad : Strojizdat, 1966. – 316 s.
12. Babickij, V. V. Temperatura, kak faktor intensivnosti rosta prochnosti betona / V. V. Babickij, ZH. L. Zelenkovskaya // Problemy povysheniya kachestva i resursosberezheniya v dorozhnoj otrasli : sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. – Minsk, 2013. – S. 82–86.
13. Popovich, S. Kinetika prochnosti portlandcementnogo kamnya / S. Popovich // Beton i zhelezobeton. – 1972. – № 3. – S. 6–14.
14. Babickij, V. V. Prognozirovanie kinetiki tverdeniya betona pri termosnom vyderzhivanii konstrukcij / V. V. Babickij // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka: informacionnyj nauchno-tekhnicheskij zhurnal. – 2005. – № 4. – S. 66–67.
15. Babickij, V. V. Prognozirovanie harakteristik tverdeyushchego tyazhelogo betona / V. V. Babickij, S. D. Semenyuk, M. S. Bibik // Resursoekonomni materialy, konstrukcii, budivli ta sporudi : zbirnik naukovih prac'. – Rivne, 2009. – Vipusk 18. – S. 3–12.
16. Ushero v-Marshak, A. V. «Termobeton-M» – informacionnaya tekhnologiya monolitnogo betona / A. V. Ushero v-Marshak, YU. B. Gil', A. G. Sinyakin // Beton i zhelezobeton. – 2000. – № 4. – S. 2–5.
17. Marcinkevich, V. L. Energosberegayushchaya tekhnologiya uskorenno go tverdeniya betona / V. L. Marcinkevich. – Minsk : Navuka i tekhnika. – 1990. – 248 s.
18. Intensifikaciya teploobmena pri TVO izdelij / V. P. Abramov, V. V. SHmal'ko, V. P. Vinogradov [i dr.] // Beton i zhelezobeton. – 1988. – № 4. – S. 10–14.
19. Non-linear material modelling strategy for conventional and high-performance concrete assisted by testing / N. Pressmair, F. Brosch, M. Hammerl, B. Kromoser // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 161. – Paper 106933. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106933.
20. Safarov, A. R. Realizaciya chislennoj modeli betona CSCM primenitel'no k otechestvennym klassam betonov / A. R. Safarov, V. B. Dorozhinskij, V. I. Andreev // Vestnik MGSU. – 2023. – T. 18, № 4. – S. 545–555. – DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.545-555.

Материал поступил 12.03.2025, одобрен 23.03.2025,
принят к публикации 28.03.2025

УДК 692.2:624.042

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЗОН СТЫКА РАЗНОНАГРУЖЕННЫХ СТЕН МНОЭТАЖНЫХ КАМЕННЫХ ЗДАНИЙ

И. И. Неверович

К. т. н., доцент, профессор кафедры строительства и эксплуатации зданий и сооружений, Филиал БНТУ
«Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала БНТУ»,
Минск, Беларусь, e-mail: neverovich@bntu.by

Реферат

В статье представлен сравнительный анализ требований по обеспечению трещиностойкости кладки в зоне стыка разнодеформируемых стен многоэтажных каменных зданий, которые изложены в действующих в настоящее время нормах по проектированию каменных и армокаменных конструкций в Республике Беларусь и в Российской Федерации, и результаты отдельных исследований по данной проблеме. Отмечено отсутствие методики расчета (оценки) трещиностойкости кладки в зоне стыка таких стен в новых отечественных нормах. Вместе с тем, в отмененных нормах такая методика присутствовала. Она присутствует и в нормах Российской Федерации, актуализировавшей прежние нормы по каменным конструкциям. Такая методика расчета сложилась на основании проведенных ранее обширных исследований. Анализ их свидетельствует, что в зоне стыка разнодеформируемых стен (вследствие разной их нагруженности и различия деформативных свойств материалов) создается сложное многофакторное напряженно-деформированное состояние, выразить которое в виде расчетных формул затруднительно. Поэтому для оценки трещиностойкости и была разработана упрощенная методика расчета, упоминаемая выше. Она показала свою эффективность, полезность и необходимость. Такая методика расчета рекомендуется для использования при проектировании многоэтажных каменных зданий с ее корректировкой, учитывающей реалии новых норм по каменным конструкциям. При этом расчет должен сопровождаться соответствующими конструктивными мероприятиями как оговоренными в нормах, так и в рекомендациях по результатам исследований.

Ключевые слова: каменные и армокаменные конструкции, многоэтажные каменные здания, разнонагруженные стены, трещиностойкость зоны стыка стен, напряженно-деформированное состояние кладки, исследования каменных конструкций, методика расчета, конструирование зон стыка, корректировка нормативных документов.

CRACK RESISTANCE OF JOINT ZONES OF MULTI-LOADED WALLS OF MULTI-STORY STONE BUILDINGS

I. I. Neverovich

Abstract

The article presents a comparative analysis of the requirements for ensuring crack resistance of masonry in the junction zone of differently deformable walls of multi-story masonry buildings, which are set out in the currently valid standards for the design of masonry and reinforced masonry structures in the Republic of Belarus and the Russian Federation, and the results of individual studies on this issue. The absence of a methodology for calculating (assessing) crack resistance of masonry in the junction zone of such walls in the new domestic standards is noted. At the same time, such a methodology was present in the cancelled standards. It is also present in the standards of the Russian Federation, which updated the previous standards for masonry structures. Such a calculation methodology was developed on the basis of previously conducted extensive studies. Their analysis shows that in the junction zone of differently deformable walls (due to their different loads and differences in the deformation properties of materials), a complex multifactor stress-strain state is created, which is difficult to express in the form of calculation formulas. Therefore, a simplified calculation method mentioned above was developed to assess crack resistance. It has proven its effectiveness, usefulness and necessity. This calculation method is recommended for use in the design of multi-story stone buildings with its adjustment, taking into account the realities of new standards for stone structures. In this case, the calculation should be accompanied by appropriate design measures, both specified in the standards and in the recommendations based on the results of studies.

Keywords: stone and reinforced stone structures, multi-story stone buildings, differently loaded walls, crack resistance of the wall joint zone, stress-strain state of masonry, studies of stone structures, calculation method, design of joint zones, adjustment of regulatory documents.

Введение

При проектировании каменных зданий возникают вопросы обеспечения несущей способности и эксплуатационной пригодности каменных конструкций. Не последнее место в ряду требований по обеспечению эксплуатационной пригодности каменных конструкций занимают вопросы обеспечения трещиностойкости каменных конструкций и узлов их сопряжений. Одним из таких вопросов является трещинообразование в зонах стыка разнонагруженных стен многоэтажных каменных зданий. Для надежного обеспечения трещиностойкости таких зон необходима методика расчета и разработка по результатам расчета соответствующих рекомендаций по проектированию (конструктивных мероприятий) узлов сопряжений каменных конструкций и здания в целом. В новых, ныне действующих в Республике Беларусь и предшествовавших им нормах [1, 2], такая методика отсутствует. В настоящей статье приведены и обоснованы предложения по методике расчета трещиностойкости зон стыка разнонагруженных стен каменных зданий с использованием результатов исследований, которые были включены в отмененные, ранее действующие, нормативные документы по проектированию каменных конструкций [3, 4], с учетом рекомендаций по расчету приведенных в ныне действующих нормах Российской Федерации по проектированию каменных и армокаменных конструкций [5].

Результаты исследований

В новых нормах Республики Беларусь по проектированию каменных и армокаменных конструкций СП 5.02.01-2021, разработанных на основе требований Еврокода-6, оговорено условие, что в каменных зданиях высотой более трёх этажей необходимо устраивать по всем продольным и поперечным несущим и самонесущим стенам в уровне перекрытий всех этажей монолитные железобетонные пояса или обвязки [1, п. 11.3.1.9]. Эти пояса и обвязки рассчитываются как центрально растянутые железобетонные элементы на условную силу, определяемую по формуле (11.2) норм: $F_{line,per} = l_1 \times 10 \text{ кН/м}$ (где l_1 – расстояние между стенами перпендикулярного направления в метрах), но принимаемую не более 90 кН. В нормах оговаривается, что в зданиях высотой не более пяти этажей с перекрытиями из сборных железобетонных плит пустотного настила, изготавливаемых по агрегатно-поточной технологии, вместо железобетонных обвязок допускается устройство армокаменных обвязок, располагаемых под перекрытием и воспринимающих расчетное значение растягивающего усилия, определяемого по формуле (11.2).

Армирование железобетонного пояса или обвязки определяется как для центрально растянутого железобетонного элемента делением условной растягивающей силы F на расчетное значение предела текучести арматуры, но принимается не менее 150 мм² и не менее двух стержней [1, п. 11.3.1.10]. Таким образом, минимальное арми-

рование монолитного пояса или обвязки в соответствии с нормами составляет два стержня S 500 диаметром 10 мм. Следует отметить, что в нормах по каменным конструкциям, предшествующих ныне действующим, то есть в ТКП 45-5.03-308-2017 [2], также, как и в Еврокоде-6, на основании которого они были разработаны, была регламентирована и площадь сечения монолитного пояса и обвязки, минимальное значение которой должно было составлять 0,025 м². Тогда, например, при толщине стены 380 мм минимальная высота сечения пояса составит 65 мм. В ныне действующих нормах [1] указанная регламентация отсутствует.

В нормах отмечается, что «в расчетах железобетонных поясов и обвязок арматуру параллельного направления перекрытий и перемычек допускается учитывать с полным поперечным сечением при условии ее расположения на расстоянии не более 0,5 м соответственно от оси стены и плоскости перекрытия. При этом учитываемая в расчете арматура перекрытий и перемычек должна удовлетворять требованиям непрерывности. В армокаменных обвязках арматуру располагают в двух или трех рядах горизонтальных растворных швов каменной кладки, считая от нижней поверхности перекрытия» [1].

Требования норм о необходимости устройства железобетонных поясов или обвязок по всем несущим и самонесущим стенам в уровне перекрытий многоэтажных зданий, изложенные выше, преследуют несколько целей, в том числе обеспечение живучести зданий в особой расчетной ситуации. При этом монолитные железобетонные пояса и обвязки выравнивают деформации разнонагруженных стен в зоне их сопряжения. Таким образом решается важнейшая задача – обеспечение трещиностойкости зон стыков разнонагруженных стен каменных зданий, где возникает разность деформаций кладки с возможным образованием трещин. Так, в п. 11.1.4.5 [1] прямо отмечается, что в местах соединений ненесущих и несущих стен следует учитывать разность деформаций кладки.

При совместной работе взаимосвязанных стен в них возникает сложное напряженно-деформированное состояние по причине разнонагруженности стен и различной их деформативности. Следует отметить, что обширные исследования совместной работы разнонагруженных стен многоэтажных каменных зданий и напряженно-деформированного состояния кладки в зонах стыка таких стен проводились в 90-х годах под эгидой отдела прочности крупнопанельных и каменных зданий ЦНИИСК им. Кучеренко (г. Москва) В. А. Камежко, С. А. Семеновым, В. Л. Мусиенко, Р. С. Шахназаровым, А. А. Шишкиным, М. К. Ищукон и др. Проводились экспериментальные исследования и натурные наблюдения зданий за деформациями совместно работающих разнонагруженных стен экспериментальных жилых домов. В частности, такие исследования были проведены под эгидой ЦНИИСК при возведении и эксплуатации 9-этажного каменного здания общежития по ул. Натуралистов в г. Минске [6]. В процессе исследований замерялись деформации кладки в зонах стыка несущих и самонесущих стен, начиная с момента возведения стен нижних этажей и заканчивая завершением строительства здания и начала его эксплуатации. При этом была разработана и успешно применена специальная методика натурных измерений деформаций кладки в зоне стыка разнонагруженных стен [7, 8].

В ЦНИИСК им. Кучеренко проводились уникальные исследования напряженно-деформированного состояния кладки в зоне стыка разнодеформируемых стен и на моделях [9]. Так, была выполнена модель трёхэтажного каменного здания со стенами из силикатного кирпича (фрагмент здания в масштабе 1:2) в виде двутавра, образованного двумя самонесущими продольными наружными и одной поперечной несущей внутренней стеной, с дисками перекрытий из пустотных плит. Деформации ползучести кладки нижележащих этажей, влияющие на напряженное состояние исследуемых трёх «верхних» этажей, имитировались опусканием опор под поперечной несущей стеной. Проведенные измерения позволили исследовать характер развития деформаций во времени, с учетом поэтапности загрузки, что немаловажно для оценки трещиностойкости зон стыка стен. В работе отмечалось, что первые трещины в зонах стыка разнонагруженных стен модели, то есть поперечной несущей и продольной самонесущей стенами фрагмента здания, возникли через семь месяцев после окончания возведения. При этом разность вертикальных перемещений низа внутренней стены (разность деформаций кладки в зоне стыка) составила 4 мм. Трещины проходили по швам кладки внутренней стены под углом 45° в уровне верхних этажей и начинались от первого шва между плитами перекрытий.

Проведенные обширные исследования как экспериментальных фрагментов (моделей) каменных зданий, так и натурные наблюдения за каменными конструкциями реальных зданий (упоминаемые выше) позволили выявить особенности совместной работы разнонагруженных стен и напряженно-деформированное состояние кладки в зоне стыка таких стен. В стенах происходит перераспределение усилий, что вызывает в них дополнительные касательные и нормальные напряжения [9, 10]. Наибольшие по величине дополнительные напряжения возникают по шву между стенами и убывают по длине стены. Вследствие этого величина усилий в стенах в отдельных случаях может в два и более раза отличаться от тех, которые получаются при расчете без учета совместной работы стен. При этом менее деформируемые стены более нагружены, чем это предполагается по расчету без учета совместной работы стен. А это может привести к перегрузке и появлению трещин в зоне стыка со стороны менее деформированной стены (хотя это и маловероятно). А вот более значимо то обстоятельство, что хотя более деформированные стены разгружаются, однако их «проседание» под нагрузкой («прогиб») приводит к образованию трещин в зоне стыка со стороны более деформируемой стены.

При этом механизм образования таких трещин в зоне стыка разнонагруженных стен многоэтажного здания, например поперечной несущей и продольной самонесущей, в упрощенном варианте рассмотрения его таков. В поперечной несущей сильнонагруженной стене первого этажа многоэтажного здания развиваются значительные вертикальные сжимающие деформации, но по длине пролета стены они не равномерны. В середине пролета они достигают расчетного максимума, а в примыкании к продольной слабонагруженной стене снижаются, поскольку включается в работу последняя помогающая работать поперечной стене. В итоге диск перекрытия, опирающегося на поперечную стену, как бы прогибается с максимальным прогибом f_1 посередине пролета поперечной стены. Кладка поперечной стены второго этажа целиком проседает на f_1 и получает дополнительно собственную деформацию сжатия в пределах второго этажа. В итоге суммарная величина «прогиба» посередине пролета поперечной стены второго этажа f_2 будет больше f_1 . На третьем этаже прогиб еще больше, то есть чем выше, тем больше.

Максимальный «прогиб» диска междуэтажного перекрытия посередине пролета поперечной стены будет на верхнем этаже, и она работает как балка-стенка, опорами которой являются продольные стены. На приопорных участках такой балки в примыкании к продольным стенам вследствие максимальных касательных напряжений возникают напряжения по наклонным площадкам – главные растягивающие напряжения σ_{mt} , величина которых наибольшая именно на верхнем этаже в силу наличия здесь максимального «прогиба» балки-стенки. Вместе с тем прочность кладки на действие главных растягивающих напряжений f_{mt} здесь наименьшая в силу двух причин. Во-первых, класс прочности кладочного изделия и раствора проектировщик на верхних этажах назначает меньше, поскольку здесь вертикальные сжимающие напряжения меньше, чем на нижних. А поскольку класс прочности материалов ниже, то и прочность кладки при действии любых напряженных состояний и, в том числе, на действие f_{mt} тоже меньше. Во-вторых, прочность f_{mt} – это прочность по наклонным площадкам, а она зависит от пригрузки (сжимающих напряжений): чем они больше, тем больше сила трения и, значит, f_{mt} . На верхнем этаже пригруз наименьший, значит, и f_{mt} наименьшие.

Вследствие этого на верхнем этаже в зоне стыка разнонагруженных стен со стороны несущей стены создается парадоксальная ситуация: напряжения σ_{mt} максимальны, а прочность на их действие f_{mt} минимальна, и при ее превышении здесь и образуются наклонные трещины (со стороны более деформируемой стены). Таким образом, наклонные трещины образуются в кладке более деформируемой стены в примыкании ее к менее деформируемой стене под верхним междуэтажным перекрытием (выше, то есть под перекрытием образование их менее вероятно, поскольку последнее работает на сжатие, как распорка между менее деформируемыми стенами). С течением времени по мере развития деформаций ползучести трещины могут «переползти» и на нижние этажи, но наклон их уменьшается, поскольку «прогиб» балок-стенок уменьшается. Таков в целом механизм образования трещин в зоне стыка разнонагруженных стен многоэтажных каменных зданий. Это механизм образования трещин вследствие деформаций самой кладки при сило-

вых воздействиях. Помимо этого, могут быть деформации кладки в зоне стыка стен вследствие неравномерной осадки фундаментов, температурных воздействий и др., которые мы не рассматриваем.

На описанный выше механизм образования трещин значительное влияние оказывает величина деформаций ползучести, поэтапность и длительность возведения здания. Так, вследствие деформаций ползучести кладки нижележащих этажей после окончания строительства здания более деформируемые стены продолжают разгружаться, а менее деформируемые догружаться. С учетом этого, при оценке напряженно-деформированного состояния и расчете вертикальных напряжений в кладке более деформируемой стены, более близкими к действительности будут вертикальные сжимающие напряжения, определенные на момент окончания строительства здания, а в кладке менее деформируемой стены – на момент через 5–6 лет, когда практически прекращаются деформации ползучести кладки.

Сложное напряженно-деформируемое состояние кладки в зоне стыка обостряется еще и тем обстоятельством, что и в самом кладочном изделии при сжатии кладки возникает сложное напряженное состояние, поскольку помимо сжатия в нем может возникать срез и изгиб. Это обстоятельство было установлено давно, еще исследованиями Л. И. Онищика [11]. А количественные показатели этого явления были уточнены новейшими исследованиями [12–15]. При этом данное явление более характерно для кирпича, а не для камней (высотой 138 и 188 мм) в силу более низкого момента сопротивления кирпича при работе на изгиб. И с этим нужно считаться при решении рассматриваемой проблемы.

Как показали исследования, в зоне стыка разнонагруженных стен на верхних этажах образуются именно наклонные трещины вследствие воздействия главных напряжений, действующих по наклонным площадкам, то есть под углом к горизонтальным растворным швам каменной кладки. И здесь необходимо принимать во внимание особенности работы кладки в условиях двухосного напряженного состояния, которое отличается в значительной степени от одноосного, как показывают исследования [16–18]. Помимо всего прочего, при оценке трещиностойкости кладки в рассматриваемой зоне необходимо учитывать анизотропию прочностных и деформативных свойств каменной кладки при работе ее под воздействием усилий, направленных под углом к горизонтальным швам кладки.

Подробное исследование анизотропии свойств кладки в подобных условиях проведено в работах В. Н. Деркача и А. В. Галалюка, позволившее установить основные факторы, которые влияют на анизотропию прочностных и деформативных характеристик каменной кладки при сжатии и разработать новую расчетную модель прочности при сжатии кладки под углом к главным осям ее анизотропии [19, 20]. Фактор анизотропии сказывается и на величине главных напряжений, и не только главных сжимающих, но и главных растягивающих напряжений, как это следует из результатов исследований [21]. В последней работе исследовалось влияние анизотропии кладки в том числе и на прочность на растяжение по наклонным площадкам, что особенно важно для анализа рассматриваемой проблемы.

В работе отмечалось, что прочность каменной кладки на растяжение при раскалывании $f_{t,obs}$ при действии растягивающих напряжений параллельно горизонтальным растворным швам не зависит от прочности раствора f_m и близка к прочности кладочных элементов при растяжении f_{bt} . Но если растягивающие напряжения приложены под углом 45° к направлению горизонтальных растворных швов, то величина прочности каменной кладки на растяжение при раскалывании $f_{t,obs}$ становится близкой к прочности кладки $f_{t,obs}$ при угле 0° для образцов, изготовленных на прочных растворах. А вот при слабых растворах прочность кладки на растяжение параллельно горизонтальным растворным швам значительно выше величины $f_{t,obs}$ при угле 45° .

Прочность каменной кладки $f_{t,obs}$ при действии растягивающих напряжений, направленных перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов, то есть под углом 90° ниже прочности $f_{t,obs}$, определенной для углов 0° и 45° , и близка к прочности нормального сцепления раствора с кладочными элементами f_w,obs . При увеличении прочности раствора прочность кладки $f_{t,obs}$ при угле 90° возрастает. Полученные закономерности важны при разработке условий образования трещин в зоне стыка разнонагруженных стен.

Исследования показали, что на напряженно-деформированное состояние кладки в зонах стыка разнонагруженных стен оказывает

влияние и заводка крайних плит междуэтажного перекрытия в самонесущую стену [22]. Абсолютная величина усилий, перераспределяемых между стенами, уменьшается на величину нагрузки, передаваемой крайней плитой перекрытия на самонесущую стену. Хотя вертикальные усилия в стенах остаются практически такими же, как и при незаведенных стенах. Если обеспечено защемление крайних плит диска перекрытия в самонесущей стене при их заведении в последнюю, величина касательных напряжений в кладке, возникающих в зонах стыка стен по линии их пересечения, несколько уменьшается, поскольку часть сдвигающих усилий в стыке стен воспринимается плитами перекрытий. Однако в целом это не меняет общей картины напряженно-деформированного состояния кладки в зоне стыка. А если отсутствует надежное защемление плит в заведенную стену, напряженно-деформированное состояние в зоне стыка практически не отличается от состояния при незаведенных плитах.

Обеспечение трещиностойкости зон стыка разнонагруженных стен весьма важно с точки зрения оценки напряженно-деформированного состояния кладки для обеспечения ее долговечности. Ведь после образования трещин по шву между стенами более деформируемые стены догружаются, а менее деформируемые разгружаются. Поэтому вертикальные усилия в менее деформируемой стене необходимо определять на момент, например, через пять лет после окончания строительства без учета образования трещин, а в более деформируемых стенах – с учетом их образования. Оценка трещиностойкости зон стыка разнонагруженных стен важна и по ряду иных соображений, вытекающих из требований предельного состояния эксплуатационной пригодности.

Таким образом, необходима методика оценки трещиностойкости зон стыка разнонагруженных стен каменных зданий. Такая методика в ныне действующих нормах [1], основанных на требованиях Еврокода-6, отсутствует. Еврокод и, соответственно, наши нормы предлагают только определенные конструктивные мероприятия, направленные на повышение трещиностойкости зон стыка, такие, в частности, как устройство железобетонных поясов в уровне перекрытий по всем стенам (отмеченные выше), не приводя никаких условий для проверки по образованию трещин.

Приведенный выше анализ исследований показывает, что напряженно-деформированное состояние кладки в зоне стыка разнонагруженных стен очень сложно и многофакторно. Поэтому разработка близких к действительности условий и зависимостей по образованию трещин, основанных на оценке напряженного состояния кладки, учитывающих все многообразие факторов, и, вместе с тем, достаточно простых и пригодных для практики проектирования, на наш взгляд, весьма затруднительна. Даже учитывая возможности вычислительной техники. В этом случае вполне обоснован подход к решению вопросов по разработке условий трещинообразования, основанный на использовании косвенных признаков, учитывающих физику явления. И в сложившейся ситуации достойна внимания, на наш взгляд, методика расчета, которая была изложена в наших прежних нормах по каменным конструкциям [3, 4].

В нормах [3] было оговорено, что по образованию трещин следует рассчитывать смежные, работающие совместно конструкции, выполненные из материалов, имеющих различные деформационные характеристики, или конструкции при значительной разнице напряжений в них. А подробные рекомендации по методике расчета были приведены в пособии [4], разработанным в развитие норм. Еще С. А. Семеновым был предложен условный метод расчета по образованию наклонных трещин в зоне стыка разнодеформируемых стен. Он основан на том, что разность свободных деформаций смежных разнодеформируемых (разнонагруженных) стен не должна превышать некоторого допустимого значения. Такая методика и была реализована в пособии [4, п. 7.18–7.21]. При расчете условно принимается, что обе смежные стены, например поперечная несущая и продольная самонесущая, не связаны между собой. При этом определяется свободная деформация каждой из этих стен отдельно при действии расчетных длительных нагрузок. Далее определяется разность свободных деформаций данных стен, и величина разности не должна превышать предельного значения, оговоренного в нормах.

Такая же методика расчета трещиностойкости в зонах стыка стен сохранена и в ныне действующих нормах Российской Федерации по расчету и проектированию каменных и армокаменных кон-

струкций. Действующие в настоящее время в Российской Федерации нормы СП 15.13330.2020 [5] являются актуализированной редакцией прежних норм СНиП II-22-81*. Пересмотр и актуализация их проводились и ранее. В частности, были пересмотрены нормы СП 15.13330.2012 и более поздние. При этом, как правило, проводится анализ новейших исследований по тем или иным проблемам, как это было, например, перед разработкой норм СП 15.13330.2012 [23]. Это касается и последних норм Российской Федерации по каменным конструкциям [5], введенных в 2021 году. В связи с этим интерес представляют новейшие исследования, предшествовавшие последнему пересмотру норм Российской Федерации, затрагивающие интересующую нас проблему – трещиностойкость зон стыка разнонагруженных стен многоэтажных каменных зданий, в которых обособывались бы материалы, вошедшие в новые нормы [24, 25].

В работе [25] детально проанализированы результаты исследований, в которых рассматривались вопросы трещинообразования в зоне стыка разнонагруженных стен. В работе отмечается, что часто вблизи пересечений стен из каменной кладки возникают сквозные трещины. Приведены результаты натурных исследований многоэтажных каменных зданий, возведенных в последнее время, в частности, девятиэтажного жилого дома, возведенного в 2019 году. Причиной трещинообразования могут быть неодинаковые вертикальные деформации кладки смежных участков стен или неравномерные осадки фундаментов. В зонах стыка наклонные трещины на верхних этажах более нагруженных стен появляются после окончания возведения здания, когда в кладке развиваются только деформации ползучести и усадки, а силовые деформации уже выбраны. Поэтому здесь при расчетах наиболее подходит критерий прочности кладки, учитывающий предельную разность деформаций стен. Это является прямым указанием на то, какой критерий может быть положен в основу расчета по образованию трещин в зоне стыка разнонагруженных стен.

Для повышения трещиностойкости зон стыка в работе рекомендуется конструктивное армирование сетками. Арматурные сетки укладываются в горизонтальные швы несущих (сильнонагруженных) стен равномерно по их высоте. Такое армирование наиболее эффективно способствует восприятию главных растягивающих напряжений, препятствуя тем самым образованию и раскрытию наклонных трещин. Таким образом, во всех случаях должно выполняться конструктивное армирование разнонагруженных стен в зонах их стыка связевыми Г- или Т-образными сетками. Сетки следует заводить в стены таким образом, чтобы они перекрывали первый от угла шов между плитами перекрытий.

В работе [25] отмечается, что заводка плит перекрытий продольной стороной в самонесущую стену повышает трещиностойкость кладки в зоне стыка разнонагруженных стен нижележащих этажей. Если перекрытие выполнено из сборных железобетонных плит шириной до 2 м, укладку армопоясов в кладку несущих стен следует производить в уровне дисков перекрытий на предпоследнем этаже, а в случае необходимости и ниже в зависимости от напряженно-деформированного состояния кладки стен. Устройство армопоясов в уровне диска перекрытия не рекомендуется, поскольку он работает на сжатие в своей плоскости как распорка, препятствующая сближению самонесущих стен. Ремонт стен с наклонными деформационными трещинами целесообразно производить устройством внешнего армирования, направленного перпендикулярно направлению трещины.

Отмеченное в российских исследованиях влияние армирования зон стыка разнонагруженных стен на их трещиностойкость подтверждается и в ряде исследований зарубежных авторов, в частности, в работах [28–30]. Были проведены обширные исследования напряженно-деформированного состояния фрагментов каменной кладки при действии нормальных к горизонтальным швам и касательных напряжений и влияние на него армирования горизонтальных швов кладки. Армирование изменялось в пределах минимально необходимого по Еврокоду-6 процента армирования. Разрушение образцов происходило с образованием наклонных трещин. Армирование однозначно приводило к повышению трещиностойкости кладки, хотя эффективность армирования не была связана прямопропорциональной зависимостью с процентом армирования и в значительной степени зависит от соотношения нормальных и касательных напряжений. Такие закономерности характерны и для зон стыка разнонагруженных (разнодеформируемых) стен.

Отмеченные выше результаты исследований были использованы при актуализации и разработке ныне действующих норм Российской Федерации по каменным и армокаменным конструкциям [5]. Некоторые положения прежних норм [3, 4] были исключены. Однако методика расчета трещиностойкости зон стыка разнодеформируемых стен оставлена прежней и аналогичной методике, принятой в прежних нормах [3, 4]. И в новых нормах [5, п. 8.1] отмечается, что смежные каменные конструкции, в зоне стыка которых может возникнуть разность деформаций кладки вследствие их разной загруженности либо различных деформативных свойств материалов, должны рассчитываться по образованию и раскрытию трещин. При этом методика расчета приведена в Приложении Г норм [5]. Как отмечалось выше, такая методика основана на определении разности свободных вертикальных деформаций кладки от расчетных длительных нагрузок в зоне стыка поперечной и продольной (смежных) стен, условно не связанных между собой.

Для обеспечения трещиностойкости зон стыка таких стен разность свободных деформаций их должна удовлетворять условию $\delta_1 - \delta_2 \leq \delta_u$, где

δ_1 – абсолютная свободная деформация сжатия одной из стен;

δ_2 – абсолютная свободная деформация сжатия другой стены;

δ_u – предельно допустимая разность деформаций, принимаемая по таблице 13 Пособия [4]. В нормах России [5] это таблица Г. 1 Приложения Г.

Значение предельно допустимой разности деформаций принимается в зависимости от количества этажей и высоты стены. Следует отметить, что минимальное число этажей, при котором начинается проверка допустимой разности деформаций, в нормах [4] принято равным 5 (или при минимальной высоте стены 15 м. При этом допустимая разность деформаций составляет 7 мм. Величина ее растет с увеличением этажности и высоты стены. При числе этажей 12 и более (и высоте стены 36 м и более) допустимая разность деформаций составляет 15 мм и далее не увеличивается. Данная таблица составлена на основании опыта и расчета. Величина свободных деформаций δ определяется как сумма деформаций кладки на всех этажах здания от уровня верхнего обреза фундамента до верхней отметки стены по формулам (1), приведенным ниже:

$$\delta_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{1i} h_i}{E_{1i}} + \delta_{sh1}; \quad \delta_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{2i} h_i}{E_{2i}} + \delta_{sh2}; \quad (1)$$

где σ – напряжения в кладке каждой из смежных стен на i -м этаже (определяются как для отдельно стоящей стены и отдельно для каждого этажа по формуле сопромата как для центрально сжатого элемента, то есть $\sigma = N / F$, а F – площадь сечения (участка стены);

E – модуль деформации кладки на каждом этаже;

h – высота этажа;

δ_{sh} – абсолютные деформации усадки в пределах каждого этажа, определяемые умножением на высоту этажа относительной величины усадки материала кладки, принимаемой по п. 3.26 норм [3];

n – число этажей от уровня пола подвала до верхнего или рассматриваемого этажа.

Напряжения для каждого этажа определяются на уровне середины его высоты, при этом учитывается расчетное значение всех длительных нагрузок.

Модуль упругости кладки E в нормах [3] определяется по формуле $E = \alpha_1 R_u$,

где R_u – средний предел прочности кладки данного этажа, определяемый по формуле $R_u = kR$;

k – коэффициент, принимаемый по таблице 14;

R – расчетные сопротивления кладки, принимаемые по таблицам 1–9 с учетом коэффициентов, приведенных в примечаниях к этим таблицам;

α_1 – характеристика деформаций кладки, зависящая от материала кладки и учитывающая полные деформации кладки (без учета деформаций усадки). Величина ее принимается по таблице 14 пособия [4] в зависимости от вида кладочного изделия (кирпич керамический полусухого или пластического прессования, силикатный кирпич либо мелкоштучные керамические камни) и вида кладки (летней или зимней).

Следует отметить, что значение α_1 отличается от упругой характеристики кладки α , которая используется в нормах [3] для расчета модуля упругости кладки (начального модуля деформации) по фор-

муде $E_0 = \alpha Ru$ и принимается по таблице 15. Величина характеристики α_1 , учитывающей развитие деформаций ползучести кладки со временем, в нормах принимается практически в 2–3 раза меньше по сравнению с величиной α . Так, соотношение α и α_1 составляет соответственно: для керамического кирпича пластического прессования – 1000 и 450, для силикатного кирпича – 750 и 250 и для керамических камней – 1200 и 650. И это согласуется с указанием пункта 3.23 норм, что при определении полных относительных деформаций кладки по формуле (9) $\varepsilon = v \sigma / E_0$, значение коэффициента v , учитывающего влияние ползучести кладки, следует принимать согласно приведенных в п. 3.23 величин. И, в частности, его значение для кладки из кирпича пластического прессования составляет 1000/450: $v = 2,2$, из силикатного кирпича – 750/250: $v = 3,0$, из керамических камней – 1200/650: $v = 1,8$. Учитывая это, гораздо удобнее, на наш взгляд, свободные деформации δ определять с использованием коэффициента v , а не сниженной упругой характеристики кладки α_1 . Тогда они определяются по приведенной ниже формуле (2), которая равноценна формулам (1):

$$\delta_{1,2} = \sum_{k=1}^n (v \sigma h / E_0 + \delta_{sh}). \quad (2)$$

В нормах отмечается, что для уменьшения разности деформаций кладки в зоне стыка стен и повышения трещиностойкости ее и увеличения жесткости здания в целом следует продольные края плит перекрытий заводить в самонесущую стену на 8–10 см. Это частично перераспределит усилия на стены и улучшит совместную работу несущей и самонесущей стен. В этом случае полученная по приведенному выше расчету разность деформаций кладки может быть уменьшена в 1,5 раза, если свободная длина несущей стены (до пересечения ее с несущими стенами) составляет не более 7,5 м и может быть уменьшена в 1,25 раза, если свободная длина превышает 7,5 м.

Касаясь рекомендаций прежних норм по заводке крайних плит в самонесущие стены, необходимо отметить следующее. Проведенные ранее исследования показали положительный эффект такого мероприятия. Но это в основном в идеальных лабораторных условиях производства работ по возведению опытных фрагментов кладки. В реальных построечных условиях сложно обеспечить равномерность передачи нагрузки на три грани плиты перекрытия. В этом случае на плиты перекрытия могут передаваться нагрузки, не предусмотренные проектом, а реальная картина напряженно-деформированного состояния кладки в зоне стыка искажается и может привести к нежелательным эффектам. Об этом свидетельствуют и отдельные работы по обследованию существующих зданий. Учитывая данные обстоятельства, приведенные выше рекомендации по заводке крайних плит в самонесущие стены и их учет при проверке условий трещинообразования, на наш взгляд, подлежат обсуждению.

Изложенная выше методика оценки трещиностойкости зоны стыка разнодеформируемых стен успешно использовалась при проектировании, а также при обследовании и усилении многоэтажных каменных зданий, и будет полезной, а в отдельных случаях и необходимой, по крайней мере, в качестве дополнительного (к действующим ныне в Республике Беларусь нормам) инструмента для анализа напряженно-деформированного состояния каменных конструкций. При этом необходима определенная корректировка ее с учетом требований новых норм и результатов новейших исследований и, прежде всего, деформативных характеристик кладки.

Таким образом, определяется разность деформаций кладки в зоне стыка стен. При расчете свободных вертикальных деформаций кладки стен используется модуль упругости кладки E_0 (E – в новых нормах). Нормирование его в новых нормах [1] несколько иное, чем в прежних [3]. При отсутствии результатов испытаний кратковременный модуль упругости кладки определяется по формуле $E = f_k K_E$, где f_k – характеристическое значение прочности кладки на сжатие, а K_E – аналог упругой характеристики кладки из прежних норм, равным 1000 – для кладки на растворе прочностью на сжатие f_m не менее 5 МПа (за исключением кладки изделий из автоклавного ячеистого бетона), и 600 – для кладки с применением изделий из автоклавного ячеистого бетона, а также кладки из других видов изделий на растворе класса меньше М5.

При длительном действии нагрузки модуль упругости кладки определяется в соответствии с указаниями [1, п. 6.6.2.3] по формуле (6.8): $E_{lt} = E / (1 + \Phi_\infty)$, где Φ_∞ – предельное значение коэффициента ползучести каменной кладки (диапазон значений которого указан

в таблице 6.17), принимаемое равным отношению полных относительных деформаций ε_∞ к упругим относительным деформациям ε_{el} , то есть: $\Phi_\infty = \varepsilon_\infty / \varepsilon_{el}$, где $\varepsilon_{el} = \sigma / E$. Тогда с учетом обозначений, принятых в нормах [1], формула (3) для расчета свободных деформаций δ_1 и δ_2 , аналогичная формулам (1 и 2), имеет вид:

$$\delta_{1,2} = \sum_{k=1}^n (\Phi_\infty \sigma h / E + \delta_{sh}). \quad (3)$$

При определении вертикальных деформаций необходимо учитывать абсолютные деформации усадки δ_{sh} в пределах каждого этажа. В нашем случае они определяются умножением высоты этажа на величину относительной деформации усадки. Приведенная выше формула (3) рекомендуется для расчета свободных деформаций кладки стен при проверке трещиностойкости. Коэффициент Φ_∞ для учета ползучести и величина относительных деформаций усадки принимается по результатам испытаний, как это отмечено в п. 6.6.4.1.2 норм [1]. При отсутствии таковых можно использовать данные прежних норм [3, 4], принимая $\Phi_\infty = v$, а относительные деформации усадки – по указаниям п. 3.26 норм [3].

Таким образом, приведенная выше методика может использоваться для оценки трещиностойкости зоны стыка стен с разной деформативностью в качестве простейшего подручного и доступного для проектировщиков метода, ранее освоенного и апробированного. Следует отметить, что можно выполнить анализ напряженно-деформированного состояния зон сопряжения стен на основе расчета с использованием метода конечных элементов. При этом в качестве критерия образования трещин, кроме разности относительных деформаций кладки, могут быть приняты значения главных растягивающих напряжений или предельные значения углов перегиба каменной кладки.

В исследованиях и нормах отмечается, что приведенный выше расчет ограничивает возможность образования и ширину раскрытия трещин, но не исключает совсем вероятность их появления. Поэтому такой расчет должен дополняться мероприятиями конструктивного характера. Такие мероприятия по повышению трещиностойкости зоны стыка разнодеформируемых стен при разработке проектов возведения и усиления каменных конструкций приведены в исследованиях [26 и др.] и в нормативных документах [27]. Рекомендации новых, ныне действующих в Республике Беларусь норм проектирования [1], изложены выше. В контексте их требований определенный интерес представляют конструктивные требования прежних норм [3, 4] и новых норм России [5] по рассматриваемой проблеме.

В этих нормах отмечается, что для обеспечения совместной работы стен при проектировании должны быть предусмотрены определенные конструктивные мероприятия. В зданиях высотой более пяти этажей под перекрытиями необходимо выполнять армокаменные пояса по всем продольным и поперечным стенам. Пояса устраиваются, начиная с перекрытия над пятым этажом, через три этажа до предпоследнего. В наружных стенах рекомендуется устраивать не армокаменные пояса, а под перемычками по всем простенкам укладывать арматурные сетки. Под перекрытиями этажей, где не устраиваются пояса, нужно укладывать арматурные сетки с продольной и поперечной арматурой диаметром соответственно 8 мм и 4 мм и квадратной ячейкой 100 мм. Сетки необходимо заводить в несущие стены за грань крайней плиты перекрытия не менее чем на 500 мм.

Таким образом, сравнительный анализ отмеченных выше конструктивных мероприятий и предусмотренных в отечественных нормах показывает, что они во многом идентичны с превалированием в отечественных нормах предпочтения для поясов и обвязок. При этом перед разработкой конструктивных решений зоны стыка разнодеформируемых стен многоэтажных каменных зданий целесообразно хотя бы приближенным расчетом оценить ее трещиностойкость, в частности, с использованием описанной выше методики, учитывая то обстоятельство, что образование трещин в стыках таких стен – широко распространенное явление. Об этом свидетельствуют и исследования, и материалы нормативных документов [26, 27], где, в частности, напрямую говорится о феномене образования вертикальных и наклонных трещин сдвига (среза) в верхних этажах многоэтажных зданий с раскрытием до 5 мм в местах сопряжения разнонагруженных стен из однородных материалов или стен из разных материалов с разными деформативными свойствами при характеристике повреждений каменных конструкций, относящихся к III категории технического состояния.

Следует отметить, что поднятые в статье вопросы особенно актуальны для зданий повышенной этажности 8–12 этажей. В настоящее время здания с жесткой перевязкой стен в основном строятся высотой 5–7 этажей. Для таких зданий предполагается, что соблюдение конструктивных требований норм обеспечивают трещиностойкость зон сопряжений разнонагруженных стен. Однако при всем при этом в любом случае должна быть у проектировщика под рукой методика расчета, численной оценки трещиностойкости зон стыка, хотя бы приближенная и простейшая, но уже апробированная.

Заключение

1. В действующих отечественных нормах [1] нет методики оценки трещиностойкости зоны стыка разнодеформируемых стен многоэтажных каменных зданий.

2. Вместе с тем нормы [1] более жестко подходят к устройству поясов (или обвязок), требуя их применения при числе этажей более трёх и устраивая их на каждом этаже, включая последний. При этом не проводится предварительной оценки трещиностойкости зон стыков стен и обоснования необходимости указанных конструктивных решений по причине отсутствия методики расчета как таковой.

3. В иных нормах, как отмечалось выше, рекомендуется проводить расчет трещиностойкости зоны стыка разнодеформируемых стен (хотя бы и несколько условный), и только потом разрабатываются конструктивные мероприятия, степень сложности которых зависит от результатов расчета.

4. Рекомендуется использовать изложенную выше методику оценки трещиностойкости зоны стыка стен при проектировании многоэтажных зданий с соответствующей корректировкой ее. При ином подходе устройство железобетонных поясов (или обвязок) на каждом этаже, например четырехэтажного здания, где они обязательны в соответствии с нашими нормами, но по результатам исследований, трещиностойкость зон стыков у которого изначально обеспечена, может привести к необоснованным затратам. Это следует учитывать при проектировании многоэтажных каменных зданий.

5. Наличие в наших нормах отмеченной выше методики расчета, признанной в нормах Российской Федерации, будет в определенной степени способствовать гармонизации норм Союзного государства.

Список цитированных источников

- Каменные и армокаменные конструкции: СП 5.02.01-2021. – Введ. 01.04.2021. – Минск : Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2020. – 115 с.
- Каменные и армокаменные конструкции: ТКП 45-5.03-308-2017. – Введ. 10.07.2017. – Минск : Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2017. – 111 с.
- Каменные и армокаменные конструкции. Нормы проектирования: СНиП II-22-81. – Госстрой СССР. – М. : Стройиздат, 1983. – 40 с.
- Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций (к СНиП II-22-81) / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко Госстроя СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 152 с.
- Каменные и армокаменные конструкции: СП 15.13330.2020. – Введ. 01.07.2021. – М. : Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2020. – 124 с.
- Произвести исследования прочности кладки и натурные наблюдения за деформацией совместно работающих разнонагруженных стен экспериментальных жилых домов, обобщить опыт строительства зданий в БССР с анализом дефектов и аварийных случаев и разработать предложения для инструктивно-нормативных документов по проектированию и возведению зданий (для СНиП II-22-81 и СНиП III-17-78) : отчет о НИР / Белорус. политех. ин-т ; рук. И. И. Неверович; испол.: Г. И. Павлович, Ю. И. Путиков [и др.]. – Минск, 1985. – 160 с. – № ГР 01850002731. – Шифр: х/д 120/84.
- Неверович, И. И. Методика натурных исследований деформаций разнонагруженных стен многоэтажных каменных зданий / И. И. Неверович, Г. И. Ларченкова // Техника, технология, организация и экономика строительства: респуб. межведом. сб. – Минск : Вышэйшая школа, 1988. – Вып. 14.
- Ищук, М. К. Практические методы определения деформаций каменной кладки / М. К. Ищук // Исследования каменных и крупнопанельных конструкций и перспективы их развития : сб. научн. тр. / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – М., 1990. – С. 83–93.
- Ищук, М. К. Исследование совместной работы разнодеформируемых стен каменных зданий при вертикальном нагружении / М. К. Ищук // Исследование крупнопанельных и каменных конструкций : сб. научн. тр. / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – М., 1986. – С. 65–78.
- Ищук, М. К. Повышение трещиностойкости стен каменных зданий в местах их пересечений / М. К. Ищук, И. И. Неверович, Е. В. Шенкаренко // Жилищное строительство. – 1990. – № 8. – С. 13–14.
- Онищик, Л. И. Каменные конструкции / Л. И. Онищик. – М. : Госстройиздат, 1939. – 208 с.
- Донченко, О. М. К развитию теории трещиностойкости и сопротивления кладки при сжатии / О. М. Донченко, И. А. Дегтев // Известия ВУЗов. Серия: Строительство. – 2000. – № 10. – С. 16–20.
- Донченко, О. М. Особенности трещинообразования и исчерпания сопротивления кладки из искусственных камней при центральном сжатии / О. М. Донченко, Ж. И. Пашенко // Вестник Белгородского гос. технол. ун-та им. В. Г. Шухова. – 2014. – № 1. – С. 10–12.
- Деркач, В. Н. Исследование прочности при сжатии каменной кладки, выполненной из кладочных элементов I группы / В. Н. Деркач, А. В. Галалюк // Строительная наука и техника. – 2010. – № 6. – С. 73–77.
- Ищук, М. К. Роль прочности кирпича на изгиб при сжатии кладки / М. К. Ищук // Строительные материалы. – 2018. – № 8. – С. 63–65.
- Кабанцев, О. В. Дискретная модель каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния / О. В. Кабанцев // Вестник ТГАСУ. – 2015. – № 4 (51). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diskretnaya-model-kamennoy-kladki-v-usloviyah-dvuhosnogo-napryazhennogo-sostoyaniya> (дата обращения: 08.02.2025).
- Кабанцев, О. В. Влияние уровня нормального сцепления на процесс пластического деформирования каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния / О. В. Кабанцев, Э. С. Усеинов // Вестник ТГАСУ. – 2015. – № 6 (53). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyaniye-urovnya-normalnogo-stsepleniya-na-protsess-plasticheskogo-deformirovaniya-kamennoy-kladki-v-usloviyah-dvuhosnogo> (дата обращения: 08.02.2025).
- Кабанцев, О. В. Пластическое деформирование и разрушение каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния / О. В. Кабанцев // Вестник МГСУ. – 2016. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/plasticheskoe-deformirovaniye-i-razrusheniye-kamennoy-kladki-v-usloviyah-dvuhosnogo-napryazhennogo-sostoyaniya> (дата обращения: 08.02.2025).
- Деркач, В. Н. Анизотропия прочностных и деформационных характеристик при сжатии каменной кладки из керамзитобетонных кладочных элементов / В. Н. Деркач, А. В. Галалюк // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / РУП «Институт БелНИИС» ; редкол.: М. Ф. Марковский [и др.]. – Минск, 2013. – Вып. 5. – С. 68–77.
- Деркач, В. Н. Анизотропия деформационных свойств каменной кладки / В. Н. Деркач // Глобальная энергия. – 2011. – № 1 (117). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aniotropiya-deformatsionnyh-svoystv-kamennoy-kladki> (дата обращения: 08.02.2025).
- Деркач, В. Н. Анизотропия прочности на растяжение каменной кладки при раскалывании / В. Н. Деркач // Глобальная энергия. – 2012. – № 2-2 (147). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aniotropiya-prochnosti-na-rastyazhenie-kamennoy-kladki-pri-raskalyvani> (дата обращения: 08.02.2025).
- Ищук, М. К. Учет работы дисков перекрытий при расчете зданий методом конечных элементов / М. К. Ищук // Исследования по строительным конструкциям: сб. тр. / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М., 1984. – С. 132–137.
- Ищук, М. К. Проблемы норм по проектированию каменных конструкций / М. К. Ищук // Строительные материалы. – 2010. – № 4. – С. 15–17.
- Соловьев, Р. К. Причины трещин в местах сопряжения разнонагруженных кирпичных стен и способы их устранения / Р. К. Соловьев // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы IX научно-практической конференции, г. Санкт-Петербург, 11-12 октября 2018 г. / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; редкол.: А. В. Улыбин (гл. ред.) [и др.]. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 253–258.

25. Ищук, М. К. Трещиностойкость каменных стен / М. К. Ищук, Х. А. Айзятуллин // Вестник НИЦ. Строительство. – М., 2021. – № 31 (4). – С. 43–50.
 26. Деркач, В. Н. Каменные и армокаменные конструкции. Оценка технического состояния, ремонт и усиление / В. Н. Деркач. – Минск : СтройМедиаПроект, 2021. – 255 с.
 27. Обследование и усиление каменных и армокаменных конструкций: СП 1.04.03-2022. – Введ. 01.08.2022. – Минск : Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2022. – 83 с.
 28. Schubert, P. Mauerwerk. Risse vermeiden und instandsetzen / P. Schubert // Fraunhofer IRB Verlag: Stuttgart. – 2004. – S. 54–68.
 29. Jasiński, R. Badania zbrojonych ścian ceglanych ścinanych poziomo / R. Jasiński // Monografia pod redakcją Mirosława Brodniewicza i Jolanty Anny Prusiel: Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa, tom II, Konstrukcje Budowlane i Inżynierskie: Wydawnictwo Politechniki Białostockiej. – 2007. – S. 339–346.
 30. Jasinski, R. Badania zbrojonych ścian ceglanych ścinanych poziomo / R. Jasinski // Przegląd Budowlany. – № 9. – 2009. – S. 28–36.
- References**
1. Kamennye i armokamennye konstrukcii: SP 5.02.01-2021. – Vved. 01.04.2021. – Minsk : Minstrojarkitektury Respubliki Belarus', 2020. – 115 s.
 2. Kamennye i armokamennye konstrukcii: TKP 45-5.03-308-2017. – Vved. 10.07.2017. – Minsk : Minstrojarkitektury Respubliki Belarus', 2017. – 111 s.
 3. Kamennye i armokamennye konstrukcii. Normy proektirovaniya: SNiP II-22-81. – Gosstroj SSSR. – M. : Strojizdat, 1983. – 40 s.
 4. Posobie po proektirovaniyu kamennyh i armokamennyh konstrukcij (k SNiP II-22-81) / CNiISK im. V. A. Kucherenko Gosstroya SSSR. – M. : CИTP Gosstroya SSSR, 1988. – 152 s.
 5. Kamennye i armokamennye konstrukcii: SP 15.13330.2020. – Vved. 01.07.2021. – M. : Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii, 2020. – 124 s.
 6. Proizvesti issledovaniya prochnosti kladki i naturnye nablyudeniya za deformatsiej sovmestno rabotayushchih raznograduzhennyh sten eksperimental'nyh zhilyh domov, obobshchit' opyt stroitel'stva zdaniy v BSSR s analizom defektov i avarijnyh sluchaev i razrabotat' predlozheniya dlya instruktivno-normativnyh dokumentov po proektirovaniyu i vozvedeniyu zdaniy (dlya SNiP II-22-81 i SNiP III-17-78) : otchet o NIR / Belorus. polit. in-t ; ruk. I. I. Neverovich; ispol.: G. I. Pavlovich, YU. I. Putikov [i dr.]. – Minsk, 1985. – 160 s. – № GR 01850002731. – Shifr: h/d 120/84.
 7. Neverovich, I. I. Metodika naturnykh issledovaniy deformatsij raznograduzhennyh sten mnogootazhnykh kamennyh zdaniy / I. I. Neverovich, G. I. Larchenkova // Tekhnika, tekhnologiya, organizatsiya i ekonomika stroitel'stva: respub. mezhvedom. sb. – Minsk : Vyshejschaya shkola, 1988. – Vyp. 14.
 8. Ishchuk, M. K. Prakticheskie metody opredeleniya deformatsij kamennoy kladki / M. K. Ishchuk // Issledovaniya kamennyh i krupnopanel'nykh konstrukcij i perspektivy ih razvitiya : sb. nauchn. tr. / CNiISK im. V. A. Kucherenko. – M., 1990. – S. 83–93.
 9. Ishchuk, M. K. Issledovanie sovmestnoj raboty raznodeformiruemyyh sten kamennyh zdaniy pri vertikal'nom zagruzhenii / M. K. Ishchuk // Issledovanie krupnopanel'nykh i kamennyh konstrukcij : sb. nauchn. tr. / CNiISK im. V. A. Kucherenko. – M., 1986. – S. 65–78.
 10. Ishchuk, M. K. Povyshenie treshinostojkosti sten kamennyh zdaniy v mestah ih peresechenij / M. K. Ishchuk, I. I. Neverovich, E. V. SHenkarenko // Zhilishchnoe stroitel'stvo. – 1990. – № 8. – S. 13–14.
 11. Onishchik, L. I. Kamennye konstrukcii / L. I. Onishchik. – M. : Gosstrojizdat, 1939. – 208 s.
 12. Donchenko, O. M. K razvitiyu teorii treshchinostojkosti i soprotivleniya kladki pri szhatii / O. M. Donchenko, I. A. Degtev // Izvestiya VUZov. Seriya: Stroitel'stvo. – 2000. – № 10. – S. 16–20.
 13. Donchenko, O. M. Osobennosti treshchinooobrazovaniya i ischerpaniya soprotivleniya kladki iz iskusstvennykh kamnej pri central'nom szhatii / O. M. Donchenko, ZH. I. Pashchenko // Vestnik Belgorodskogo gos. tekhnol. un-ta im. V. G. SHuhova. – 2014. – № 1. – S. 10–12.
 14. Derkach, V. N. Issledovanie prochnosti pri szhatii kamennoy kladki, vypolnennoj iz kladochnykh elementov I grupy / V. N. Derkach, A. V. Galalyuk // Stroitel'naya nauka i tekhnika. – 2010. – № 6. – S. 73–77.
 15. Ishchuk, M. K. Rol' prochnosti kirpicha na izgib pri szhatii kladki / M. K. Ishchuk // Stroitel'nye materialy. – 2018. – № 8. – S. 63–65.
 16. Kabancev, O. V. Diskretnaya model' kamennoy kladki v usloviyah dvuhosnogo napryazhennogo sostoyaniya / O. V. Kabancev // Vestnik TGASU. – 2015. – № 4 (51). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diskretnaya-model-kamennoy-kladki-v-usloviyah-dvuhosnogo-napryazhennogo-sostoyaniya> (data obrashcheniya: 08.02.2025).
 17. Kabancev, O. V. Vliyanie urovnya normal'nogo scelepeniya na process plasticheskogo deformirovaniya kamennoy kladki v usloviyah dvuhosnogo napryazhennogo sostoyaniya / O. V. Kabancev, E. S. Useinov // Vestnik TGASU. – 2015. – № 6 (53). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-urovnya-normalnogo-stsepeniya-na-protsess-plasticheskogo-deformirovaniya-kamennoy-kladki-v-usloviyah-dvuhosnogo> (data obrashcheniya: 08.02.2025).
 18. Kabancev, O. V. Plasticheskoe deformirovanie i razrushenie kamennoy kladki v usloviyah dvuhosnogo napryazhennogo sostoyaniya / O. V. Kabancev // Vestnik MGSU. – 2016. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/plasticheskoe-deformirovanie-i-razrushenie-kamennoy-kladki-v-usloviyah-dvuhosnogo-napryazhennogo-sostoyaniya> (data obrashcheniya: 08.02.2025).
 19. Derkach, V. N. Anizotropiya prochnostnyh i deformatsionnykh harakteristik pri szhatii kamennoy kladki iz keramzitobetonnnykh kladochnykh elementov / V. N. Derkach, A. V. Galalyuk // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : sb. nauch. tr. / RUP «Institut BelNIISS» ; redkol.: M. F. Markovskij [i dr.]. – Minsk, 2013. – Vyp. 5. – S. 68–77.
 20. Derkach, V. N. Anizotropiya deformatsionnykh svoystv kamennoy kladki / V. N. Derkach // Global'naya energiya. – 2011. – № 1 (117). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/anizotropiya-deformatsionnykh-svoystv-kamennoy-kladki> (data obrashcheniya: 08.02.2025).
 21. Derkach, V. N. Anizotropiya prochnosti na rastyazhenie kamennoy kladki pri raskalyvanii / V. N. Derkach // Global'naya energiya. – 2012. – № 2-2 (147). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/anizotropiya-prochnosti-na-rastyazhenie-kamennoy-kladki-pri-raskalyvanii> (data obrashcheniya: 08.02.2025).
 22. Ishchuk, M. K. Uchet raboty diskov perekrytii pri raschete zdaniy metodom konechnykh elementov / M. K. Ishchuk // Issledovaniya po stroitel'nym konstruktsiyam: sb. tr. / CNiISK im. Kucherenko. – M., 1984. – S. 132–137.
 23. Ishchuk, M. K. Problemy norm po proektirovaniyu kamennyh konstrukcij / M. K. Ishchuk // Stroitel'nye materialy. – 2010. – № 4. – S. 15–17.
 24. Solov'ev, R. K. Prichiny treshchin v mestah sopryazheniya raznograduzhennykh kirpichnykh sten i sposoby ih ustraneniya / R. K. Solov'ev // Obsledovanie zdaniy i sooruzhenij: problemy i puti ih resheniya: materialy IX nauchno-prakticheskoy konferencii, g. Sankt-Peterburg, 11-12 oktyabrya 2018 g. / Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet Petra Velikogo; redkol.: A. V. Ulybin (gl. red.) [i dr.]. – Sankt-Peterburg, 2018. – S. 253–258.
 25. Ishchuk, M. K. Treshchinostojkost' kamennyh sten / M. K. Ishchuk, H. A. Ajzyatullin // Vestnik NIC. Stroitel'stvo. – M., 2021. – № 31 (4). – S. 43–50.
 26. Derkach, V. N. Kamennye i armokamennye konstrukcii. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya, remont i usilenie / V. N. Derkach. – Minsk : StrojMediaProekt, 2021. – 255 s.
 27. Obsledovanie i usilenie kamennyh i armokamennyh konstrukcij: SP 1.04.03-2022. – Vved. 01.08.2022. – Minsk : Minstrojarkitektury Respubliki Belarus', 2022. – 83 s.
 28. Schubert, P. Mauerwerk. Risse vermeiden und instandsetzen / R. Schubert // Fraunhofer IRB Verlag: Stuttgart. – 2004. – S. 54–68.
 29. Jasiński, R. Badania zbrojonych ścian ceglanych ścinanych poziomo / R. Jasiński // Monografia pod redakcją Mirosława Brodniewicza i Jolanty Anny Prusiel: Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa, tom II, Konstrukcje Budowlane i Inżynierskie: Wydawnictwo Politechniki Białostockiej. – 2007. – S. 339–346.
 30. Jasinski, R. Badania zbrojonych ścian ceglanych ścinanych poziomo / R. Jasinski // Przegląd Budowlany. – № 9. – 2009. – S. 28–36.

Материал поступил 27.02.2025, одобрен 11.04.2025, принят к публикации 11.04.2025

УДК 72.025.4(476.7)

КОМПЛЕКСНЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЯ ПОЧТЫ В Г. ЛИДЕ ГРОДНЕНСКОЙ ОБЛАСТИ КАК ОБЪЕКТА ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**Э. А. Тур¹, Е. Ю. Русак²**¹ К. т. н., доцент кафедры инженерной экологии и химии УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: tur.elina@mail.ru² Студентка факультета инженерных систем и экологии УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь**Реферат**

В последние годы в Республике Беларусь проведена большая работа по реставрации и восстановлению сотен объектов историко-культурного наследия с целью поддержания их надлежащего технического состояния. В соответствии с Кодексом Республики Беларусь о культуре, Национальной стратегией устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь, сохранение и приумножение историко-культурного наследия страны является важным фактором национальной идентичности и белорусской государственности. Важнейшей частью проекта по реконструкции и реставрации объектов, включенных в Перечень недвижимых объектов историко-культурного наследия, является раздел «Комплексные научные изыскания». Авторами были проведены физико-химические исследования строительных растворов и окрасочных составов, отобранных с фасадов здания почты по адресу г. Лида, ул. Мицкевича, 8. Целью данных исследований являлось определение аутентичных строительных растворов и аутентичных окрасочных составов. Для анализа представленных образцов применялись микрохимический, гранулометрический и петрографический методы исследований. Объект был обследован должным образом, определены аутентичные строительные растворы и окрасочные составы. Установлено, что соответствующие штукатурные аутентичные известково-песчаные практически не отличаются соотношением компонентов и составом. Аутентичное цветовое решение фасадов здания действительно кардинально отличается от последнего современного ремонта. Первоначально основная плоскость стены всех фасадов здания была окрашена составом желтовато-бежевого цвета на минеральной основе. Многие десятилетия из-за отсутствия средств реставрация зданий в большинстве случаев сводилась лишь к легкому косметическому ремонту. Неоднократные ремонты привели к образованию многослойного «пирога» из цементной, известковой штукатурки и различных по качеству других отделочных материалов. Обязательное проведение химико-физических исследований помогает принять правильные проектные решения по применению отделочных материалов на недвижимых объектах историко-культурного наследия нашей страны.

Ключевые слова: штукатурные растворы, окрасочные составы, цветовое решение.**COMPREHENSIVE SCIENTIFIC RESEARCH OF THE POST OFFICE BUILDING IN LIDA, GRODNO REGION, AS AN OBJECT OF HISTORICAL AND CULTURAL HERITAGE OF THE REPUBLIC OF BELARUS****E. A. Tur, E. U. Rusak****Abstract**

In recent years, the Republic of Belarus has carried out extensive work on the restoration and restoration of hundreds of historical and cultural heritage sites in order to maintain their proper technical condition. In accordance with the Code of the Republic of Belarus on culture, the national strategy of sustainable social and economic development of the Republic of Belarus, the preservation and increase of the country's historical and cultural heritage is an important factor in national identity and Belarusian statehood. The most important part of the project for the reconstruction and restoration of objects included in the List of immovable objects of historical and Cultural heritage is the section "Comprehensive scientific research". The authors conducted physico-chemical studies of building mortars and paint compositions selected from the facades of the post office building in Lida, Mickiewicz St., 8. The purpose of these studies was to identify authentic building mortars and authentic paint compositions. Microchemical, granulometric and petrographic research methods were used to analyze the presented samples. The facility was properly inspected, authentic building solutions and paint compositions were determined. It has been established that the corresponding authentic lime-sand plasters practically do not differ in the ratio of components and composition. The authentic color scheme of the building's facades is really radically different from the latest modern renovation. Initially, the main wall plane of all the facades of the building was painted with a yellowish-beige mineral-based compound. For many decades, due to the lack of funds, the restoration of buildings in most cases was reduced only to easy cosmetic repairs. Repeated repairs led to the formation of a multilayer "pie" from cement, lime plaster and different in quality of other finishing materials. The obligatory conduct of chemical and physical research helps to make the right design decisions on the use of finishing materials at the real estate facilities of the historical and cultural heritage of our country.

Keywords: plaster solutions, coloring compositions, color solution.**Введение**

Ценность объекта культуры определяет его социокультурная значимость. В различные времена объекты природы и культурного наследия могут обладать различной культурной и экономической ценностью. Наличие или отсутствие такой ценности у объекта является основанием для его охраны и сохранения или, наоборот, пренебрежения им или его уничтожения. Учет историко-культурного наследия – это система мероприятий, направленная на изучение исторического и культурного наследия, обнаружение наиболее отличительных объектов и свидетельств исторического и духовного развития народа Беларуси и их документальную научную регистрацию, научную и художественную оценку обнаруженных и предложенных к приданию статуса ценности материальных объектов и нематериальных проявлений че-

ловеческого творчества, придание статуса ценности наиболее отличительным объектам и свидетельствам исторического и духовного развития народа Беларуси и их документальную научную регистрацию, составление перечня материальных объектов и нематериальных проявлений человеческого творчества, собственные достоинства которых недостаточны для придания им статуса ценности.

Историко-культурной ценностью признаются объекты, обладающие совокупностью двух признаков: культурной значимостью и юридическим признанием в таком качестве посредством включения в охранный реестр – Государственный список историко-культурных ценностей Республики Беларусь [1]. Компоненты, включенные в термин «историко-культурные ценности», входят в понятие «историко-культурное наследие».

В соответствии с Кодексом Республики Беларусь о культуре, Национальной стратегией устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года, сохранение и приумножение историко-культурного наследия страны является важным фактором национальной идентичности и белорусской государственности, играет значительную роль в формировании гражданской ответственности и патриотизма личности [1, 2].

В последние годы в Республике Беларусь проведена большая работа по реставрации и восстановлению сотен объектов историко-культурного наследия с целью поддержания их надлежащего технического состояния. На государственном уровне эти задачи решаются в рамках ряда государственных программ и локальных инвестиционных проектов. Кроме того, мероприятия по охране историко-культурного наследия, в том числе ремонтно-реставрационные работы на историко-культурных ценностях, финансируются за счет средств фонда Президента Республики Беларусь по поддержке культуры.

Результаты и их обсуждение

Одним из объектов историко-культурного наследия является здание почты по адресу г. Лида, ул. Мицкевича, 8. Здание почты в Лиде – памятник архитектуры первой половины XX века. После окончания польско-советской войны и заключения Рижского мирного договора между Польшей и Советской Россией в 1921 г. земли Западной Белоруссии, в том числе и Лидская земля, отошли к Польше. Уже в начале 20-х годов польские власти интенсивно восстанавливали разрушенное войной почтовое хозяйство. Почта размещалась в старом дореволюционном деревянном здании, в котором было тесно и почте, и телеграфу. Поэтому власти Виленского почтового округа и местные городские власти совместными усилиями в середине 30-х годов начали строить в Лиде новое здание почты по английскому проекту. В 1938 г. почта города переселилась в новое благоустроенное здание. На рисунке 1 представлено здание почты в настоящее время (после ремонтно-реставрационных работ).

Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 3 июня 2016 г. № 437 утвержден перечень историко-культурных ценностей категорий «0», «1» и «2», находящихся в собственности административно-территориальных единиц Республики Беларусь и в собственности религиозных организаций [1, 2].

Данное здание почты является недвижимым объектом историко-культурного наследия 2 категории (историко-культурная ценность, имеющая национальное значение) и включено в охранный реестр – Государственный список историко-культурных ценностей Республики Беларусь [1, 2].

3 февраля 2017 года вступил в силу Кодекс Республики Беларусь о культуре, которым регулируются вопросы охраны историко-культурного и археологического наследия Республики Беларусь [2]. Кодексом установлена процедура, после выполнения которой разрешается производить работы на историко-культурной ценности. В составе научно-проектной документации разрабатывается раздел «Комплексные научные изыскания», который состоит из фотофиксации, обмеров, исторических, археологических и химико-физических исследований. Обязательное проведение химико-физических исследований помогает принять правильные проектные решения по применению отделочных материалов на историко-культурных ценностях и, соответственно, большей долговечности проведенных работ.

Авторами были проведены физико-химические исследования строительных растворов и окрасочных составов, отобранных с фасадов здания почты по адресу г. Лида, ул. Мицкевича, 8. Целью данных исследований являлось определение аутентичных строительных растворов и аутентичных окрасочных составов. Для анализа представленных образцов применялись микрохимический, гранулометрический и петрографический методы исследований [3, 4, 5, 6, 7, 8]. Гранулометрический состав заполнителей определялся путем просеивания через сита с размером ячеек 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, 0,063 мм согласно рекомендациям ОАО «Белреставрация» Министерства культуры Республики Беларусь (для исследования аутентичных строительных растворов недвижимых объектов историко-культурного наследия категории «0», «1» и «2»). Цвета лакокрасочных покрытий и отделочных составов указаны по каталогу «3D-System plus» компании CAPAROL, применяемым в настоящее время архитекторами-реставраторами в Республике Беларусь. Цвет покрытия определялся путём визуального сравнения образца с эталонной типографской выкраской. Для устранения метаметрии определение цвета проводилось при рассеянном естественном освещении [9, 10, 11].

На рисунке 2 (а, б, в, г) представлены места отбора образцов на фасадах здания почты.



Рисунок 1 – Здание почты по адресу г. Лида, Мицкевича, 8

Фасад 1-8 (Схема отбора образцов)

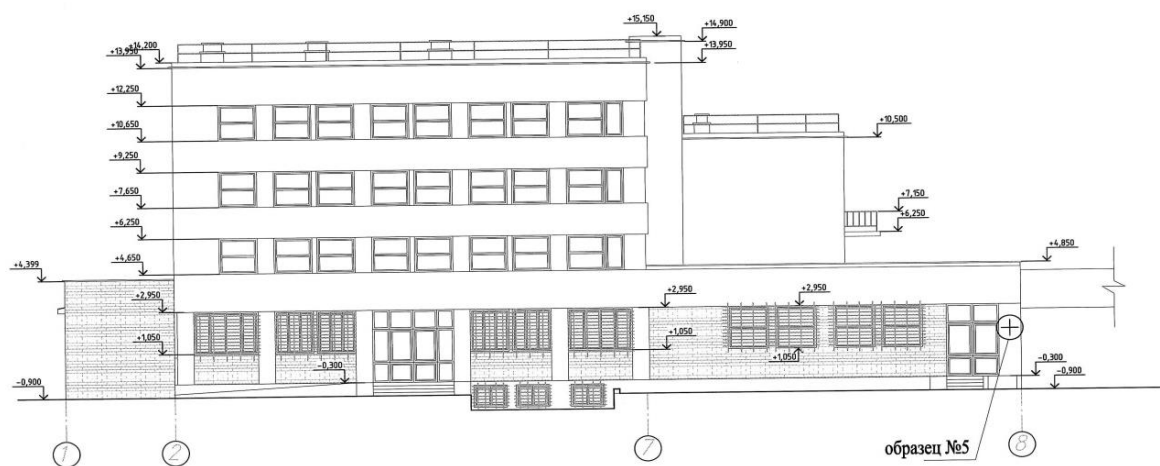


Рисунок 2 (а) – Места отбора образцов

Фасад 8-1 (Схема отбора образцов)

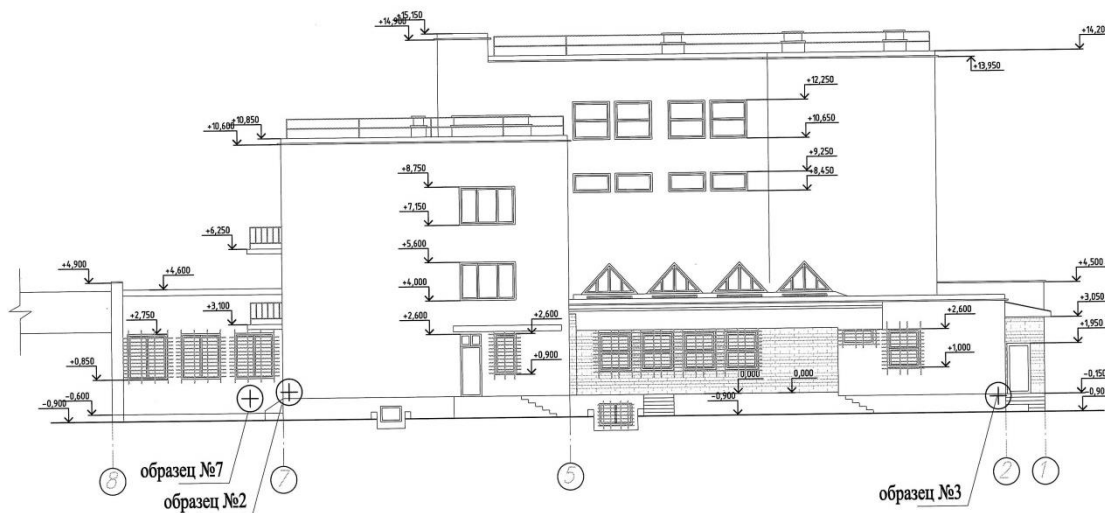


Рисунок 2 (б) – Места отбора образцов

Фасад А-Ж (Схема отбора образцов)

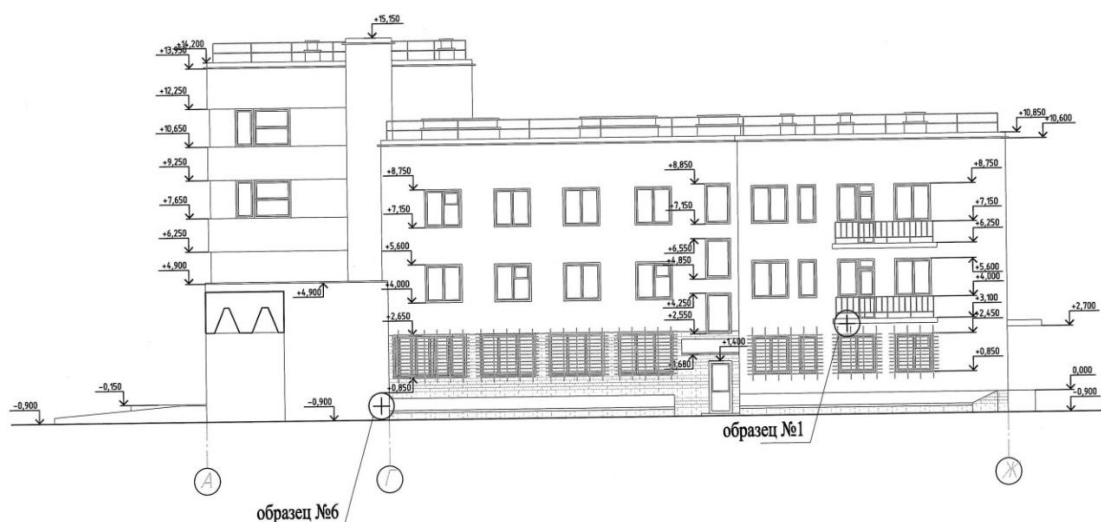


Рисунок 2 (в) – Места отбора образцов

Фасад Ж-А (Схема отбора образцов)



Рисунок 2 (г) – Места отбора образцов



Рисунок 3.1 – Фотофиксация мест отбора образцов



Рисунки 3.2 – 3.4 – Фотофиксация мест отбора образцов



Рисунки 3.5 – 3.7 – Фотофиксация мест отбора образцов

В результате проведенных исследований были выявлены основные аутентичные штукатурные растворы и окрасочные составы. Основные аутентичные штукатурные растворы представлены в таблице 1.

В результате проведенных исследований было установлено, что соответствующие штукатурные аутентичные известково-песчаные (шесть из семи исследованных) и современные известково-цементно-песчаные растворы практически не отличаются соотношением компонентов и составом. Соотношение известь:песок в основном составляет 1:3, штукатурные растворы имеют желтовато-серый цвет. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции в количестве 31–42 % от массы заполнителя. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном кварцевый песок. Во всех исследованных аутентичных растворах выявлено присутствие отдельных включений извести размером 1–2 мм. Аутентичный штукатурный раствор образца № 4, отобранного с основной плоскости стены 1-го этажа бокового фасада Ж-А (между осями Д-Б), кардинально отличается от остальных шести образцов как соотношением известь:песок, так и гранулометрическим составом заполнителя. Раствор имеет светло-серый, цвет количественное соотношение известь:песок = 1:2,5 – 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции. Особенности раствора: содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 22,0 % от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 64,0 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 10,0 %. Содержание фракции с размером частиц 1–2 мм составило 3,0 %, фракции с размером частиц более 2 мм составило 1,0 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном кварцевый песок. Кварцевый песок, использованный для приготовления данного штукатурного раствора, отличается от всех песков других растворов исследованного объекта (имеет не желтовато-серый, а белый цвет, а также большое количество мелкой фракции – около 64,0 %). Вероятно, он был привезен из другого карьера для проведения строительных работ.

Важным моментом в исследованиях являлось определение аутентичного цветового решения фасадов здания. Опыт показывает, что очень часто аутентичное цветовое решение может кардинально отличаться от последних ремонтов [12, 13, 14]. Зачастую принимаемые ранее решения по ремонтно-реставрационным работам не являлись комплексными, не обеспечивали сохранение первоначаль-

ного архитектурного замысла оригинала, не сохраняли первоначальный внешний вид фасадов зданий.

В результате проведенных исследований определено, что аутентичное цветовое решение фасадов здания действительно кардинально отличается от последнего современного ремонта.

Установить, каким составом первоначально была окрашена поверхность участка под козырьком на фасаде А-Ж не представилось возможным. Состав не сохранился, вероятно, был удален при ремонте. Но, так как на остальных образцах четко прослеживается совершенно идентичный цвет первоначального окрасочного состава, можно предположить, что участок под козырьком также первоначально был окрашен составом желтовато-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Ginster 115». Первоначально основная плоскость стены 1-го этажа (угол над цоколем) фасада 8–1 (у оси 7) была окрашена составом желтовато-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Ginster 115». Первоначально основная плоскость стены 1-го этажа (угол над цоколем) фасада 8–1 (у оси 2) была окрашена составом желтовато-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Ginster 115». Установить, каким составом первоначально была окрашена основная плоскость стены 1-го этажа фасада Ж-А (между осями Д-Б) не представилось возможным. Состав не сохранился, вероятно, был удален при ремонте. Но, так как на остальных образцах четко прослеживается совершенно идентичный цвет первоначального окрасочного состава, можно предположить, что данная стена также первоначально была окрашена составом желтовато-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Ginster 115». Первоначально основная плоскость стены 1-го этажа фасада 1–8 (у оси 8) была окрашена составом желтовато-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Ginster 115». Первоначально основная плоскость стены 1-го этажа фасада А-Ж (на углу у оси В) была окрашена составом желтовато-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Ginster 115». Первоначально основная плоскость стены 1-го этажа фасада 8–1 (под окном между осями 8–7) была окрашена составом желтовато-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Ginster 115» по каталогу «3D-System plus» компании CAPAROL.

Здание почты неоднократно штукатурилось и перекрашивалось составами на минеральной основе. Окрасочные работы в раннее время производились составами на минеральной основе, а в позднее время – составами на основе полимерного пленкообразующего. Нижележащие слои на представленных образцах не удалялись должным образом. Первоначально здание было оштукатурено известково-песчаными растворами и окрашено минеральными составами.

Таблица 1 – Основные аутентичные штукатурные растворы

Наименование образца	Результаты исследований
Образец № 1 – Участок под козырьком на фасаде А-Ж	• Известково-песчаный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции. Особенности раствора: содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 31,0 % от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 42,0 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 17,0 %. Содержание фракции с размером частиц 1–2 мм составило 6,5 %, фракции с размером частиц более 2 мм составило 3,5 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном кварцевый песок. Отмечены отдельные включения извести размером 1–2 мм. Состав рассыпается при малейшей нагрузке, отсутствует связь между структурными элементами раствора. pH водной вытяжки около 9,07.
Образец № 2 – Основная плоскость стены 1-го этажа (угол над цоколем) фасада 8–1 (у оси 7)	• Известково-песчаный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции. Особенности раствора: содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 31,0 % от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 42,0 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 17,0 %. Содержание фракции с размером частиц 1–2 мм составило 6,5 %, фракции с размером частиц более 2 мм составило 3,5 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном кварцевый песок. Отмечены отдельные включения извести размером 1–2 мм. Состав рассыпается при малейшей нагрузке, отсутствует связь между структурными элементами раствора. pH водной вытяжки около 9,07.
Образец № 3 – Основная плоскость стены 1-го этажа (угол над цоколем) фасада 8–1 (у оси 2)	• Известково-песчаный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции. Особенности раствора: содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 31,0 % от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 42,0 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 17,0 %. Содержание фракции с размером частиц 1–2 мм составило 6,5 %, фракции с размером частиц более 2 мм составило 3,5 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. Отмечены отдельные включения извести размером 1–2 мм. Состав рассыпается при малейшей нагрузке, отсутствует связь между структурными элементами раствора. pH водной вытяжки около 9,07.
Образец № 4 – Основная плоскость стены 1-го этажа фасада Ж-А (между осями Д-Б)	• Известково-песчаный раствор светло-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:2,5 – 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции. Особенности раствора: содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 22,0 % от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 64,0 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 10,0 %. Содержание фракции с размером частиц 1–2 мм составило 3,0 %, фракции с размером частиц более 2 мм составило 1,0 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном кварцевый песок. Отмечены отдельные включения извести размером 1–2 мм. pH водной вытяжки около 8,96. Примечание: песок, использованный для приготовления данного раствора, отличается от всех песков, использованных для приготовления других растворов исследованного объекта (имеет не желтовато-серый, а белый цвет, и большое количество мелкой фракции – 64,0 %). Вероятно, он был привезен из другого карьера.
Образец № 5 – Основная плоскость стены 1-го этажа фасада 1–8 (у оси 8)	• Известково-песчаный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции. Особенности раствора: содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 31,0 % от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 42,0 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 17,0 %. Содержание фракции с размером частиц 1–2 мм составило 6,5 %, фракции с размером частиц более 2 мм составило 3,5 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. Отмечены отдельные включения извести размером 1–2 мм. Состав рассыпается при малейшей нагрузке, отсутствует связь между структурными элементами раствора. pH водной вытяжки около 9,07.
Образец № 6 – Основная плоскость стены 1-го этажа фасада А-Ж (на углу у оси В)	• Известково-песчаный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции. Особенности раствора: содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 31,0 % от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 42,0 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 17,0 %. Содержание фракции с размером частиц 1–2 мм составило 6,5 %, фракции с размером частиц более 2 мм составило 3,5 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном кварцевый песок. Отмечены отдельные включения извести размером 1–2 мм. Состав рассыпается при малейшей нагрузке, отсутствует связь между структурными элементами раствора. pH водной вытяжки около 9,07.
Образец № 7 – Основная плоскость стены 1-го этажа фасада 8–1 (под окном между осями 8-7)	• Известково-песчаный раствор желтовато-серого цвета состава с количественным соотношением компонентов 1:3. В качестве заполнителя использовался разнозернистый песок преимущественно мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции. Особенности раствора: содержание фракции с размером зерна 0,5–0,25 мм составило около 31,0 % от массы заполнителя, фракции с размером зерна 0,25–0,125 мм – около 42,0 %, фракции с размером зерна 1,0–0,5 мм – около 17,0 %. Содержание фракции с размером частиц 1–2 мм составило 6,5 %, фракции с размером частиц более 2 мм составило 3,5 %. Минеральный состав заполнителя полевошпатово-кварцевый, в основном кварцевый песок. Отмечены отдельные включения извести размером 1–2 мм. Состав рассыпается при малейшей нагрузке, отсутствует связь между структурными элементами раствора. pH водной вытяжки около 9,07.

При проведении ремонтных работ особое внимание следует уделить ремонту кровли и водосточных систем. У некоторых исследованных современных известково-цементно-песчаных растворов, которые также были исследованы, наблюдалось достаточно высокое значение pH (около 10,51) водной вытяжки раствора. Это свидетельствует о том, что протекает гидролиз составляющих цементного камня вследствие присутствия влаги. Так как повышенное значение

pH имеет место у самых поздних составов, находящихся ближе всего к наружному лакокрасочному покрытию, не имеет место движение влаги по капиллярам (по стенам здания) из почвы, связанное с недостаточной гидроизоляцией фундаментов. В данном случае влага (атмосферные осадки) попадает в раствор через разрушенное финишное лакокрасочное покрытие на полимерной основе. Особенно это заметно на углах здания. Практика показывает, что углы здания

подвергаются разрушению гораздо чаще, чем основная плоскость стены фасада, вследствие неправильной работы водостоков, неправильного устройства кровли, а также износу или поломке водосточных систем (т. е. дождевая вода практически стекает по наружной стене). Наружная стена постоянно влажная, осенью и весной при достаточно низких плюсовых температурах в течение светового дня не высыхает. Из-за постоянного присутствия влаги протекает процесс гидролиза, что ведет к повышению pH среды. Деструкции подвергается также и окрасочный состав [9, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. На фотографиях мест отбора образцов (фотофиксация) хорошо заметны места на наружных стенах, по которым стекает вода, т. е. которые постоянно влажные после дождя.

Кроме того, при невыполнении рекомендаций по ремонту кровли и водостоков, на наружных стенах из-за постоянной повышенной влажности возможно протекание биологической коррозии, т. е. образование водорослей и мхов на поверхности.

Заключение

В результате проведенных исследований было установлено, что соответствующие штукатурные аутентичные известково-песчаные (шесть из семи исследованных) и современные известково-цементно-песчаные растворы практически не отличаются соотношением компонентов и составом. Соотношение известь:песок у аутентичных штукатурных растворов в основном составляет 1:3, растворы имеют желтовато-серый цвет. В качестве заполнителя использовался разнотерный песок преимущественно мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции в количестве 31–42 % от массы заполнителя. Исключением является аутентичный штукатурный раствор образца № 4, отобранного с основной плоскости стены 1-го этажа бокового фасада Ж-А. Раствор имеет светло-серый цвет, количественное соотношение известь:песок = 1:2,5 – 1:3. В качестве заполнителя использовался разнотерный песок преимущественно мелкой (размер зерна 0,25–0,125 мм) фракции – около 64,0 % от массы заполнителя. Кварцевый песок, использованный для приготовления данного штукатурного раствора, отличается от всех песков других растворов исследованного объекта (имеет не желтовато-серый, а белый цвет, а также большое количество мелкой фракции – около 64,0 %). Вероятно, он был привезен из другого карьера для проведения строительных работ.

В результате проведенных исследований определено, что аутентичное цветовое решение фасадов здания действительно кардинально отличается от последнего современного ремонта. Первоначально основная плоскость стены всех фасадов здания была окрашена составом желтовато-бежевого цвета на минеральной основе. Цвет близок к образцу «Ginster 115» по каталогу «3D-System plus».

Многие десятилетия из-за отсутствия средств реставрация зданий в большинстве случаев сводилась лишь к легкому косметическому ремонту. Неоднократные ремонты привели к образованию многослойного «пирога» из цементной, известковой штукатурки и различных по качеству других отделочных материалов. Во времена Советского Союза ремонт фасадов проводился регулярно, но без проведения каких-либо обследований, и состоял в расчистке фасада в местах отслоения краски или штукатурного покрытия. Далее восполнялись утраты штукатурного слоя сложными штукатурными растворами, а именно составами в соотношении цемент:известь:заполнитель = 1:1:3. Для штукатурки использовался раствор с крупным (до 1,5–2 мм) заполнителем, затирка с заполнителем с размером зерна до 1 мм. Сложные растворы, особенно если они при ремонтах уложены на традиционную штукатурную отделку памятников, а именно известково-песчаную штукатурку, вызывали «запаривание» оригинальных растворов, их разрушение [3]. Кроме того, на фасадах при их ремонте или реставрации использовались и растворы других составов – гипсовые, известково-гипсовые. Поверхность шпательвалась и окрашивалась в основном красками на основе полимерного пленкообразующего. Последующие ремонты представляли собой удаление участков с разрушением, повторное шпательвание и окраску. При исследовании состояния отделки фасадов ученые впоследствии находили до 45 шпательных и окрасочных слоев, которые необходимо убирать при проведении реставрационных работ [7].

Обязательное проведение химико-физических исследований помогает принять правильные проектные решения по применению отделочных материалов на недвижимых объектах историко-культурного наследия нашей страны.

Список цитированных источников

1. Дзяржаўны спіс гісторыка-культурных каштоўнасцей Рэспублікі Беларусь / склад. В. Я. Абламскі, І. М. Чарняўскі, Ю. А. Барысюк. – Мінск : БЕЛТА, 2009. – 684 с.
2. Кодэкс Рэспублікі Беларусь аб культуры. – Мінск : Нац. цэнтр прававой інфарм. Рэсп. Беларусь, 2016. – 272 с.
3. Скальный, В. С. Проблемы сохранения, причины разрушения и первичное обследование недвижимых памятников архитектуры и истории : моногр. / В. С. Скальный, Е. В. Косыгин. – Орел : ГАУ, 2003. – 201 с.
4. Фрессель, Ф. Ремонт влажных и повреждённых солями строительных сооружений / Ф. Фрессель. – М. : ООО «Пэйнт-медиа», 2006. – 320 с.
5. Подъяпольский, С. С. Реставрация памятников архитектуры: учебное пособие для вузов / С. С. Подъяпольский, Г. Б. Бессонов, Л. А. Беляев, Т. М. Постникова ; под общ. ред. С. С. Подъяпольского. – 2-е изд. – М. : Стройиздат, 2000. – 288 с.
6. Ивлиев, А. А. Реставрационные строительные работы / А. А. Ивлиев, А. А. Калыгин. – М. : ПрофОбрИздат, 2001. – 272 с.
7. Куртуков, В. А. Об особенностях выбора строительных материалов для реставрации объектов историко-культурного наследия / В. А. Куртуков // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 2. – С. 66–69.
8. Никитин, Н. К. Химия в реставрации: справ. пособие / М. К. Никитин, Е. П. Мельникова. – Л. : Химия, 1990. – 304 с.
9. Брок, Т. Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям / Т. Брок, М. Гротеклаус, П. Мишке ; под ред. Л. Н. Машляковского. – М. : Пэйнт-Медиа, 2004. – 548 с.
10. Стойе, Д. Краски, покрытия и растворители / Д. Стойе, В. Фрейтаг ; под ред. Э. Ф. Ицко. – СПб. : Профессия, 2007. – 528 с.
11. Пруцын, О. И. Реставрация и реконструкция архитектурного наследия. Теоретические и методические основы реставрации исторического и архитектурного наследия / О. И. Пруцын. – М. : Академия реставрации, 1996. – 91 с.
12. Тур, Э. А. К вопросу о сохранении объектов историко-культурного наследия в г. Бресте / Э. А. Тур, С. В. Басов // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2018. – № 1. – С. 17–21.
13. Тур, Э. А. Исследование минеральных материалов, использованных при постройке дворцового комплекса Сапегов в Ружанах / Э. А. Тур, С. В. Басов // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – № 1. – С. 88–91.
14. Комплексные научные исследования фасадов костела святых Петра и Павла в д. Рожанка Гродненской области / Э. А. Тур, С. В. Басов, Е. В. Счасная, В. В. Тричик // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2020. – № 1. – С. 147–152.
15. Комплексные научные исследования руин усадьбы «Наднёман» в д. Наднёман Узденского района Минской области как объекта историко-культурного наследия / Э. А. Тур, С. В. Басов, Е. В. Счасная, В. В. Тричик // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 1. – С. 33–38.
16. Свято-Рождества-Богородицкая церковь-крепость оборонительного типа в д. Мурованка Гродненской области как объект историко-культурного наследия Республики Беларусь / Э. А. Тур, Е. В. Счасная, С. В. Басов [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 2. – С. 32–38.
17. Тур, Э. А. Реставрация Коссовского дворца Пусловских и решение возникших при этом технических проблем / Э. А. Тур, В. Н. Казаков, С. В. Басов // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2017. – № 1. – С. 128–131.

18. Тур, Э. А. Комплексные научные исследования гарнизонного храма святителя Николая Чудотворца в Брестской крепости / Э. А. Тур, И. О. Топоренко // Менделеевские чтения – 2022 : сб. материалов Респ. науч.-практ. конф. по химии и хим. образованию с междунар. участием, Брест, 25 февр. 2022 г. / Брест. гос. ун-т имени А.С.Пушкина ; редкол.: Э. А. Тур, Е. Г. Артемук (отв. ред.), Н. С. Ступень, под общ. ред. Н. Ю. Колбас. – Брест : БрГУ, 2022. – С. 118–123.
 19. Знаковые недвижимые объекты историко-культурного наследия г. Бреста и Брестского района, исследованные в 2012–2021 годы / Э. А. Тур, С. В. Басов, В. Н. Казаков, И. Т. Сотников // Реставрация историко-культурных объектов как сохранение наследия Республики Беларусь : сб. статей науч.-технич. семинара, Брест, 27 сентября 2022 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: под ред. Э. А. Тур и [др.]. – Брест : БрГТУ, 2022. – С. 74–84.
 20. Тур, Э. А. Комплексные научные исследования здания главпочтамта в г. Бресте / Э. А. Тур, С. В. Басов, В. Н. Казаков // Реставрация историко-культурных объектов как сохранение наследия Республики Беларусь : сб. статей науч.-технич. семинара, Брест, 29 сентября 2021 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: под ред. Э. А. Тур и [др.]. – Брест : БрГТУ, 2021. – С. 77–83.
- References**
1. Dzyarzhajny spis gistoryka-kul'turnyh kashtoŭnascej Respubliki Belarus' / sklad. V. YA. Ablamski, I. M. CHarnyaŭski, YU. A. Barysyuk. – Minsk : BELTA, 2009. – 684 s.
 2. Kodeks Respubliki Belarus' ab kul'tury. – Minsk : Nac. centr pravavoj infarm. Resp. Belarus', 2016. – 272 s.
 3. Skal'nyj, B. C. Problemy sohraneniya, prichiny razrusheniya i pervichnoe obsledovanie nedvizhimyh pamyatnikov arhitektury i istorii : monogr. / B. C. Skal'nyj, E. V. Kosygin. – Orel : GAU, 2003. – 201 s.
 4. Fryossel', F. Remont vlazhnyh i povrezhdyonnyh solyami stroitel'nyh sooruzhenij / F. Fryossel'. – M. : ООО «Pejnt-media», 2006. – 320 s.
 5. Pod"yapol'skij, S. S. Restavraciya pamyatnikov arhitektury: uchebnoe posobie dlya vuzov / S. S. Pod"yapol'skij, G. B. Bessonov, L. A. Belyaev, T. M. Postnikova ; pod obshch. red. S. S. Pod"yapol'skogo. – 2-e izd. – M. : Strojizdat, 2000. – 288 s.
 6. Ivliev, A. A. Restavracionnye stroitel'nye raboty / A. A. Ivliev, A. A. Kalygin. – M. : ProfObrlzd, 2001. – 272 s.
 7. Kurtukov, V. A. Ob osobennostyah vybora stroitel'nyh materialov dlya restavracii ob'ektov istoriko-kul'turnogo naslediya / V. A. Kurtukov // Vestnik TGASU. – 2012. – № 2. – S. 66–69.
 8. Nikitin, N. K. Himiya v restavracii: sprav. posobie / M. K. Nikitin, E. P. Mel'nikova. – L. : Himiya, 1990. – 304 s.
 9. Brok, T. Evropejskoe rukovodstvo po lakokrasochnym materialam i pokrytiyam / T. Brok, M. Groteklaus, P. Mishke ; pod red. L. N. Mashlyakovskogo. – M. : Pejnt-Media, 2004. – 548 s.
 10. Stojce, D. Kraski, pokrytiya i rastvoriteli / D. Stojce, V. Frejtag ; pod red. E. F. Icko. – SPb. : Professiya, 2007. – 528 s.
 11. Prucyn, O. I. Restavraciya i rekonstrukciya arhitekturnogo naslediya. Teoreticheskie i metodicheskie osnovy restavracii istoricheskogo i arhitekturnogo naslediya / O. I. Prucyn. – M. : Akademiya restavracii, 1996. – 91 s.
 12. Tur, E. A. K voprosu o sohraneni ob'ektov istoriko-kul'turnogo naslediya v g. Breste / E. A. Tur, S. V. Basov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. – 2018. – № 1. – S. 17–21.
 13. Tur, E. A. Issledovanie mineral'nyh materialov, ispol'zovannyh pri postrojke dvorcovogo kompleksa Šapegov v Ruzhanah / E. A. Tur, S. V. Basov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. – 2014. – № 1. – S. 88–91.
 14. Kompleksnye nauchnye issledovaniya fasadov kostela svyatyh Petra i Pavla v d. Rozhanka Grodnenskoj oblasti / E. A. Tur, S. V. Basov, E. V. Schasnaya, V. V. Trichik // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. – 2020. – № 1. – S. 147–152.
 15. Kompleksnye nauchnye issledovaniya ruin usad'by «Nadnyoman» v d. Nadnyoman Uzdenskogo rajona Minskoj oblasti kak ob'ekta istoriko-kul'turnogo naslediya / E. A. Tur, S. V. Basov, E. V. Schasnaya, V. V. Trichik // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – № 1. – S. 33–38.
 16. Svyato-Rozhdestva-Bogorodickaya cerkov'-krepost' oboronitel'nogo tipa v d. Murovanka Grodnenskoj oblasti kak ob'ekt istoriko-kul'turnogo naslediya Respubliki Belarus' / E. A. Tur, E. V. Schasnaya, S. V. Basov [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2023. – № 2. – S. 32–38.
 17. Tur, E. A. Restavraciya Kossovskogo dvorca Puslovskih i reshenie voznikshih pri etom tekhnicheskikh problem / E. A. Tur, V. N. Kazakov, S. V. Basov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. – 2017. – № 1. – S. 128–131.
 18. Tur, E. A. Kompleksnye nauchnye issledovaniya garnizonnogo hrama svyatitelya Nikolaya CHudotvorca v Brestskoj kreposti / E. A. Tur, I. O. Toporenko // Mendeleevskie chteniya – 2022 : sb. materialov Rosp. nauch.-prakt. konf. po himii i him. obrazovaniyu s mezhdunar. uchastiem, Brest, 25 fevr. 2022 g. / Brest. gos. un-t imeni A.S. Pushkina ; redkol.: E. A. Tur, E. G. Artemuk (otv. red.), N. S. Stupen', pod obshch. red. N. YU. Kolbas. – Brest : BrGU, 2022. – S. 118–123.
 19. Znakovye nedvizhimye ob'ekty istoriko-kul'turnogo naslediya g. Bresta i Brestskogo rajona, issledovannye v 2012–2021 gody / E. A. Tur, S. V. Basov, V. N. Kazakov, I. T. Sotnikov // Restavraciya istoriko-kul'turnyh ob'ektov kak sohranenie naslediya Respubliki Belarus' : sb. statej nauch.-tekhnich. seminar, Brest, 27 sentyabrya 2022 g. / Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: pod red. E. A. Tur i [dr.]. – Brest : BrGTU, 2022. – S. 74–84.
 20. Tur, E. A. Kompleksnye nauchnye issledovaniya zdaniya glavpochtamta v g. Breste / E. A. Tur, S. V. Basov, V. N. Kazakov // Restavraciya istoriko-kul'turnyh ob'ektov kak sohranenie naslediya Respubliki Belarus' : sb. statej nauch.-tekhnich. seminar, Brest, 29 sentyabrya 2021 g. / Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: pod red. E. A. Tur i [dr.]. – Brest : BrGTU, 2021. – S. 77–83.

Материал поступил 17.02.2025, одобрен 03.03.2025, принят к публикации 03.03.2025

УДК 699.86

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ КРУПНОПАНЕЛЬНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ, ПРОШЕДШИХ ТЕПЛОВУЮ МОДЕРНИЗАЦИЮ

Н. В. Черноиван¹, И. П. Павлова²

¹ К. т. н., доцент, заместитель декана по учебной и научной работе архитектурно-строительного факультета УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: chernoivan@inbox.ru

² К. т. н., доцент, декан архитектурно-строительного факультета УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: pavlinna@tut.by

Реферат

Сегодня жилищный сектор Республики Беларусь потребляет более 35 % энергоресурсов страны. Одна из причин этого – низкая энергетическая эффективность эксплуатируемых крупнопанельных жилых зданий, запроектированных и построенных до 1993 года, которые составляют более 40 % всей многоэтажной жилой застройки.

Постоянный рост цен на энергоносители на мировом рынке, обеспеченность Беларуси собственными энергоресурсами около 45 % от потребности активизировали работы по повышению энергоэффективности эксплуатируемых жилых зданий, в том числе панельных домов массовых типовых серий.

Для снижения энергопотребления на отопление в Беларуси выполняется тепловая реабилитация фасадов эксплуатируемых жилых зданий, как правило, устраивается «легкая штукатурная система».

В связи с введением в Беларуси в 2020 году в действие ТНП, регламентирующих оценку энергетической эффективности эксплуатируемых зданий и сооружений, в том числе претерпевших тепловую модернизацию, в публикации подробно дана методика проведения научных исследований эксплуатируемых крупнопанельных жилых зданий старых типовых серий, прошедших тепловую модернизацию фасадов по технологии «легкая штукатурная система».

Анализ результатов выполненного комплекса научных исследований позволил сделать вывод: по истечении 12...15 лет эксплуатации показатель удельного расхода энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период крупнопанельных жилых зданий, фасады которых утеплены по технологии «легкая штукатурная система» практически аналогичен значениям энергетической эффективности зданий до утепления фасадов.

Результаты выполненных визуальных натурных исследований технического состояния утепления фасадов и их тепловизионное обследование не позволяют дать научное обоснование причин, которые за столь короткий срок эксплуатации приводят «легкую штукатурную систему» утепления в нерабочее состояние. Для решения данной проблемы планируется выполнить лабораторные исследования образцов строительных материалов, взятых при вскрытии утепленных фасадов эксплуатируемых зданий.

Ключевые слова: керамзитобетонные стеновые панели, «легкая штукатурная система», энергетическая эффективность, эксфильтрация теплого воздуха, тепловизионное обследование.

INVESTIGATION OF THE ENERGY EFFICIENCY OF OPERATED LARGE-PANEL RESIDENTIAL BUILDINGS THAT HAVE UNDERGONE THERMAL MODERNIZATION

N. V. Chernouvan, I. P. Pavlova

Abstract

Today, the housing sector of the Republic of Belarus consumes more than 35 % of the country's energy resources. One of the reasons for this is the low energy efficiency of large-panel residential buildings in operation, designed and built before 1993, which account for more than 40 % of all multistoried residential buildings.

The constant increase in energy prices on the world market, and the provision of Belarus with its own energy resources of about 45 % of the demand, have intensified efforts to improve the energy efficiency of operated residential buildings, including panel houses of mass standard series.

To reduce energy consumption for heating in Belarus, thermal rehabilitation of facades of operated residential buildings is carried out, as a rule, a "light plaster system" is installed.

In connection with the introduction of TNPS in Belarus in 2020, regulating the assessment of the energy efficiency of operated buildings and structures, including those that have undergone thermal modernization, the publication details the methodology for conducting scientific research of operated large-panel residential buildings of old standard series that have undergone thermal modernization of facades using the "light plaster system" technology.

An analysis of the results of the performed complex of scientific studies allowed us to conclude: after 12...15 years of operation, the indicator of the specific energy consumption for heating and ventilation during the heating period of large-panel residential buildings, the facades of which are insulated using the "light plaster system" technology, is almost similar to the values of the energy efficiency of buildings before the facades were insulated.

The results of the visual field studies of the technical condition of the facade insulation and their thermal imaging examination do not allow us to provide a scientific justification for the reasons that, in such a short period of operation, lead the "light plaster insulation system" into a non-working condition. To solve this problem, it is planned to carry out laboratory studies of samples of building materials taken during the opening of insulated facades of operated buildings.

Keywords: expanded clay wall panels, "light plaster system", energy efficiency, warm air exfiltration, thermal imaging examination.

Введение

Жилищный сектор Республики Беларусь потребляет более 35 % энергоресурсов страны, что составляет около 12,5 млн тонн условного топлива [1]. Почти 75 % от потребляемых энергоресурсов приходится на жилые здания, построенные до 1993 года, когда нормируемые показатели теплозащиты оболочки зданий были значительно (почти в 3 раза) ниже существующих. Основной причиной столь высокого потребления энергоресурсов в жилищном секторе является

крайне низкая энергетическая эффективность таких зданий. Так, показатель удельного потребления тепловой энергии на отопление массово эксплуатируемых сегодня крупнопанельных жилых зданий серий 1-335, 1-335А, 1-464, 1-464А и их модификаций с однослойными наружными керамзитобетонными стеновыми панелями толщиной 300 мм, запроектированных и построенных в Беларуси до 1993 года, достигает 180–220, в отдельных случаях 270 кВт·ч/м² в отопительный период [1].

Следует отметить, что общее количество только зданий серии 1–464, эксплуатируемых не менее 40 лет, на сегодня составляет более двух тысяч [2]. В связи с постоянным ростом цен на энергоносители на мировом рынке, учитывая, что обеспеченность Беларуси собственными энергоресурсами не превышает 45 % от потребности, проблема повышения энергоэффективности эксплуатируемых панельных домов массовых серий на сегодняшний день является актуальной для нашей Республики.

Как правило, снижение энергопотребления на отопление решается повышением сопротивления теплопередаче фасадов эксплуатируемых зданий, т. е. их утеплением. Основными конструктивно-технологическими решениями утепления фасадов эксплуатируемых крупнопанельных зданий в странах СНГ являются следующие системы: «вентилируемый фасад» и «легкая штукатурная».

В Российской Федерации утепление жилых домов выполняется с применением системы «вентилируемый фасад», которая показала высокую эксплуатационную эффективность технологичность при устройстве [3, 4].

В Беларуси для утепления фасадов жилых зданий массово применяют технологию «легкая штукатурная система» [5, 6]. Основными причинами сдерживающими массовое применение системы «вентилируемый фасад» в Беларуси, являются большой расход на 1 м² утепляемой поверхности металла (дорогостоящая нержавеющая сталь) и отсутствие собственного промышленного производства металлических конструктивных элементов, закрепляемых в стене вертикальных направляющих, несущих телескопических кронштейнов, клеммеров рядовых и др.

Технология устройства системы утепления «легкая штукатурная система» достаточно трудоемкая, так как включает большую номенклатуру ручных операций [7]. В связи с этим стоимость 1 м² поверхности фасада, утепленной по этой технологии, составляет 25...30 долларов. Для снижения стоимости устройства такой системы утепления в качестве теплоизоляции применяют пенополистирольные плиты, стоимость которых почти на 30 % ниже, чем минераловатных плит. С учетом того, что расчетный коэффициент паропроницаемости пенополистирольных плит крайне низок (0,05 мг/(м·ч·Па)), можно предположить, что в процессе длительной эксплуатации крупнопанельных жилых зданий возможно переувлажнение материалов (в первую очередь, утеплителя) конструктивных слоев системы утепления «легкая штукатурная система».

Следует отметить, что результаты научных исследований позволили установить, что сопротивление теплопередаче не утепленных фасадов жилых зданий, выполненных из однослойных керамзитобетонных панелей (применены почти в 90 % всего жилого фонда Беларуси построенного до 1993 года) имеет тенденцию к снижению [1].

Следовательно, учитывая объемы эксплуатируемого жилого фонда крупнопанельных зданий старых типовых серий вопрос повышения энергетической эффективности панельных домов массовых серий на сегодняшний день является актуальной проблемой.

С учетом изложенного, основная цель настоящей публикации: базируясь на результатах выполненного комплекса научных исследований получить фактические данные по расходу тепловой энергии на отопление квартир за отопительный период для жилых крупнопанельных зданий старых типовых серий претерпевших тепловую модернизацию по технологии «легкая штукатурная система»; выполнить анализ динамики изменения фактической их энергетической эффективности в процессе эксплуатации; сформулировать предложения, позволяющие обеспечить показатели удельного расхода энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период классу не ниже С (С_n) [8].

Методика выполнения научных исследований

Для решения поставленной цели был выполнен комплекс научных исследований, включающий фактический удельный расход энергии на отопление за отопительный период, техническое состояние конструктивных элементов утепленных фасадов и выявление критических дефектов теплоизоляции утепленных фасадов с использованием тепловизионной съемки.

1 Исследования фактической энергетической эффективности жилых зданий

Объекты исследований – три пятиэтажных крупнопанельных жилых здания старых типовых серий, претерпевших тепловую модернизацию фасадов.

Объект «А»: г. Брест, ул. Московская, 328/1 – 1969 год постройки (тепловая модернизация проведена в 2006 году).

Объект «Б»: г. Брест, ул. Кривошеина, 9/1 – 1969 год постройки (тепловая модернизация проведена в 2009 году).

Объект «В»: г. Брест, ул. Советской Конституции, 7 – 1970 год постройки (тепловая модернизация проведена в 2013 году).

Для получения достоверных результатов научных исследований (исключения влияния коэффициента компактности) объектами исследований являются восьмисекционные крупнопанельные жилые здания старых типовых серий, фасады которых утеплены по технологии «легкая штукатурная система». Для снижения стоимости 1 м² утепляемой поверхности слой теплоизоляции выполнен из пенополистирольных плит.

Удельный расход энергии на отопление и вентиляцию здания за отопительный период определялся расчетом по следующему математическому выражению:

$$q = Q/S, \quad (1)$$

где Q – показатель потребления тепловой энергии на отопление в кВт·ч/м² в отопительный период;

S – жилая площадь здания в м².

Численные значения Q были взяты за 18 отопительных сезонов из «Журналов учета расхода тепловой энергии» соответствующих домов, находящихся на обслуживании ЖЭС 5 КУП «ЖГЭУ г. Бреста». Жилая площадь зданий (S) взята из технического паспорта объектов исследования.

Анализ результатов выполненных научных исследований позволяет сделать следующие выводы.

После утепления фасадов показатель удельного потребления тепловой энергии на отопление во всех обследуемых зданиях снизился от 35 % до 60 %. Однако уже после 8...10 лет эксплуатации наблюдается устойчивая тенденция к снижению энергоэффективности. Выполненный по результатам исследований сравнительный анализ динамики изменения значений удельного потребления тепловой энергии на отопление утепленных по технологии «легкая штукатурная система» крупнопанельных жилых зданий не позволяет построить инженерную модель прогнозирования снижения сопротивления теплопередаче утепленных фасадов в процессе эксплуатации.

Основными причинами этого являются:

- отсутствие проектно-сметной и исполнительной документации (акты на скрытые работы, сертификаты качества на примененные стройматериалы), что не позволяет объективно оценить соответствие фактического качества выполненных работ нормативным требованиям;

- различия микроклимата (температура и влажность воздуха) в жилых помещениях в зависимости от восприятия комфортности проживания квартиросъемщиками.

Для наглядности динамику снижения теплотехнических характеристик утепленных фасадов крупнопанельных жилых зданий в процессе эксплуатации проиллюстрируем на результатах выполненных научных исследований.

Объект «А». До утепления удельный расход энергии на отопление и вентиляцию здания за отопительный период был более 175 кВт·ч/м².

После шести лет эксплуатации после утепления фасада этот показатель стабилизировался и на протяжении последующих восьми лет был около 110 кВт·ч/м². Однако уже в 2021 году удельный расход энергии на отопление и вентиляцию здания за отопительный период составил около 145 кВт·ч/м², т. е. эффект утепления был уже полностью исчерпан.

Объект «Б». До утепления удельный расход энергии на отопление и вентиляцию здания за отопительный период был более 155 кВт·ч/м².

По истечении четырех лет эксплуатации после утепления фасада этот показатель стабилизировался и на протяжении последующих семи лет не превышал 96 кВт·ч/м². Однако уже в 2021 году удель-

ный расход энергии на отопление и вентиляцию здания за отопительный период был около $123 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, т. е. эффект утепления был уже полностью исчерпан.

Объект «В». До утепления удельный расход энергии на отопление и вентиляцию здания за отопительный период был около $170 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$.

По истечении двух лет эксплуатации после утепления фасада этот показатель стабилизировался и на протяжении последующих шести лет не превышал $105 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. Однако уже в 2022 году удельный расход энергии на отопление и вентиляцию здания за отопительный период был около $133 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, т. е. эффект утепления был уже полностью исчерпан.

Для выявления причин, приводящих к снижению энергоэффективности утепленных крупнопанельных жилых зданий старых типовых серий, эксплуатируемых длительное время, были выполнены натурные исследования технического состояния конструктивных элементов фасадов.

2 Результаты натурных исследований технического состояния конструктивных элементов утепленных фасадов

Натурные исследования утепленных фасадов состояли из их визуального обследования (рисунки 1–3).

По результатам выполненных исследований можно сделать следующее заключение. Дефектов (разрушение конструктивных элементов «легкой штукатурной системы»), которые могут привести к снижению теплотехнических характеристик фасадов в целом не выявлено.

Результаты выполненных натурных исследований позволяют сделать следующие выводы. Общее техническое состояние системы утепления «легкая штукатурная система» характеризуется категорией II – работоспособное (удовлетворительное) состояние. Дефекты, способные оказать негативное влияние на эксплуатационные характеристики панелей в целом, не обнаружены. Из выявленных дефектов можно отметить ухудшение эстетического вида фасадов из-за роста плесневого грибка в местах постоянного увлажнения (рисунок 2). Этот дефект обусловлен неровностями поверхности фасада и выходом теплого влажного воздуха при проветривании помещений при открывании окон. Такой дефект устраняется проведением косметического ремонта фасадов.

Для получения достоверной информации о фактической эксплуатационной эффективности (выявление критических дефектов теплоизоляции ограждающей конструкции) утепленных фасадов крупнопанельных жилых зданий была выполнена тепловизионная съемка.



Рисунок 1 – Фрагмент главного фасада здания по адресу Кривошеина 9/1



Рисунок 2 – Фрагмент дворового фасада здания по адресу Кривошеина 9/1



Рисунок 3 – Фрагмент дворового фасада здания по адресу Московская 328/1

3 Тепловизионная съемка

Объектом исследования являлся панельный пятиэтажный многоквартирный жилой дом 1969 года строительства, расположенный по адресу: Республика Беларусь, г. Брест, ул. Кривошеина, д. 9/1.

Таблица 1 – Выделение изображений (рисунок 3)

Измеряемые объекты	Темп., °C	Коэффициент теплового излучения	Отраж. темп., °C
Область измерений, Vs4	-2,8	0,92	-10,0
Область измерений, Vs5	-2,9	0,92	-10,0
Область измерений, Vs6	-2,6	0,92	-10,0
Область измерений, Vs7	-2,8	0,92	-10,0
Область измерений, Vs8	-0,8	0,92	-10,0

Обследование проведено 25 декабря 2023 года с 10:30 до 11:00. Температура наружного воздуха $-10,0 \dots -9,4$ °C. Коэффициент теплового излучения здания 0,90.

Тепловизионная съемка проводилась в отсутствии осадков и ветра тепловизором Flir One pro с чувствительностью 0,1 °C.

Ограждающая конструкция стен – керамзитобетонные панели, утепленные пенополистирольными плитами.

Исследования (см. рисунок 4 и таблицу 1) показали, что значительная эксфильтрация теплого воздуха из внутренних помещений жилого дома происходит только через заполнения наружных световых проемов и по всей наружной поверхности цокольной стеновой панели (участок Vs8). Средняя температура наружной поверхности фасадов в пределах жилых этажей составляет $-2,78$ °C при температуре наружного воздуха -10 °C. Участки со значимым отклонением фактической температуры наружной поверхности стен от средней температуры (отклонение не превышает 0,2 °C) не выявлены. Это свидетельствует об отсутствии критических дефектов теплоизоляции ограждающей конструкции на рассматриваемом участке.

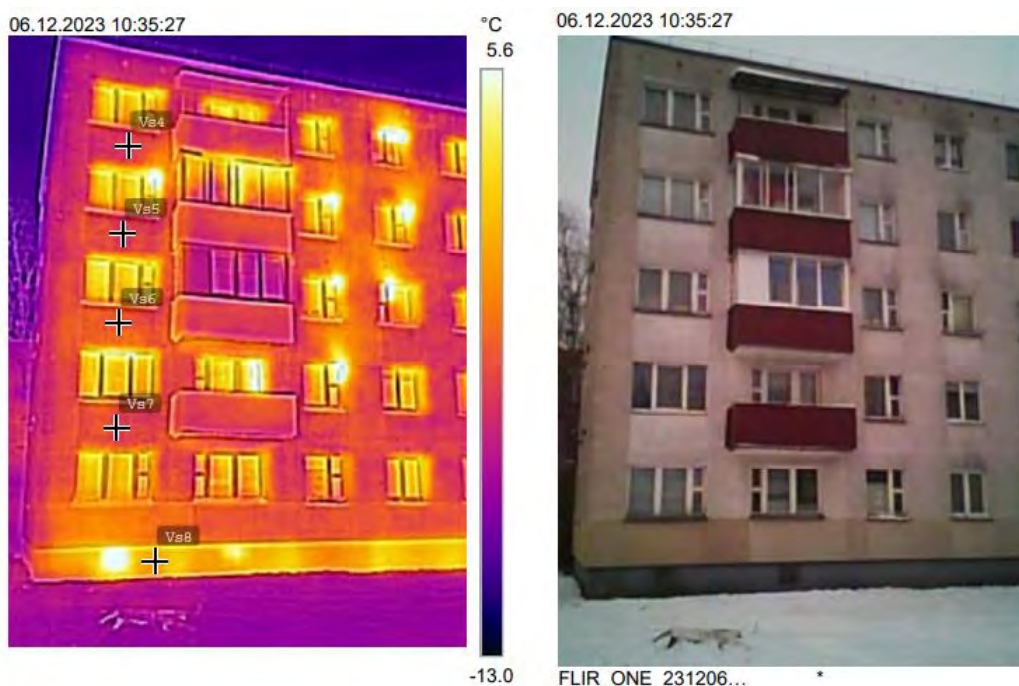


Рисунок 4 – Тепловизионное обследование участка главного фасада дома

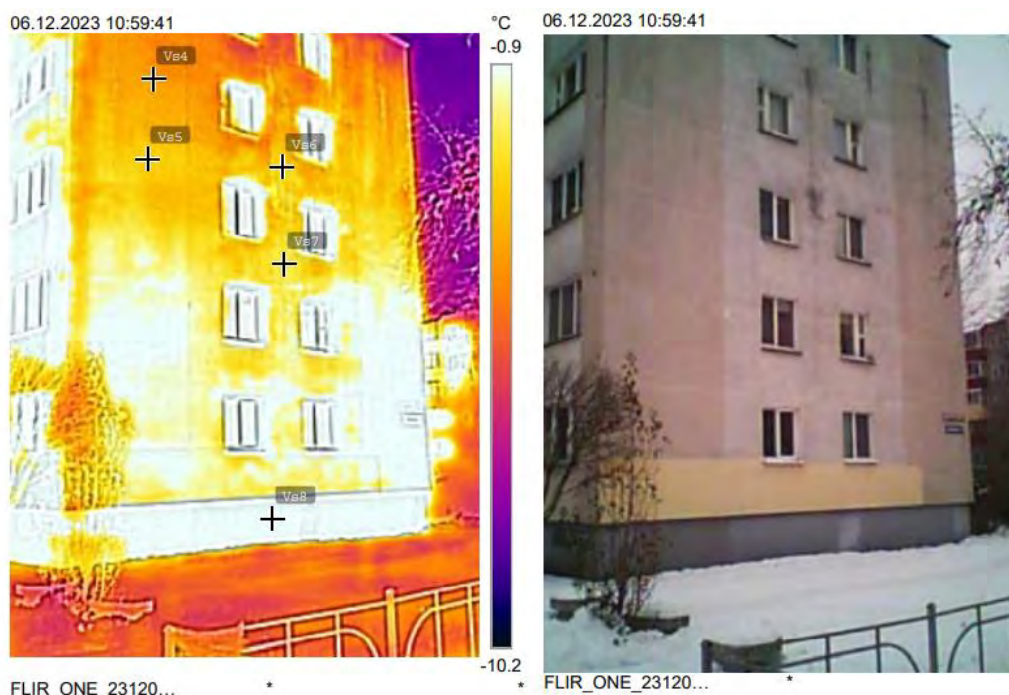


Рисунок 5 – Тепловизионное обследование участка торцевого фасада дома

Таблица 2 – Выделение изображений (рисунок 5)

Измеряемые объекты	Темп., °C	Коэффициент теплового излучения	Отраж. темп., °C
Область измерений, Vs4	-1,7	0,92	-9,4
Область измерений, Vs5	-1,4	0,92	-9,4
Область измерений, Vs6	-1,4	0,92	-9,4
Область измерений, Vs7	-1,2	0,92	-9,4
Область измерений, Vs8	-0,6	0,92	-9,4

Исследования (см. рисунок 5 и таблица 2) позволили установить, что значительная эксфильтрация теплого воздуха из внутренних помещений жилого дома имеет место только через заполнения наружных световых проемов и по всей наружной поверхности цокольной стеновой панели (участок Vs8). Средняя температура наружной поверхности стен в пределах жилых этажей составляет $-1,4^{\circ}\text{C}$ при температуре наружного воздуха $-9,4^{\circ}\text{C}$. При этом отсутствуют участки со значимым отклонением фактической температуры наружной поверхности стен от средней температуры (отклонение не превышает $0,3^{\circ}\text{C}$). Это свидетельствует об отсутствии критических дефектов теплоизоляции ограждающей конструкции на рассматриваемом участке.



Рисунок 6 – Тепловизионное обследование участка дворового фасада дома

Таблица 3 – Выделение изображений (рисунок 6)

Измеряемые объекты	Темп., °C	Коэффициент теплового излучения	Отраж. темп., °C
Область измерений, Vs4	–1,2	0,92	–9,9
Область измерений, Vs5	–1,0	0,92	–9,9
Область измерений, Vs6	–0,6	0,92	–9,9
Область измерений, Vs7	–0,9	0,92	–9,9
Область измерений, Vs8	0,6	0,92	–9,9

Исследования (см. рисунок 6 и таблицу 3), показали, что значительная эксфильтрация теплого воздуха из внутренних помещений жилого дома происходит только через заполнения наружных световых проемов и по всей наружной поверхности цокольной стеновой панели (участок Vs8). Средняя температура наружной поверхности стен в пределах жилых этажей составляет $-0,92^{\circ}\text{C}$ при температуре наружного воздуха $-9,9^{\circ}\text{C}$. При этом участки со значимым отклонением фактической температуры наружной поверхности стен от средней температуры (отклонение не превышает $0,3^{\circ}\text{C}$) отсутствуют. Это свидетельствует об отсутствии критических дефектов теплоизоляции ограждающей конструкции на рассматриваемом участке.

Предварительные выводы

Анализ результатов выполненного комплекса научных исследований энергетической эффективности эксплуатируемых крупнопанельных жилых зданий старых типовых серий, прошедших тепловую модернизацию фасадов по технологии «легкая штукатурная система» позволяет сделать следующие выводы.

1. Показатель удельного расхода энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период во всех обследуемых зданиях после утепления фасадов снизился почти в 1,6 раза и составил $96-110 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$.

Согласно введенному в 2020 году СН 2.04.02-2020 [8], такие значения по расходу тепловой энергии на отопление квартир за отопительный период после выполненной тепловой модернизации фасадов зданий соответствуют классам низкий (E_h) и очень низкий (F_h).

2. После 8...10 лет эксплуатации наблюдается устойчивая динамика снижения энергоэффективности, а через 12...15 лет показатель удельного расхода энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период зданий, претерпевших тепловую модернизацию, достиг значений до утепления фасадов.

Заключение

Объяснением столь низкой энергетической эффективности жилых зданий с утепленными фасадами является следующее.

Согласно постановлению Совета Министров Республики Беларусь № 720 от 14 декабря 2020 года, минимальная норма температуры в квартире в отопительный сезон составляет:

жилые комнаты – не ниже $+18^{\circ}\text{C}$, в угловых комнатах – не ниже $+20^{\circ}\text{C}$. При этом максимальная температура в квартире – до $+24^{\circ}\text{C}$. Таким образом, диапазон допустимой температуры в квартире достаточно широк (для жилых комнат составляет 6°C).

Согласно [9] разность температур даже на 3°C дает дополнительно снижение энергоэффективности жилого здания более чем на 15 % в год.

Исходя из всего изложенного выше, для обеспечения эффективного потребления тепловой энергии на отопление жилых зданий, подключенных к сетям центрального отопления, рекомендуется применять комплексный подход: утепление фасадов и применение систем автоматического регулирования температуры теплоносителя и поквартирного учета тепла.

Как показывает практика [10–14], на сегодня применение систем автоматического регулирования температуры теплоносителя поквартирного учета тепла является одним из наиболее эффективных технических решений, позволяющих рационально потреблять энергию на отопление. Наличие в Республике Беларусь всего необходимого оборудования для устройства поквартирного учета и регулирования тепла, простота его установки, невысокая стоимость позволя-

ют обеспечить комфортную для жильцов температуру в каждой комнате на любой период времени.

Для обеспечения эксплуатационной эффективности системы утепления «легкая штукатурная система» с применением пенополистирольные плит необходимо проводить мониторинг технического состояния (влажности) материалов конструктивных слоев системы утепления [20] и в теплое время года выполнять мероприятия по просушиванию материала утеплителя.

Список цитированных источников

1. Пилипенко, В. М. Анализ рынка жилищного строительства / В. М. Пилипенко // ПРООН/ГЭФ. Проект № 00077154 «Повышение энергетической эффективности жилых зданий в Республике Беларусь». – 2018. – URL: <https://energoeffect.gov.by/effbuild/download/429.pdf> (дата обращения: 24.02.2025).
2. Серия 1-464А. Панельные жилые дома. PhotoBuildings. Архитектурная фотобаза. – URL: <https://photobuildings.com/projects/163> (дата обращения: 12.03.2025).
3. Попова, Е. Е. Повышение энергоэффективности домов с помощью навесных вентилируемых фасадов / Е. Е. Попова, А. Е. Городилова, М. И. Куколев // Ростовский научный журнал. – 2017. – № 12. – С. 367–378.
4. Типовая технологическая карта на монтаж вентилируемого фасада с облицовкой композитными панелями. ТК-23: ФГУП ЦПП. – Москва, 2006. – 22 с.
5. Пилипенко, В. М. К вопросу создания и эксплуатации легких штукатурных систем зданий / В. М. Пилипенко, В. Н. Черноиван, Н. В. Черноиван // Архитектура и строительство. – 2012. – № 1. – С. 62–67.
6. Черноиван, В. Н. Тепловая реабилитация фасадов эксплуатируемых панельных зданий / В. Н. Черноиван, Н. В. Черноиван // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 6. – С. 511–516.
7. Технологическая карта на устройство легкой штукатурной системы «Илмакс»: ТК-100289293.1211-2020. – Введ. 03.08.2020. – Минск: ОАО «Стройкомплекс», 2020. – 174 с.
8. Здания и сооружения. Энергетическая эффективность: СН 2.04.02-2020. – Введ. 30.03.21. – Минск: Минстройархитектуры, 2021. – 21 с.
9. Пилипенко, В. М. Проектирование и опыт эксплуатации энергоэффективных жилых домов с учетом типовых схем теплоснабжения / В. М. Пилипенко // ПРООН/ГЭФ. Проект № 00077154 «Повышение энергетической эффективности жилых зданий в Республике Беларусь». – 2015. – URL: <https://energoeffect.gov.by/effbuild/download/283.pdf> (дата обращения: 12.03.2025).
10. Борисов, К. Б. Классы энергетической эффективности и капитальный ремонт многоквартирных домов. Часть 1 / К. Б. Борисов // Энергосбережение. – 2020. – № 2. – С. 48–53.
11. Борисов, К. Б. Классы энергетической эффективности и капитальный ремонт многоквартирных домов. Часть 2 / К. Б. Борисов // Энергосбережение. – 2020. – № 3. – С. 58–63.
12. Смирнова, Ю. О. Влияние энергоэффективных мероприятий на теплотехнические и экономические характеристики многоквартирных жилых домов / Ю. О. Смирнова, В. В. Логинова // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4 (33). – С. 96–101.
13. Прогнозирование экономии денежных средств при энергоэффективном капитальном ремонте многоквартирных домов / Э. В. Сазонов, Р. А. Шепс, А. В. Шашин, О. Е. Фролова // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2020. – № 3 (14). – С. 87–93.
14. Кононова, М. С. Оценка энергосберегающего потенциала жилой застройки на основе анализа теплотехнических паспортов зданий / М. С. Кононова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 10. – С. 105–109.
15. Кононова, М. С. К вопросу оценки экономии теплоты при автоматическом регулировании температуры теплоносителя в системах централизованного теплоснабжения / М. С. Кононова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 7. – С. 46–52.

16. Виктор, Д. А. Анализ влияния теплоэнергетических характеристик на энергоэффективность жилых зданий на примере серии 1-335 / Д. А. Виктор // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 3. – С. 9–15.
17. Лукинов, В. А. Реконструкция зданий старой застройки с применением инновационных энергосберегающих технологий / В. А. Лукинов, Л. А. Манухина, Ю. А. Малова // Недвижимость: экономика, управление. – 2016. – № 2. – С. 32–35.
18. Корниенко, С. В. Повышение энергоэффективности зданий за счет совершенствования методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций : специальность 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Корниенко Сергей Валерьевич. – Волгоград, 2018. – 380 с.
19. Малыгина, О. А. Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов во влажном состоянии / О. А. Малыгина, В. В. Засько // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2024. – № 5. – С. 5–14.
20. Пастушков, П. П. Натурные исследования теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов в составе фасадных систем / П. П. Пастушков, Н. В. Павленко, А. В. Жеребцов // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 12. – С. 56–60.
9. Pilipenko, V. M. Proektirovanie i opyt ekspluatatsii energoeffektivnyh zhilyh domov s uchetom tipovyh skhem teplosnabzheniya / V. M. Pilipenko // PROON/GEF. Proekt № 00077154 «Povyshenie energeticheskoy effektivnosti zhilyh zdaniy v Respublike Belarus». – 2015. – URL: <https://energoeffect.gov.by/effbuild/download/283.pdf> (data obrashcheniya: 12.03.2025).
10. Borisov, K. B. Klassy energeticheskoy effektivnosti i kapital'nyy remont mnogokvartirnyh domov. CHast' 1 / K. B. Borisov // Energoberezhenie. – 2020. – № 2. – С. 48–53.
11. Borisov, K. B. Klassy energeticheskoy effektivnosti i kapital'nyy remont mnogokvartirnyh domov. CHast' 2 / K. B. Borisov // Energoberezhenie. – 2020. – № 3. – С. 58–63.
12. Smirnova, YU. O. Vliyaniye energoeffektivnyh meropriyatij na teplotekhnicheskie i ekonomicheskie harakteristiki mnogokvartirnyh zhilyh domov / YU. O. Smirnova, V. V. Loginova // Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo. – 2017. – № 4 (33). – С. 96–101.
13. Prognozirovaniye ekonomii denezhnyh sredstv pri energoeffektivnom kapital'nom remonte mnogokvartirnyh domov / E. V. Sazonov, R. A. Sheps, A. V. SHashin, O. E. Frolova // ZHilishchnoe hozyajstvo i kommunal'naya infrastruktura. – 2020. – № 3 (14). – С. 87–93.
14. Kononova, M. S. Ocenka energosberegayushchego potentsiala zhiloy zastroyki na osnove analiza teploenergeticheskikh pasportov zdaniy / M. S. Kononova // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. – 2009. – № 10. – С. 105–109.
15. Kononova, M. S. K voprosu ocenki ekonomii teploty pri avtomaticheskoy regulirovaniy temperatury teplonositelya v sistemah centralizovannogo teplosnabzheniya / M. S. Kononova // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. – 2016. – № 7. – С. 46–52.
16. Viktorov, D. A. Analiz vliyaniya teploenergeticheskikh harakteristik na energoeffektivnost' zhilyh zdaniy na primere serii 1-335 / D. A. Viktorov // Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturo-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2013. – № 3. – С. 9–15.
17. Lukinov, V. A. Rekonstrukciya zdaniy staroy zastroyki s primeneniem innovatsionnyh energosberegayushchih tekhnologiy / V. A. Lukinov, L. A. Manuhina, YU. A. Malova // Nedvizhimost': ekonomika, upravlenie. – 2016. – № 2. – С. 32–35.
18. Kornienko, S. V. Povyshenie energoeffektivnosti zdaniy za schet sovershenstvovaniya metodov rascheta temperaturno-vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchih konstrukcij : special'nost' 05.23.03 «Teplosnabzhenie, ventilyaciya, kondicionirovanie vozduha, gazosnabzhenie i osveshchenie» : dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Kornienko Sergej Valer'evich. – Volgograd, 2018. – 380 s.
19. Malygina, O. A. Eksperimental'noye opredeleniye koefficienta teploprovodnosti teploizolyatsionnyh materialov vo vlazhnom sostoyanii / O. A. Malygina, V. V. Zas'ko // Vestnik Donbasskoj nacional'noj akademii stroitel'stva i arhitektury. – 2024. – № 5. – С. 5–14.
20. Pastushkov, P. P. Naturnye issledovaniya teplofizicheskikh harakteristik teploizolyatsionnyh materialov v sostave fasadnyh sistem / P. P. Pastushkov, N. V. Pavlenko, A. V. Zherebcov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2019. – № 12. – С. 56–60.

References

Материал поступил 28.03.2025, одобрен 06.04.2025, принят к публикации 07.04.2025

УДК 624.154

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТРАМБОВОК ДЛЯ УСТРОЙСТВА ФУНДАМЕНТОВ В ВЫТРАМБОВАННЫХ КОТЛОВАНАХ

В. П. Чернюк¹, В. И. Юськович², Е. И. Шляхова³

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии строительного производства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: tsp1@bstu.by

² К. т. н., доцент, заведующий кафедрой технологии строительного производства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: yuskovich_vitaly@mail.ru

³ Старший преподаватель кафедры технологии строительного производства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: tsp1@bstu.by

Реферат

Метод устройства фундаментов в вытрамбованных котлованах весьма эффективен, так как позволяет сократить объемы подготовительных и земляных работ, полностью исключить опалубочные, распалубочные и гидроизоляционные работы, обратную засыпку пазух фундаментов и уплотнение грунта в них, повысить в несколько раз несущую способность фундаментов по грунту основания, полностью механизировать весь процесс устройства таких фундаментов, увеличить производительность труда, сэкономить бетон, арматуру и другие материалы.

Сущность метода устройства фундаментов в вытрамбованных котлованах состоит в том, что котлованы под отдельные фундаменты или траншеи не отрывают, а вытрамбовывают на необходимую глубину с последующим заполнением образованной выемки монолитным железобетоном или установкой сборных элементов.

В статье рассмотрены существующие эффективные и предлагаемые новые, на уровне авторских свидетельств и патентов на изобретения и полезные модели Российской Федерации и Республики Беларусь, конструкции прогрессивных трамбоек для вытрамбовывания котлованов, а также способы устройства самих фундаментов в вытрамбованных котлованах. Их применение позволяет повысить качество, скорость устройства и несущую способность по грунту основания фундаментов, выполняемых с применением предложенных технологических приемов и конструкций трамбоек. Это особенно актуально при строительстве в неблагоприятных природно-климатических и мерзлотно-грунтовых условиях, на слабых, заболоченных, рыхлых и сезонно-мерзлых грунтах Республики Беларусь и Российской Федерации.

Представлен метод расчета угла наклона граней трамбовки к основанию, позволяющий учитывать физико-механические свойства и другие параметры грунта еще на стадии проектирования фундаментов до начала вытрамбовывания котлованов для их устройства.

Ключевые слова: технология, вытрамбовывание, котлован, фундамент, трамбовка, угол наклона граней, расчет, грунты, свойства, параметры, изобретения, полезные модели.

RATIONAL TECHNOLOGIES AND EFFICIENT STRUCTURES OF RAMMING SYSTEMS FOR FOUNDATION CONSTRUCTION IN RAMMED PIT

V. P. Chernuk, V. I. Yuskovich, E. I. Shlyahova

Abstract

The method of constructing foundations in rammed pits is very effective, as it allows to reduce the volume of preparatory and excavation works, completely eliminate formwork, stripping and waterproofing works, backfilling of foundation sinuses and compaction of soil in them, increase the bearing capacity of foundations on the base soil several times, completely mechanize the entire process of constructing such foundations, increase labor productivity, save concrete, reinforcement and other materials.

The essence of the method of constructing foundations in rammed pits is that pits for individual foundations or trenches are not dug, but rammed to the required depth with subsequent filling of the formed excavation with monolithic reinforced concrete or installation of prefabricated elements. The article considers existing effective and proposed new, at the level of author's certificates and patents for inventions and utility models of the Russian Federation and the Republic of Belarus, designs of progressive rammers for ramming trenches, as well as methods for arranging the foundations themselves in rammed trenches. Their use allows to improve the quality, speed of construction and bearing capacity of the foundation base soil, carried out using the proposed technological methods and designs of rammers. This is especially important during construction in unfavorable natural and climatic and permafrost-soil conditions, on weak, swampy, loose and seasonally frozen soils of the Republic of Belarus and the Russian Federation.

A method is presented for calculating the angle of inclination of the rammer faces to the base, allowing to take into account the physical and mechanical properties and other parameters of the soil at the stage of designing foundations before ramming trenches for their construction.

Keywords: technology, ramming, ditch, foundation, rammer, the angle of inclination, soil, properties, parameter, invention, utility, models.

Введение

Способ устройства фундаментов в вытрамбованных котлованах (ФВК) в настоящее время наиболее прогрессивен и эффективен для возведения фундаментов глубокого и мелкого заложения при строительстве зданий и сооружений различного назначения. Он достаточно широко применяется в фундаментостроении на стройках Российской Федерации, Республики Беларусь, Республики Молдова, Республики Казахстан. В Республике Беларусь применяется пока еще ограничено из-за малой изученности вопроса, информированности и отсутствия машин и механизмов для производства работ [1–4].

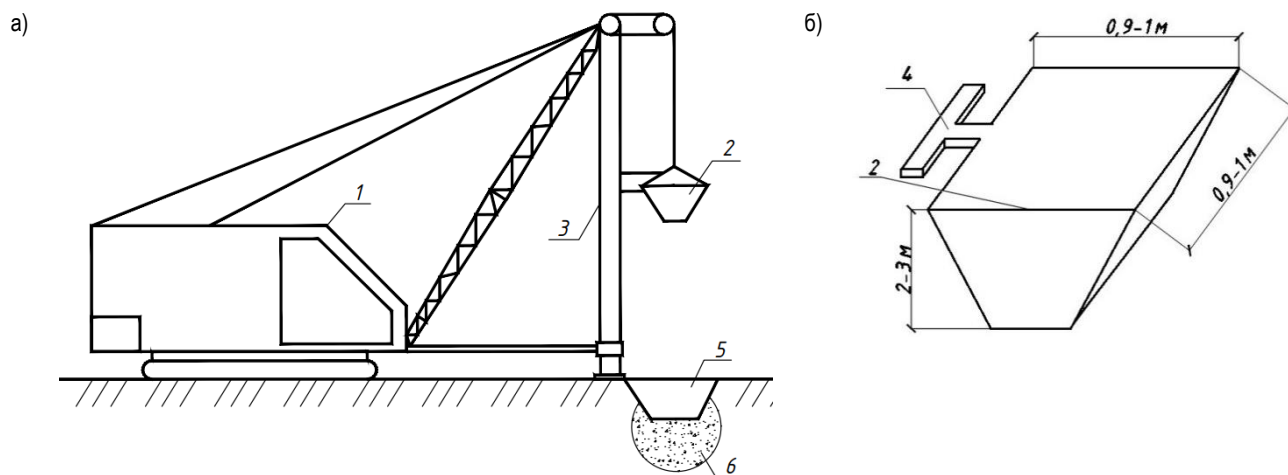
Технологии устройства фундаментов в вытрамбованных котлованах

Сущность метода устройства ФВК состоит в том, что котлованы под отдельные фундаменты или траншеи под ленточные фундамен-ты не отрываются, а вытрамбовываются на необходимую глубину с

последующим заполнением вытрамбованной выемки бетоном (бетонирование в распор), или, что реже, путем установки сборного элемента. Для повышения несущей способности фундаментов в дно вытрамбованного котлована перед бетонированием порциями втрамбовывается жесткий материал: щебень, галька, песчано-гравийная смесь [5].

Вытрамбовывание котлованов по наиболее простой схеме (рисунки 1) производят путем сбрасывания трамбовки по направляющей штанге с высоты 4–8 м.

Масса трамбовки может составлять 5...10 т и более. Для вытрамбовывания котлованов под отдельные столбчатые фундаменты без уширенного основания глубиной до 1 м требуется 10...16 ударов трамбовки в течение 2...4 минут, а для устройства котлованов глубиной около 3 м с уширенным основанием, то есть с учетом втрамбовывания в дно жесткого материала необходимо около 40...60 ударов трамбовки, что составляет 10...20 минут работы установки [6, 7].



1 – базовая машина (например, экскаватор, кран); 2 – трамбовка; 3 – направляющая штанга; 4 – каретка; 5 – вытрамбовываемый котлован; 6 – ядро из жесткого материала и уплотненного грунта

Рисунок 1 – Схема вытрамбовывания котлованов для устройства фундаментов (а) и типовая конструкция трамбовки (б)

Авторами предложено более эффективное устройство для вытрамбовывания котлованов (патент Респ. Беларусь на полезную модель (ПМ) № 1998), в котором в верхней части направляющей штанги – вокруг неё смонтирована пружина сжатия, сжимающаяся при подъёме трамбовки вверх с помощью троса базового механизма и выстреливающая трамбовку при её падении вниз, что придает ей дополнительную энергию падения для более эффективного вытрамбовывания котлована.

Метод устройства ФВК весьма эффективен, так как позволяет сократить объемы земляных работ, полностью исключить опалубочные и распалубочные работы, обратную засыпку пазух, повысить в 2–3 раза несущую способность фундамента по грунту основания, полностью механизировать сам процесс устройства ФВК, повысить производительность труда, сэкономить бетон, арматуру и т. д. [8–12].

Вытрамбованный до проектной отметки котлован заполняется бетонной смесью. Верхняя часть фундамента выполняется различной формы в зависимости от типа сопряжения фундамента с надфундаментными конструкциями (плоская, со стаканом под колонну, с пазами для укладки фундаментных балок и др.).

Фундаменты зданий и сооружений в вытрамбованных котлованах можно устраивать двумя способами: путем вытрамбовывания грунта котлована за счет уплотнения на требуемую глубину заложения фундаментов механической трамбовкой, после чего производится устройство фундамента (первый способ), а также путем устройства фундаментов с уширенным основанием или ядром. Вначале вытрамбовывают котлован на глубину 2–3 м, а затем в образованный котлован (ложе) отдельными порциями отсыпают щебень, гравий, крупный песок или другой жесткий материал и производят его уплотнение механическими трамбовками (второй способ). Имеются также и другие варианты устройств ФВК [13–17].

Первый способ рекомендуется применять при строительстве на просадочных грунтах, в сейсмических районах при нагрузке на фундамент 400–2000 кН, второй – при нагрузках более 2000 кН. Накоплен опыт возведения при нагрузках на фундамент до 8000 кН. Максимальный эффект может быть получен при использовании мобильного оборудования для вытрамбовывания котлованов, приготовления, подачи и укладки бетонной смеси. При этом гусеничные экскаваторы недостаточно эффективны. Значительную сложность представляет их переброска с объекта на объект, особенно при больших расстояниях между ними.

Для вытрамбовывания котлованов под фундаменты, воспринимающих нагрузки до 2000 кН, целесообразно использовать краны на автомобильном, пневматическом или специальном шасси как более мобильные. При нагрузках 1000 кН и более иногда вытрамбовывают не один большой, а несколько мелких котлованов, а общая работа фундамента обеспечивается за счет устройства ростверка, сборного или монолитного.

Что же касается трамбовок, то авторами предложено значительное количество разнообразных конструкций и технических решений, более эффективных и производительных по сравнению с существующими. Все они защищены авторскими свидетельствами (а. с.) СССР и патентами на изобретения/полезные модели (ПМ) Российской Федерации и Республики Беларусь.

Прогрессивные конструкции трамбовок для устройства ФВК

Эффективные крестообразные в плане фундаменты ФВК, обладающие повышенной несущей способностью на действия вертикальных, а также горизонтальных нагрузок, низкой металло- и материалоемкостью. Для их образования используются крестообразные трамбовки. Однако образование крестообразных фундаментов такими трамбовками малоэффективно из-за снижения качества вытрамбовки и срыва грунта, в частности во внутренних углах трамбовки по причине его обрушения. Технологический процесс характеризуется повышенной энерго- и материалоемкостью устройства фундамента.

В этом случае для образования крестообразных ФВК более надежны, просты, практичны и экономичны прямоугольные в плане трамбовки с двумя каретками, расположенными на смежных гранях трамбовки (а. с. СССР № 1807168). Это позволяет путём разовой замены кареток в направляющей штанге базовой машины производить вытрамбовывание крестообразных котлованов, вначале – вдоль одной оси, затем – вдоль другой.

Такие же крестообразные котлованы могут быть вытрамбованы с помощью специальной прямоугольной трамбовки (патент Респ. Беларусь на ПМ № 1998), выполненной в виде усеченной прямоугольной пирамиды, с возможностью ее вращения относительно каретки посредством болтового соединения. Это позволяет путем поворота трамбовки относительно каретки на 90° вытрамбовывать крестообразные котлованы, которые не могут быть образованы обычными трамбовками.

Трамбовки, выполненные согласно патентам на изобретения Российской Федерации № 2016960 и Республики Беларусь № 4658 содержат взаимно разворачивающиеся верхнюю и нижнюю плиты прямоугольного или квадратного сечения, соединенные между собой болтовым соединением с возможностью их вращения. Это позволяет образовывать котлованы, а затем и фундаменты, звездообразной или иной сложной формы высокой несущей способности и обладающие теми же достоинствами, что крестообразные. Эту же цель преследует и трамбовка (по патенту Республики Беларусь на ПМ № 2529), у которой не две, а одна каретка.

Известно применение воды для смазки стенок котлована при вытрамбовке. При наличии сыпучих и маловлажных грунтов с целью повышения эффективности и качества вытрамбовывания котлованов успешно могут быть использованы трамбовки, позволяющие

подавать воду самотёком или под давлением к боковым граням трамбовки (а. с. СССР № 1794992). Это уменьшает энергоёмкость извлечения трамбовки из грунта, снижает силу сцепления трамбовки с грунтом, повышает качество вытрамбовки, уменьшает грузоподъёмность крана для извлечения трамбовки из грунта.

Для повышения качества уплотнения грунта и снижения сопротивления воздуха трамбовка может снабжаться подпружиненным поршнем и цилиндром с отверстиями для выхода воздуха в атмосферу (а. с. СССР № 1765298). Это позволяет увеличить время действия разрывающихся в грунте напряжений и удалять воздух из пор грунта.

Повышение к. п. д. удара трамбовки достигается при её исполнении из двух частей (верхней и нижней плит) разной массы (верхняя тяжелее нижней в 3–4 раза) – патент Республики Беларусь на ПМ № 9780. При этом поднимается вверх только верхняя плита и она же, падая, ударяет по нижней. Благодаря различной массе частей, повышается к. п. д. вытрамбовки и снижается общая масса трамбовки.

К другим полезным разработкам можно отнести технические решения согласно патентам Респ. Беларусь на изобретения № 6653 и ПМ № 1104, № 2031.

Расчет угла наклона граней трамбовки к основанию

Для эффективного и минимально энергоёмкого производства работ по вытрамбовке котлованов необходимо решение важной технологической задачи – определить теоретическим путём оптимальную величину наклона граней трамбовки к основанию [6, 18, 19].

При определении рациональной формы трамбовки следует исходить из того, что устойчивость грунта при вытрамбовывании стенок котлована существенно повышается с увеличением угла наклона к вертикали стенок котлована и приближении его формы в плане к окружности. Кроме того, в этом случае устойчивость грунта повышается также вследствие того, что при большом наклоне граней трамбовки достигается больший эффект уплотнения как по размерам уплотнённой зоны, так и плотности грунта в ней. Однако при чрезмерном увеличении наклона граней трамбовки несущая способность фундамента хотя и возрастает, но при этом более интенсивно увеличивается объём котлована, а следовательно, и расход бетона на изготовление фундамента (рисунок 2). Получается, что чрезмерное увеличение наклона граней трамбовки малоэффективно.

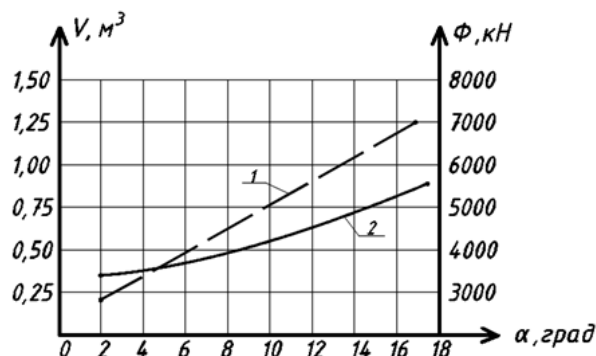


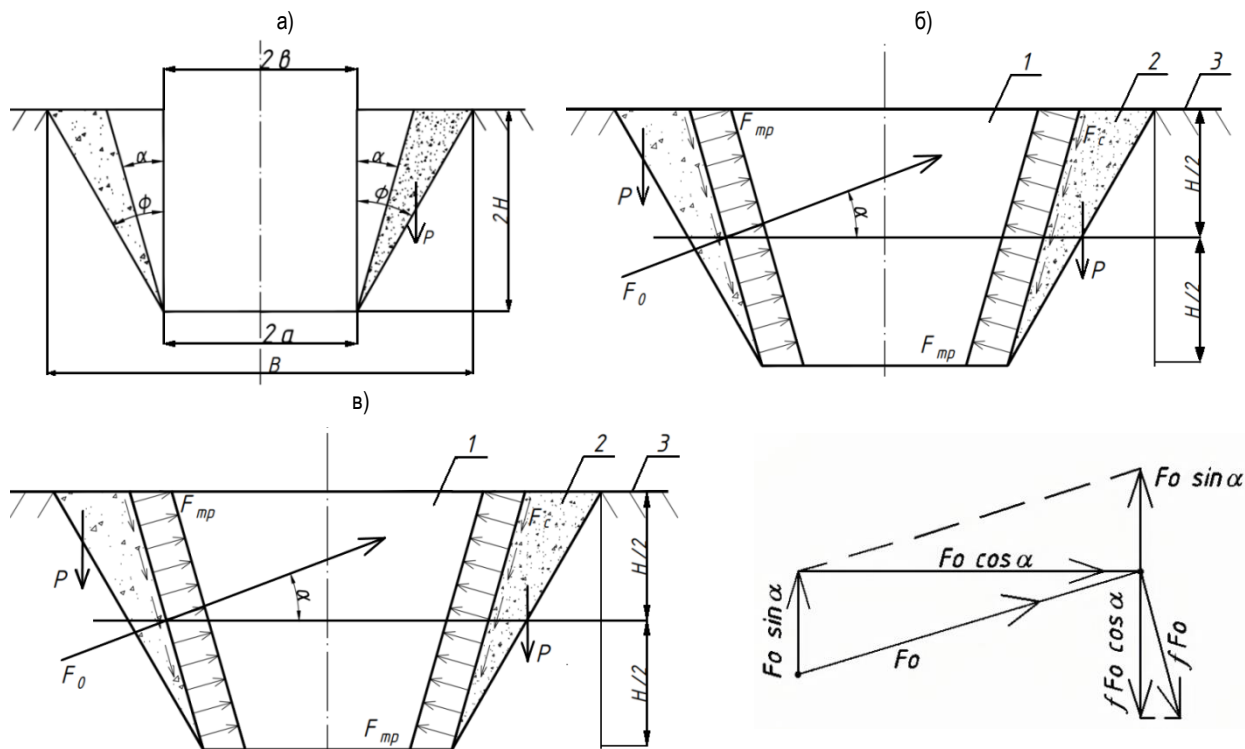
Рисунок 2 – Графики зависимости объема бетона $V(1)$ и несущей способности $\Phi(2)$ вытрамбованного котлована трамбовкой с размерами верхнего основания $1,25 \times 1,25$ м, нижнего 1×1 м, высотой 1,3 м в плотных песчаных грунтах от угла наклона граней трамбовки к основанию α .

С другой стороны, при уменьшении наклона граней трамбовки возникает опасность обрушения стенок котлована при извлечении трамбовки.

С целью определения оптимального наклона граней трамбовки для упрощения постановки задачи и последующего её решения примем следующие допущения:

- во-первых, грунт в пределах котлована относительно однородный, однослойный, что вполне допустимо, так как глубина вытрамбовки фундамента невелика и редко превышает 2,5–3 м;
- во-вторых, с точки зрения максимальной эффективности уплотнения грунта вокруг котлована, примем саму трамбовку в виде усечённого конуса, ориентированного вниз меньшим основанием, что позволяет с небольшой долей погрешности, перейти на эффективные шести-, восьми-, двенадцати и др. многогранные трамбовки.

Исходя из этих предпосылок, установим рациональную величину угла наклона граней трамбовки α , при котором грунт стенок котлована не будет срываться или обрушаться. Для этого необходимо выполнение двух условий (рисунок 3).



1 – трамбовка; 2 – призма обрушения; 3 – грунт

Рисунок 3 – Схема к определению угла наклона граней трамбовки α (а) и распределения сил по граням трамбовки (б, в)

1. Вертикальная составляющая отпора грунта F_0 должна быть больше вертикальной составляющей силы трения грунта с трамбовкой $F_{тр}$, то есть $F_0 \cdot \sin \alpha \geq f \cdot F_0 \cdot \cos \alpha$ (рисунок 3 "б, в"), где f – коэффициент трения грунта о трамбовку.

Решая приведенное неравенство относительно α , будем иметь:

$$\alpha \geq \arctg f. \quad (1)$$

2. Вертикальная составляющая силы сцепления грунта с трамбовкой F_c не должна превышать силу тяжести грунта P , заключенного в объем конуса обрушения, иначе он будет вынут из выемки вместе с трамбовкой на дневную поверхность и в грунте образуется невытрамбованный котлован, а выемка:

$$F_c \cdot \cos \alpha \leq P, \quad (2)$$

где F_c – сила сцепления грунта с трамбовкой, кН;

P – сила тяжести грунта конуса обрушения, кН;

$$F_c = S_b \cdot \tau_c,$$

где S_b – площадь боковой поверхности трамбовки (сцепления грунта с трамбовкой), м²;

τ_c – расчетное сцепление грунта с материалом боковой поверхности трамбовки (принимается по нормативным данным, например, таблица 39 [20], кПа.

$$S_b = \pi l \cdot (b + a),$$

где b – радиус верхнего основания трамбовки, м;

a – радиус нижнего основания трамбовки, м;

l – образующая трамбовки (конуса), м.

Из рисунка 3а: $b = a + H \operatorname{tg} \alpha$, $l = \frac{H}{\cos \alpha}$, где H – высота трамбовки, м.

Поэтому: $S_b = \frac{\pi H}{\cos \alpha} (2a + H \operatorname{tg} \alpha)$, соответственно

$$F_c = \frac{\pi H}{\cos \alpha} (2a + H \operatorname{tg} \alpha) \tau_c, \quad (3)$$

$$P = V \cdot \rho \cdot g,$$

где V – объем усеченного конуса (призмы обрушения), м³;

ρ – плотность грунта, т/м³;

g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с².

$$V = \frac{1}{3} \pi H (B^2 + a^2 + aB) = \frac{\pi H}{3} [(a + H \operatorname{tg} \varphi)^2 + a^2 + 2a(a + H \operatorname{tg} \varphi)] =$$

$$= \frac{\pi H}{3} (3a^2 + 3aH \operatorname{tg} \varphi + H^2 \operatorname{tg}^2 \varphi).$$

$$\text{Соответственно, } P = \frac{\pi H}{3} \rho g (3a^2 + 3aH \operatorname{tg} \varphi + H^2 \operatorname{tg}^2 \varphi). \quad (4)$$

Учитывая, что a намного меньше H ($a \approx 0,1 - 0,2$ м, а $H = 2 - 3$ м), то есть $a \ll H$, то можно принять $a = 0$ и упростить выражения (3) и (4):

$$F_c = \frac{\pi H^2}{\cos \alpha} \tau_c \operatorname{tg} \alpha, \quad (5)$$

$$P = \frac{\pi H^3}{3} \rho g \operatorname{tg}^2 \varphi. \quad (6)$$

Подставляя полученные значения F_c и P из выражений (5), (6) в выражение (2), получим:

$$\tau_c \cdot \operatorname{tg} \alpha \leq \frac{\rho g H \operatorname{tg}^2 \varphi}{3}, \quad (7)$$

$$\text{Откуда } \alpha = \arctg \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi}{3 \cdot \tau_c}. \quad (8)$$

Таким образом, оптимальные значения углов наклона граней трамбовки α должны быть в пределах

$$\arctg f \leq \alpha \leq \arctg \frac{\rho g H \operatorname{tg}^2 \varphi}{3 \tau_c}. \quad (9)$$

В качестве примера расчета определим оптимальный угол наклона граней α реальной трамбовки высотой $H = 3$ м при следующих грунтовых условиях: грунт – песок мелкий, при $e = 0,5$; $c = 4$ кПа; $E_0 = 30$ МПа, имеем $\varphi = 37^\circ$; $f = 0,15$; $\rho = 1,6$ т/м³; $\tau_c = 40$ кПа [20].

$$\alpha_{\min} = \arctg f = \arctg 0,15 = 5^\circ 40';$$

$$\alpha_{\max} = \arctg \frac{\rho g H \operatorname{tg}^2 \varphi}{3 \tau_c} = \arctg \frac{1,6 \cdot 9,8 \cdot 3 \cdot \operatorname{tg}^2 37^\circ}{3 \cdot 40}$$

$$\arctg 0,22 = 12^\circ 30'.$$

Таким образом, оптимальный угол α изменяется в пределах $5^\circ 40' - 12^\circ 30'$.

Заключение

Расчеты, выполненные по выражению (9), показывают, что оптимальные значения углов наклона граней трамбовок к основанию могут меняться в пределах от 5° до 12° . В трамбовках, применявшихся в фундаментостроении Российской Федерации, Республики Беларусь, Республики Молдова, Республики Казахстан, угол наклона граней трамбовок изменяется в широком диапазоне, пределах $0^\circ \dots 20^\circ$ (от тупых до весьма острых), причём он установлен спонтанно, на основании экспертных оценок.

В предлагаемой методике угол наклона граней трамбовок определяется на основании реальных грунтовых условий, в зависимости от конкретных физико-механических параметров грунта, таких как ρ , φ , τ_c , f , которые следует учитывать на стадии проектирования технологии устройства фундаментов.

Список цитированных источников

1. Чернюк, В. П. Расчет, проектирование и устройство свайных фундаментов / В. П. Чернюк, П. С. Пойта. – Брест : Облтипография, 1998. – 216 с.
2. Кречин, А. С. Ресурсосберегающие фундаменты на сельских стройках / А. С. Кречин, В. П. Чернюк, П. В. Шведовский [и др.]. – Кишинёв : Картия Молдовенскэ, 1990. – 247 с.
3. Чернюк, В. П. Технические средства и способы бурения скважин с уширениями в строительстве и горном деле: учебное пособие / В. П. Чернюк, Е. И. Шляхова. – М. : ООО «РУСАЙНС», 2020. – 140 с.
4. Чернюк, В. П. Прогрессивные технологии устройства фундаментов в вытрамбованных котлованах / В. П. Чернюк, Е. И. Шляхова // Материалы VII Международной научно-практической конференции, г. Омск, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 24–25 ноября 2022 г. – Омск : СГАДУ, 2022. – С. 520–524.
5. Чернюк, В. П. Эффективные конструкции трамбовок для устройства фундаментов в вытрамбованных котлованах / В. П. Чернюк, Е. И. Шляхова // Материалы Международного научного семинара «Проблемы энергетической безопасности в различных отраслях». – Брест : БрГТУ, 2023. – С. 19–23.
6. Руководство по проектированию и устройству фундаментов в вытрамбованных котлованах / НИИОСП им. Н. М. Герсеева Госстроя СССР. – М. : Стройиздат, 1981. – 56 с.
7. Эффективные конструкции фундаментов сельских зданий / Обзорная информация. – М. : ЦНИИПЭПсельстрой, 1985. – 64 с.
8. Чернюк, В. П. Производство свайных работ в особых условиях / В. П. Чернюк, П. П. Ивасюк. – Саарбрюккен : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 195 с.
9. Чернюк, В. П. Рекомендации по расчету и проектированию трамбовок при устройстве фундаментов в вытрамбованных котлованах / В. П. Чернюк, С. М. Семенов, П. В. Шведовский // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С. 164–166.
10. Спиридонов, В. В. Рекомендации по выбору, проектированию и сооружению оснований и фундаментов газонефтепромысловых объектов в районах распространения вечномёрзлых грунтов / В. В. Спиридонов, В. Н. Пчелин, В. П. Чернюк // МНТК «Нефтеотдача». – М. : ВНИИ им. академика А. П. Крылова, 1990. – 48 с.
11. Спиридонов, В. В. Основания и фундаменты нефтегазопромысловых объектов в условиях распространения вечномёрзлых грунтов / В. В. Спиридонов, В. Н. Пчелин, В. П. Чернюк // Обзорная информация. Серия: Строительство нефтегазопромысловых объектов. – М. : ВНИИПКТехоргнефтегазстрой, 1990. – Вып. 9. – 42 с.
12. Совершенствование конструкций мелко заглубленных фундаментов в вытрамбованных котлованах в пучинистых грунтах / И. А. Азизов, П. В. Шведовский, В. П. Чернюк [и др.] // научно-технический информационный сборник: Передовой научно-производственный опыт рекомендуемый для внедрения в строительстве объектов агропромышленного комплекса. – М. : ЦНИИЭПсельстрой, 1989. – Вып. 10. – С. 19–23.
13. Жилые дома в брестской области на фундаментах в вытрамбованных котлованах / В. К. Кондратюк, П. В. Шведовский, В. П. Чернюк [и др.] // научно-технический информационный сборник: Передовой научно-производственный опыт рекомендуемый для внедрения в строительстве объектов агропромышленного комплекса. – М. : ЦНИИЭПсельстрой, 1989. – Вып. 10. – С. 24–25.

14. Определение величины наклона граней трамбовки при устройстве фундаментов в вытрамбованных котлованах / В. П. Чернюк, В. Н. Пчелин, П. В. Шведовский [и др.] // Совершенствование и внедрение фундаментов на глубоко уплотненном основании : тезисы докладов к зональной конференции, 25–26 сентября 1989 г. – Пенза : ПИСИ, 1989. – С. 63–65.
15. Чернюк, В. П. Технология строительства в особых условиях / В. П. Чернюк, В. Н. Пчелин, Н. А. Стасhevская // Курс лекций для студентов специальности 1-70 02 01 Промышленное и гражданское строительство. – Брест : БрГТУ, 2005. – С. 48–60.
16. Чернюк, В. П. Эффективные устройства для вытрамбовывания котлованов / В. П. Чернюк, В. Н. Пчелин, В. П. Щербач // Тезисы докладов XX Научно-технической конференции в рамках проблемы «Наука и мир» : в 3 ч. – Брест : БПИ, 1992. – Ч. 1. – С. 114–116.
17. Чернюк, М. В. Технология устройства фундаментов в вытрамбованных котлованах / М. В. Чернюк, В. П. Чернюк, Н. А. Стасhevская // Сборник конкурсных работ студентов и аспирантов. – Брест : БГТУ, 2005. – С. 121–123.
18. Чернюк, М. В. Технологические расчеты трамбовок для устройства фундаментов в вытрамбованных котлованах / М. В. Чернюк, В. П. Чернюк, Н. А. Стасhevская // Сборник конкурсных работ студентов и аспирантов. – Брест : БГТУ, 2005. – С. 123–128.
19. Рекомендации по проектированию, расчету и устройству мелкозаглубленных фундаментов в вытрамбованных (выштампованных) котлованах в пучинистых грунтах. – М. : ЦНИИЭПСельстрой, 1991. – 41 с.
20. Общетеchnический справочник / под ред. А. Н. Малова. – М. : Машиностроение, 1971. – 464 с.
21. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83) / НИИОСП им. Герсеванова. – М. : Стройиздат, 1986. – 415 с.
9. CHernyuk, V. P. Rekomendacii po raschetu i proektirovaniyu trambovok pri ustrojstve fundamentov v vytrambovannykh kotlovanah / V. P. CHernyuk, S. M. Semenyuk, P. V. SHvedovskij // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. – 2011. – № 1. – С. 164–166.
10. Spiridonov, V. V. Rekomendacii po vyboru, proektirovaniyu i sooruzheniyu osnovanij i fundamentov gazoneftepromyslovyykh ob'ektov v rajonah rasprostraneniya vechnomerzlykh gruntov / V. V. Spiridonov, V. N. Pchelin, V. P. CHernyuk // MNTK "Nefteotdacha". – M. : VNII im. akademika A.P. Krylova, 1990. – 48 s.
11. Spiridonov, V. V. Osnovaniya i fundamenty neftegazopromyslovyykh ob'ektov v usloviyakh rasprostraneniya vechnomerzlykh gruntov / V. V. Spiridonov, V. N. Pchelin, V. P. CHernyuk // Obzornaya informaciya: Seriya: Stroitel'stvo neftegazopromyslovyykh ob'ektov. – M. : VNII PKtekhorgneftegazstroj, 1990. – Vyp. 9. – 42 s.
12. Sovershenstvovanie konstrukcij melko zaglublennykh fundamentov v vytrambovannykh kotlovanah v puchinistyykh gruntah / I. A. Azizov, P. V. SHvedovskij, V. P. CHernyuk [i dr.] // nauchno-tekhnicheskij informacionnyj sbornik: Peredovoj nauchno-proizvodstvennyj opyt rekomenduemyj dlya vnedreniya v stroitel'stve ob'ektov agropromyshlennogo kompleksa. – M. : CNIEP Sel'stroj, 1989. – Vyp. 10. – С. 19–23.
13. Zhilye doma v brestskoj oblasti na fundamentah v vytrambovannykh kotlovanah / V. K. Kondratyuk, P. V. SHvedovskij, V. P. CHernyuk [i dr.] // nauchno-tekhnicheskij informacionnyj sbornik: Peredovoj nauchno-proizvodstvennyj opyt rekomenduemyj dlya vnedreniya v stroitel'stve ob'ektov agropromyshlennogo kompleksa. – M. : CNIEP Sel'stroj, 1989. – Vyp. 10. – С. 24–25.
14. Opredelenie velichiny naklona graney trambovki pri ustrojstve fundamentov v vytrambovannykh kotlovanah / V. P. CHernyuk, V. N. Pchelin, P. V. SHvedovskij [i dr.] // Sovershenstvovanie i vnedrenie fundamentov na glubinnno uplotnennom osnovanii : tezisy dokladov k zonal'noj konferencii, 25–26 sentyabrya 1989 g.. – Penza : PISI, 1989. – С. 63–65.
15. CHernyuk, V. P. Tekhnologiya stroitel'stva v osobykh usloviyakh / V. P. CHernyuk, V. N. Pchelin, N. A. Stashevskaya // Kurs lekcij dlya studentov special'nosti 1-70 02 01 Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – Brest : BrGTU, 2005. – С. 48–60.
16. CHernyuk, V. P. Effektivnye ustrojstva dlya vytrambovyvaniya kotlovanov / V. P. CHernyuk, V. N. Pchelin, V. P. SHcherbach // Tezisy dokladov HKH Nauchno-tekhnicheskoy konferencii v ramkah problemy «Nauka i mir» : v 3 ch. – Brest : BPI, 1992. – CH. 1. – С. 114–116.
17. CHernyuk, M. V. Tekhnologiya ustrojstva fundamentov v vytrambovannykh kotlovanah / M. V. CHernyuk, E. I. SHlyahova // Materialy VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, g. Omsk, Sibirskij gosudarstvennyj avtomobil'no-dorozhnyj universitet, 24–25 noyabrya 2022 g. – Omsk : SGADU, 2022. – С. 520–524.
5. CHernyuk, V. P. Effektivnye konstrukcii trambovok dlya ustrojstva fundamentov v vytrambovannykh kotlovanah / V. P. CHernyuk, E. I. SHlyahova // Materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo seminaru «Problemy energeticheskoy bezopasnosti v razlichnykh otraslyakh». – Brest : BrGTU, 2023. – С. 19–23.
6. Rukovodstvo po proektirovaniyu i ustrojstvu fundamentov v vytrambovannykh kotlovanah / NIIOSP im. N. M. Gersevanova Gosstroya SSSR. – M. : Strojizdat, 1981. – 56 s.
7. Effektivnye konstrukcii fundamentov sel'skikh zdaniy / Obzornaya informaciya. – M. : CNIEP Sel'stroj, 1985. – 64 s.
8. CHernyuk, V. P. Proizvodstvo svajnykh rabot v osobykh usloviyakh / V. P. CHernyuk, P. P. Ivasyuk. – Saarbryukken : LAP LAMBERT AcademicPublishing, 2016. – 195 s.
19. Rekomendacii po proektirovaniyu, raschetu i ustrojstvu melkozaglublennykh fundamentov v vytrambovannykh (vyshtampovannykh) kotlovanah v puchinistyykh gruntah. – M. : CNIEP Sel'stroj, 1991. – 41 s.
20. Obshchetechnicheskij spravochnik / pod red. A. N. Malova. – M. : Mashinostroenie, 1971. – 464 s.
21. Posobie po proektirovaniyu osnovanij zdaniy i sooruzhenij (k SNiP 2.02.01-83) / NIIOSP im. Gersevanova. – M. : Strojizdat, 1986. – 415 s.

Материал поступил 22.03.2025, одобрен 24.03.2025, принят к публикации 27.03.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.793:66.088

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТРИЦ

И. П. Акула¹, А. И. Веремейчик², Д. И. Линник³, Е. В. Овчинников⁴, В. М. Хвиевич⁵, Н. М. Чека⁶, Е. И. Эйсымонт⁷¹ К. физ.-мат. н., ведущий научный сотрудник лаборатории наноматериалов и ионно-плазменных процессов ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: shark@phti.by² К. физ.-мат. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vai_mrtm@bstu.by³ К. т. н., доцент, декан инженерного факультета, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: d.linnik@grsu.by⁴ Д. т. н., доцент, профессор кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: ovchin@grsu.by⁵ К. т. н., доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vmhvisovich@bstu.by⁶ К. физ.-мат. н., заведующий лабораторией наноматериалов и ионно-плазменных процессов ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: pec@bas-net.by⁷ К. т. н., доцент, доцент кафедры логистики и методов управления, УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь, e-mail: eisyomont@grsu.by

Реферат

В последнее время значительное внимание ученых уделяется разработке покрытий с высокими температурными характеристиками и антифрикционными свойствами. В основе данных свойств лежит способность высокоэнтропийных материалов содержать в своём составе рефракторные металлы. В процессе их формирования образуются объекты различной функциональной значимости, что позволяет получать защитные слои с уникальными свойствами. В статье изучены физико-механические характеристики вакуумных рефракторных покрытий на основе алтинов, легированных фтором и углеродом. Нанесение покрытий AlTiN, AlTiCN, AlTiN(C,F) на стальной подложке осуществлялось на вакуумной установке УВНИПА-1-001. Для определения свойств сверхтвёрдых вакуумных покрытий применяли стандартные методы (микродюрметрический, скретч-анализ, метод «сидячей» капли). Определены значения удельной поверхностной энергии для композиционных покрытий на основе алтинов, сформированных на данных подложках. Показано, что формирование покрытий на основе алтинов снижает значения удельной поверхностной энергии модифицируемого стального субстрата. Установлено, что покрытия на основе алтинов, легированных фтором, углеродом и сформированных на стальной подложке, имеют значения микротвёрдости выше, чем у исходных покрытий алтинов. Данный эффект обусловлен увеличением концентрации активных зарядовых центров на поверхности подложки вследствие использования многокомпонентных покрытий. Увеличение количества активных зарядовых центров приводит к увеличению дисперсности фаз, содержащихся в структуре покрытия, что сказывается на микротвёрдости исследуемых покрытий.

Ключевые слова: покрытие, алтины, фтор, углерод, микротвёрдость, адгезия, удельная поверхностная энергия, скретч-анализ.

PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MULTIFUNCTIONAL COATINGS BASED ON CERAMIC MATRICES

I. P. Akula, A. I. Verameichyk, D. I. Linnik, E. V. Auchynnikau, V. M. Khvisevich, N. M. Chekan, E. I. Eysymont

Abstract

Recently, considerable attention of scientists has been paid to the development of coatings with high temperature characteristics and antifriction properties. These properties are based on the ability of high-entropy materials to contain refractory metals. In the process of their formation, objects of various functional significance are formed, which allows obtaining protective layers with unique properties. The article studies the physical and mechanical characteristics of vacuum refractory coatings based on alitines doped with fluorine and carbon. The application of AlTiN, AlTiCN, AlTiN(C,F) coatings on a steel substrate was carried out on a UVNIPA-1-001 vacuum unit. Standard methods (microduremetric, scratch analysis, sessile drop method) were used to determine the properties of superhard vacuum coatings. The values of specific surface energy for composite coatings based on alitines formed on these substrates were determined. It is shown that the formation of coatings based on alitines reduces the values of the specific surface energy of the modified steel substrate. It is established that coatings based on alitines doped with fluorine, carbon and formed on a steel substrate have microhardness values higher than those of the original altine coatings. This effect is due to an increase in the concentration of active charge centers on the substrate surface due to the use of multicomponent coatings. An increase in the number of active charge centers leads to an increase in the dispersion of the phases contained in the coating structure, which affects the microhardness of the coatings under study.

Keywords: coating, altins, fluorine, carbon, microhardness, adhesion, specific surface energy, scratch analysis.

Введение

Вакуумные покрытия, которые получают путём осаждения в вакуумной камере, позволяют значительно увеличить срок эксплуатации изделий, изготавливаемых из различных материалов и конструкций [1–22]. Эта технология, благодаря своим экологическим свойствам и низкой ресурсоёмкости, является высоко технологичной, экологически безопасной и ресурсосберегающей. При создании покрытий используются три основных подхода: физическое, химическое и физико-химическое осаждение в вакууме. Технология, ис-

пользуемая в данных технологических процессах, имеет множество вариантов исполнения, позволяющих создавать покрытия с большим разнообразием функциональных характеристик. Из-за окисления на воздухе и снижения физико-механических характеристик вакуумные покрытия не могут применяться при температурах выше 530–700 °С. Это является главным недостатком данного типа покрытий. В ряде случаев он решается путём применения рефракторных металлов для формирования защитных слоёв, однако это приводит к увеличению стоимости получаемых покрытий. Указанный температурный

предел применимости ограничивает использование вакуумных покрытий для защиты технологической оснастки при литье металлов, эксплуатации инструмента для обработки металлов, древесины и композиций на её базе [1, 2].

В связи с этим разрабатываются покрытия, которые обладают повышенными температурными характеристиками и высокими антифрикционными свойствами. В основе данных свойств лежит способность высокоэнтропийных материалов, которые состоят из пяти и более компонентов, содержать в своём составе рефракторные металлы, позволяющие значительно повысить температурные режимы эксплуатации изделий. Данные покрытия имеют многослойную структуру, состоящую из наночастиц. В процессе их формирования образуются объекты различной функциональной значимости, что позволяет получать защитные слои с уникальными свойствами [3–5].

Основные материалы для автомобильной, химической и аэрокосмической промышленности являются теми, которые обладают целым комплексом свойств: высокой износостойкостью, термостойкостью, электропроводностью, прочностью и твёрдостью. Эти свойства применимы также и к покрытиям, которые используются в тех областях, которые были указаны выше. Для того чтобы интерес к данным материалам и покрытиям был обоснован по экономическим или производственным причинам, следует рассмотреть следующие факторы, которые позволяют снизить себестоимость формирования покрытий, а также увеличить ресурс эксплуатации изделий с покрытиями, формируемыми по технологии PVD (Physical Vapour Deposition) – метод физического осаждения, CVD (Chemical Vapour Deposition) – метод химического осаждения, PCVD (Plasma Chemical Vapor Deposition) – метод осаждения из газовой фазы полученной путем плазменного распыления. С помощью высокой стойкости к коррозии, износу и возможности создания разнообразных типов конструкций с большим сроком эксплуатации можно добиться снижения стоимости продукции за счёт увеличения сроков межремонтного обслуживания, уменьшения расходов на техническое обслуживание, а также повышения качества производимого продукта.

Применяя многокомпонентные покрытия, в частности, системы титан-алюминий-азот, титан-алюминий-кремний-азот, допированных углеродом, фтором можно повысить срок эксплуатации изделий. Среди основных преимуществ, которые имеют эти покрытия перед классическими материалами на основе карбида титана, нитрида циркония, можно отметить хорошую стойкость к окислению, более высокую микротвёрдость и сохранение исходных физико-механических характеристик покрытий при воздействии высоких температур. Установлено, что термостойкость покрытий, содержащих в своём составе Al, приводит к формированию соединений на основе оксида алюминия. Данный защитный слой позволяет существенно снизить скорость окисления покрытия и резко увеличить адгезионное взаимодействие тонкослойных вакуумных покрытий с поверхностными слоями металлообрабатывающего инструмента, что обуславливает высокие эксплуатационные характеристики модифицированных изделий [6–8].

Целью данного исследования является изучение многокомпонентных по составу вакуумных покрытий, которые обладают высокой степенью надёжности и долговечности в сравнении с традиционными вакуумными покрытиями на основе нитрида, карбида, карбонитрида титана, хрома, циркония.

Методика исследований

В качестве объекта исследований использовали покрытия AlTiN(C,F). Нанесение покрытий осуществлялось в вакуумной установке УВНИПА-1-001, оборудованной катодно-дуговым испарителем с системой электромагнитной фильтрации плазмы, а также ионным источником ИИ-4-0,15. Для удаления тонкого приповерхностного слоя толщиной порядка 100–300 нм, содержащего загрязнения, перед нанесением покрытия образцы подвергались интенсивной обработке высокоэнергетичными ионами аргона. При этом происходит нагрев поверхностей до 450 °С, разрушение окисных плёнок и частичное удаление растворённых в металле газов. В качестве подложек использовали сталь 45. Поверхность подложек из стали подвергали шлифовке и полировке до чистоты не ниже 8–10 класса.

Обработка проводилась при следующих параметрах: давление аргона в вакуумной камере $1,5 \times 10^{-2}$ Па, ток фокусирующего

соленоида 3,0 А, ускоряющее напряжение 3500 В при токе 0,06 А. Время ионно-лучевой обработки составляло 30 мин. Для повышения эффективности ионно-лучевой очистки и увеличения глубины проникновения ионов аргона на обрабатываемые изделия подавался отрицательный электрический потенциал 800–1500 В. Осаждение покрытия проводилось при токе стабилизирующей катушки 1,7 А, токе управляющей катушки 2,0 А и токе дуги 90 А. Давление реакционного газа (азот) находилось в пределах $(0,87–5) \times 10^{-2}$ Па.

Условия формирования покрытий в зависимости от номера субстрата следующие: покрытие на образце № 1 – слой AlTiN; № 2 – слой AlTiN(C,F) (ток 55 А, напряжение смещения минус 100 В); № 3 – слой AlTiN(C,F) (ток 55 А, напряжение смещения минус 50 В).

Для измерения микротвёрдости покрытий, сформированных на металлах, использовали микротвердомер HWMMT-X7. Принцип действия прибора основан на изменении линейной величины диагонали отпечатка с, полученного от вдавливания алмазной пирамиды в исследуемый материал под определенной нагрузкой. Морфологию покрытий исследовали на атомно-силовом микроскопе NT-206 производства ОДО «Микротестмашины» г. Гомель. Топографию защитных слоев определяли на профилометре «SurfTest SJ-210».

Методом скретч-анализа определяли адгезионные характеристики покрытий. На индентор прикладывалась нагрузка от 1 Н до 30 Н, с постепенным возрастанием значений. Длина царапины составляла 10 мм.

Триботехнические исследования проводили на машине трения типа FT-2, которая работает по схеме возвратно-поступательного движения, длина хода индентора от 5–50 мм в условиях сухого трения (контртела), выполненного из стали и отшлифованного на ровной плоской поверхности наждачной шкуркой или шлифовальной пастой до среднего арифметического отклонения профиля поверхности $R_a = 0,1–0,3$ мкм.

Оценку параметров поверхностной энергии образцов проводили по величине краевого угла смачивания (метод «неподвижной капли»). В соответствии с методикой исследования определяли значения краевого угла смачивания как минимум двух жидкостей с известными значениями параметра γ на твердой поверхности. Значения параметра γ твердого тела оцениваются на основе теоретических моделей Юнга, Оунса-Вендта, Неймана или Ву. В качестве жидкостей, применяемых для исследований, использовали дистиллированную воду и вазелиновое масло.

Статистическую обработку экспериментальных данных осуществляли стандартными методами математической статистики, определяя значения среднеквадратичного отклонения и границы доверительных интервалов по критерию Стьюдента при уровне надежности 0,95. Число параллельных испытаний во всех экспериментах составляло не менее 5.

Результаты исследований

Среди известных методов определения значений удельной поверхностной энергии наиболее часто используется метод «сидячей» капли из-за его простоты [9]. Разработки в области оптической визуализации и отслеживания линии контакта с помощью компьютерных технологий позволяют использовать метод «сидячей» капли для получения информации не только о краевых углах контакта, но и об эволюции капли на поверхности. Однако у метода «сидячей» капли есть несколько ограничений, влияющих на ее точность, из-за химических и морфологических характеристик твердой поверхности, таких как гладкость, шероховатость, неоднородность химического состава, дефекты, а также из-за методики проведения эксперимента и интерпретации результатов [10, 11].

Проведены исследования по определению краевого угла смачивания покрытий на основе алтинов, сформированных на стали 45 (таблицы 1, 2).

Таблица 1 – Значения удельной поверхностной энергии стали 45

Параметр	Значение
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	57,64
Работа адгезии воды, мДж	122,75
Дисперсионный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	31,95
Полярный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	151,10
Поверхностная энергия, мДж/м ²	183,05

Таблица 2 – Значения удельной поверхностной энергии покрытий, сформированных на стали 45

Параметр	Значение			
	AlTiN(C,F) (U = –100 В)	AlTiN(C,F) (U = –50 В)	AlTiN	AlTiCN
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	53,58	55,77	53,90	53,73
Работа адгезии воды, мДж	94,20	104,41	99,03	98,92
Дисперсионный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	6,86	12,72	10,24	10,34
Полярный компонент поверхностной энергии, мДж/м ²	69,02	92,99	81,49	81,52
Поверхностная энергия, мДж/м ²	75,88	105,71	91,72	91,86

Согласно полученным данным формирование покрытий на основе алтинов снижает значения удельной поверхностной энергии (УПЭ) модифицируемого стального субстрата. Это может быть объяснено исходя из высоких адгезионных характеристик изучаемых покрытий к стальной подложке. Так как известно эмпирическое правило, чем больше значения удельной поверхностной энергии на границе раздела фаз покрытие–подложка, тем меньше значения удельной поверхностной энергии на границе раздела «жидкость – покрытие».

Покрытие, полученное на основе многокомпонентного соединения AlTiN(C,F), обладает наименьшими значениями удельной поверхностной энергии в исследуемой серии образцов. Необходимо отметить, что данный эффект зависит от напряжения смещения, подаваемого на катод при формировании покрытий (таблица 2).

Результаты исследований адгезионных характеристик покрытий на базе алтинов, полученные методом скретч-анализа, представлены на рисунках 1–4.



Рисунок 1 – Скретч-анализ покрытия AlTiN



Рисунок 2 – Скретч-анализ покрытия AlTiCN



Рисунок 3 – Скретч-анализ покрытия AlTiN(C,F) (U = –50 В)



Рисунок 4 – Скретч-анализ покрытия AlTiN(C,F) (U = –100 В)

Проведенный скретч-анализ подтверждает результаты исследований, проведенных методом краевого угла смачивания по определению адгезионных характеристик покрытий на базе алтинов. Наиболее оптимальными адгезионными характеристиками к стальным субстратам из исследуемой серии образцов обладают покрытия состава AlTiN(C,F).

Вакуумные покрытия на основе алтинов, сформированные при заданных условиях и соответствующей подготовке, обладают повышенными прочностными характеристиками, в частности значения твердости достигают HV = 30 – 40 ГПа, что в 2–3 раза выше твердости других вакуумных металлических покрытий.

Обычно в результате получения данных защитных слоев возможно достижение более низких температур, коэффициента трения в контактной зоне, уменьшается адгезионное взаимодействие в трибоконтакте. Необходимо отметить, что помимо высоких прочностных характеристик данные защитные слои обладают высокой стойкостью к воздействию коррозионной среды. Это обусловлено наличием алюминия в структуре покрытия, что может приводить к образованию защитных оксидных слоев в поверхностных слоях, которые обладают повышенной стойкостью к действию внешней агрессивной среды.

Проведены исследования по определению микротвердости покрытий на основе алтинов: AlTiN, AlTiCN, AlTiN(C,F) (U = 50 В), AlTiN(C,F) (U = –100 В) (рисунки 5–12).

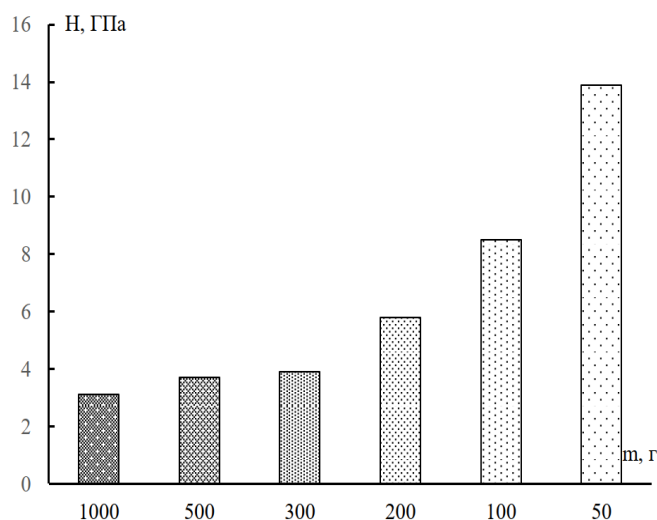


Рисунок 5 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiN, сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Виккерсу)

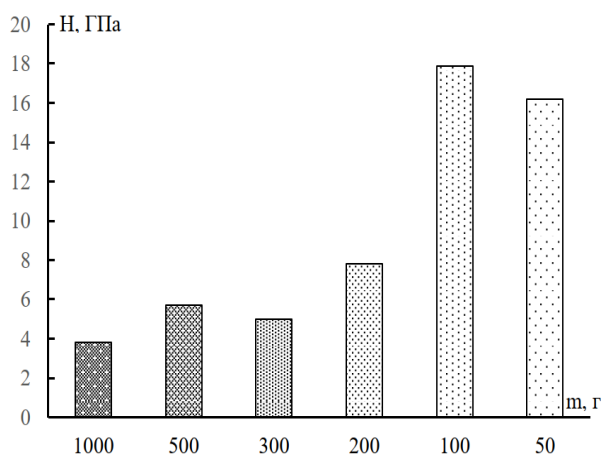


Рисунок 6 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiN, сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Кнуппу)

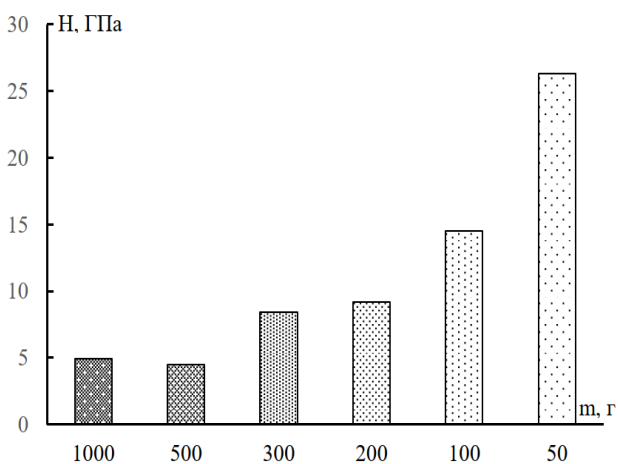


Рисунок 7 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiN(C,F) ($U = -100$ В), сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Кнуппу)

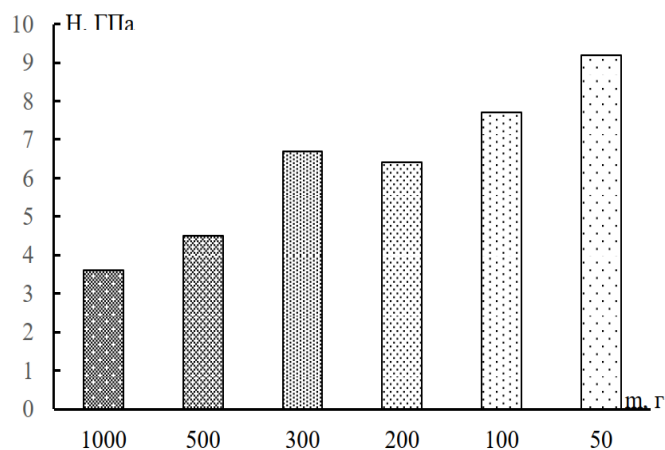


Рисунок 8 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiN(C,F) ($U = -100$ В), сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Виккерсу)

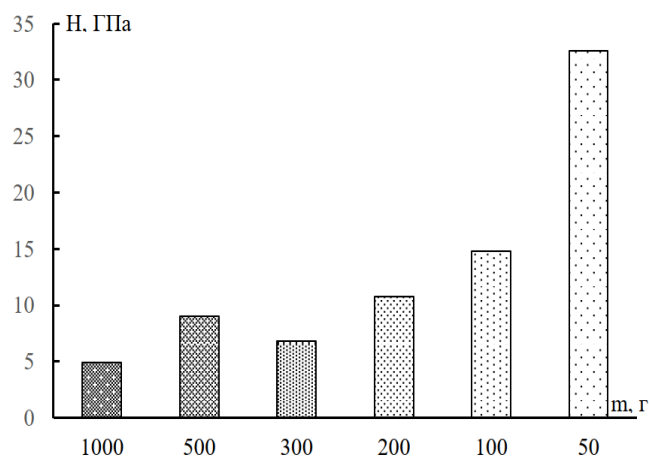


Рисунок 9 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiCN, сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Кнуппу)

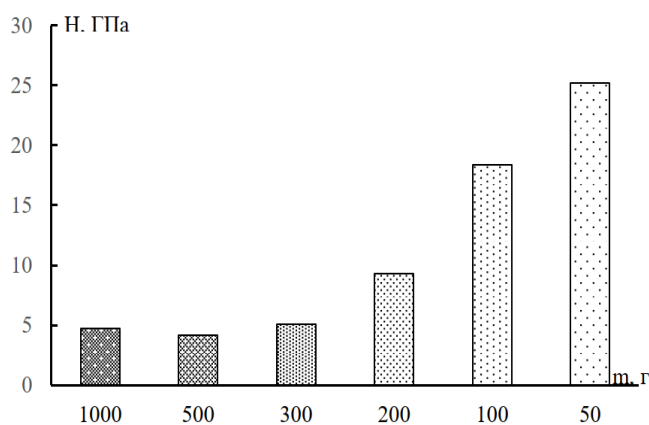


Рисунок 10 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiCN, сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Виккерсу)

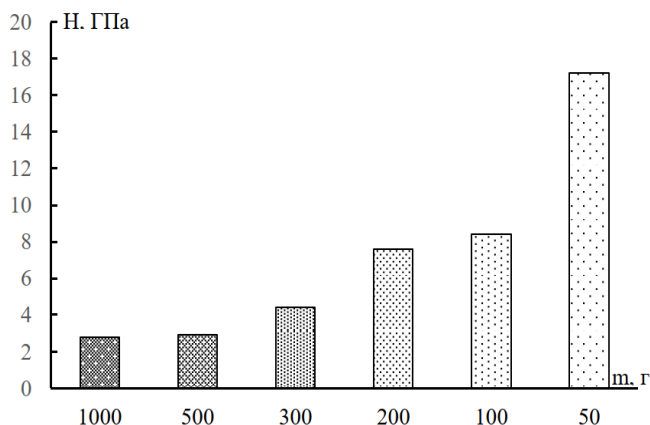


Рисунок 11 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiN(C,F) ($U = -50$ В), сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Кнуппу)

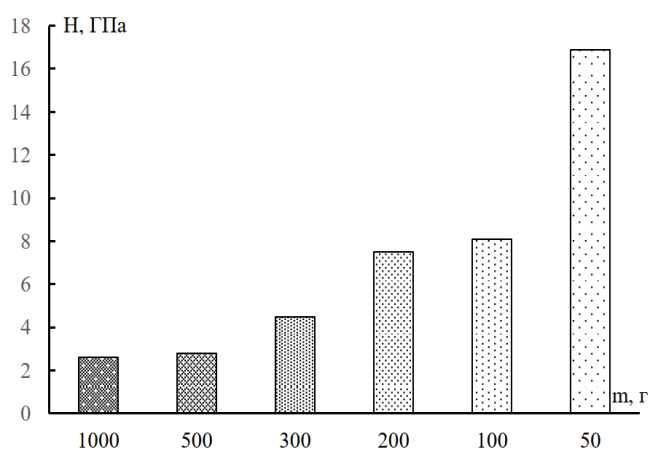


Рисунок 12 – Зависимость микротвердости покрытия AlTiN(C,F) ($U = -50$ В), сформированного на стали 45 от нагрузки на индентор (результаты получены методом микроиндентирования по Виккерсу)

Проведенные исследования по определению значений микротвердости покрытий на основе алтинов, модифицированных фтором и углеродом показали, что нанесение высокоэнтропийных соединений существенно увеличивает прочностные характеристики модифицируемой стали в поверхностных слоях. Значения микротвердости исследуемых стальных образцов находятся в пределах от 2,8 ГПа до 3,2 ГПа. Формирование композиционных покрытий на основе алтинов приводит к значительному увеличению микротвердости. Наибольшими значениями микротвердости обладают покрытия, в составе которых есть такие химические элементы, как углерод и фтор.

Заключение

Проведен расчет значений удельной поверхностной энергии стальных субстратов и определены значения УПЭ для композиционных покрытий на основе алтинов, сформированных на данных подложках.

Формирование покрытий на основе алтинов, допированных фтором и углеродом на стальной подложке, приводит к увеличению значений микротвердости многослойных композиционных покрытий по сравнению с исходными покрытиями алтинов. Данный эффект возможно объяснить, исходя из увеличения количества активных зарядовых центров (АЗЦ) на поверхности подложки вследствие использования многокомпонентных покрытий. Увеличение количества АЗЦ приводит к увеличению дисперсности фаз, содержащихся в структуре покрытия, что сказывается на прочностных характеристиках покрытий.

Нанесение высокоэнтропийных соединений на основе алтинов, модифицированных фтором и углеродом, существенно увеличивает прочностные характеристики модифицируемой стали в поверхностных слоях. Установлено, что значения микротвердости исследуемых стальных образцов находятся в пределах от 2,8 ГПа до 3,2 ГПа в зависимости от условий проведения испытаний по определению параметров микротвердости. Формирование композиционных покрытий на основе алтинов, в общем случае приводит к увеличению значений микротвердости от 4 до 10 раз в зависимости от типа покрытия. Наибольшими значениями микротвердости обладают покрытия, в составе которых есть такие химические элементы как углерод и фтор. Возможно, в структуре вакуумных покрытий образуются высокоэнтропийные фазы и МАХ-фазы, которые обладают повышенными физико-механическими характеристиками в сравнении с исходными покрытиями и металлическим субстратом.

Список цитированных источников

1. Гибридные методы формирования тонкослойных вакуумных покрытий / Н. М. Чекан, Е. В. Овчинников, И. П. Акула, Е. И. Эйсымонт // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 1. – С. 80–88.
2. Комбинированные методы повышения износостойкости металлообрабатывающего инструмента / В. В. Гаврилова, Р. А. Трушель, М. В. Ищенко [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2015. – № 4. – С. 55–63.
3. Высокотемпературные многослойные покрытия на основе многокомпонентных соединений / Е. В. Овчинников, Н. М. Чекан, В. Г. Барсуков [и др.] // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2017. – Т. 7, № 2. – С. 6–17.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Eral, H. B. Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications / H. B. Eral, D. J. C. M. 'T Manneetje, J. M. Oh // Colloid Polym. Sci. – 2013. – Vol. 291. – P. 247–260.
10. Feldmann, D. How droplets move on surfaces with directional chemical heterogeneities / D. Feldmann, B. El Pinchasik // J. Phys. Chem. Lett. – 2021. – Vol. 12. – P. 11703–11709.
11. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements / T. Huhtamäki, Xuelin Tian, Juuso Korhonen, R. H. A. Ras // Nat. Protoc. – 2018. – Vol. 13. – P. 1521–1538. – DOI: 10.1038/s41596-018-0003-z.
12. Controllable high adhesion and low friction coefficient in TiAlCN coatings by tuning the C/N ratio / Xianliang Li, Guojian Li, Wenzhang Lü [et al.] // Appl. Surf. Sci. – 2022. – Vol. 597. – 153542. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.153542.
13. Effects of C content on the microstructure, mechanical and tribological properties of TiAlSiCN coatings / Biao Huang, Li Chen, Dan-Dan Liang [et al.] // Vacuum. – 2023. – Vol. 216. – 112488. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112488.

14. Multifunctional nanolaminated PVD coatings in the system Ti–Al–N–C by combination of metastable fcc phases and nanocomposite microstructures / M. Stueber, U. Albers, H. Leiste [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2006. – Vol. 200, Iss. 22–23. – P. 6162–6171. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.11.012.
15. Improvement on the mechanical, tribological properties and cutting performance of AlTiN-based coatings by compositional and structural design / Huadong Zhang, Fangsheng Mei, Yang Yu [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2021. – Vol. 422. – 127503. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127503.
16. Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS / Wolfgang Tillmann, Diego Grisales, Dominic Stangier [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2021. – Vol. 406. – 126664. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126664.
17. Improved properties of TiAlN coatings through the multilayer structure / A. Rizzo, L. Mirengi, M. Massaro [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2013. – Vol. 235. – P. 475–483. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.08.006.
18. Syntheses and characterization of TiC/a: C composite coatings using pulsed closed field unbalanced magnetron sputtering (P-CFUBMS) / J. Lin, J.J. Moore, B. Mishra [et al.] // *Thin Solid Films.* – 2008. – Vol. 517, Iss. 3. – P. 1131–1135. – DOI: 10.1016/j.tsf.2008.07.021.
19. Study of C–N binding states in carbon nitride films deposited by reactive XeCl laser ablation / E. D'Anna, M. L. De Giorgi, A. Luches [et al.] // *Thin Solid Films.* – 1999. – Vol. 347, Iss. 1–2. – P. 72–77. – DOI: 10.1016/S0040-6090(98)01734-9.
20. Tensile and compressive stresses in Cu/W multilayers: correlation with microstructure, thermal stability, and thermal conductivity / Giacomo Lorenzin, Md Shafkat Bin Hoque, Daniel Ariosa [et al.] // *Acta Mater.* – 2022. – Vol. 240. – 118315. – DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118315.
21. Williamson, G. K. X-ray line broadening from fcc aluminium and wolfram / G. K. Williamson, W. H. Hall // *Acta Metall.* – 1953. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 22–31. – DOI: 10.1016/0001-6160(53)90006-6.
22. Effects of tailored nitriding layers on comprehensive properties of duplex plasma-treated AlTiN coatings / Yang Deng, Chaolin Tan, Yi Wang [et al.] // *Ceram. Int.* – 2017. – Vol. 43, Iss. 12. – P. 8721–8729. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.03.209.
8. Ovchinnikov, E. V. Tribotekhnicheskie karakteristiki 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.
9. Eral, H. B. Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications / H. B. Eral, D. J. C. M. 'T Mannetje, J. M. Oh // *Colloid Polym. Sci.* – 2013. – Vol. 291. – P. 247–260.
10. Feldmann, D. How droplets move on surfaces with directional chemical heterogeneities / D. Feldmann, B. El Pinchasik // *J. Phys. Chem. Lett.* – 2021. – Vol. 12. – P. 11703–11709.
11. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements / T. Huhtamäki, Xuelin Tian, Juuso Korhonen, R. H. A. Ras // *Nat. Protoc.* – 2018. – Vol. 13. – P. 1521–1538. – DOI: 10.1038/s41596-018-0003-z.
12. Controllable high adhesion and low friction coefficient in TiAlCN coatings by tuning the C/N ratio / Xianliang Li, Guojian Li, Wen-zhang Lü [et al.] // *Appl. Surf. Sci.* – 2022. – Vol. 597. – 153542. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.153542.
13. Effects of C content on the microstructure, mechanical and tribological properties of TiAlSiCN coatings / Biao Huang, Li Chen, Dan-Dan Liang [et al.] // *Vacuum.* – 2023. – Vol. 216. – 112488. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112488.
14. Multifunctional nanolaminated PVD coatings in the system Ti–Al–N–C by combination of metastable fcc phases and nanocomposite microstructures / M. Stueber, U. Albers, H. Leiste [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2006. – Vol. 200, Iss. 22–23. – P. 6162–6171. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.11.012.
15. Improvement on the mechanical, tribological properties and cutting performance of AlTiN-based coatings by compositional and structural design / Huadong Zhang, Fangsheng Mei, Yang Yu [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2021. – Vol. 422. – 127503. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127503.
16. Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS / Wolfgang Tillmann, Diego Grisales, Dominic Stangier [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2021. – Vol. 406. – 126664. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126664.
17. Improved properties of TiAlN coatings through the multilayer structure / A. Rizzo, L. Mirengi, M. Massaro [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2013. – Vol. 235. – P. 475–483. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.08.006.
18. Syntheses and characterization of TiC/a: C composite coatings using pulsed closed field unbalanced magnetron sputtering (P-CFUBMS) / J. Lin, J.J. Moore, B. Mishra [et al.] // *Thin Solid Films.* – 2008. – Vol. 517, Iss. 3. – P. 1131–1135. – DOI: 10.1016/j.tsf.2008.07.021.
19. Study of C–N binding states in carbon nitride films deposited by reactive XeCl laser ablation / E. D'Anna, M. L. De Giorgi, A. Luches [et al.] // *Thin Solid Films.* – 1999. – Vol. 347, Iss. 1–2. – P. 72–77. – DOI: 10.1016/S0040-6090(98)01734-9.
20. Tensile and compressive stresses in Cu/W multilayers: correlation with microstructure, thermal stability, and thermal conductivity / Giacomo Lorenzin, Md Shafkat Bin Hoque, Daniel Ariosa [et al.] // *Acta Mater.* – 2022. – Vol. 240. – 118315. – DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118315.
21. Williamson, G. K. X-ray line broadening from fcc aluminium and wolfram / G. K. Williamson, W. H. Hall // *Acta Metall.* – 1953. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 22–31. – DOI: 10.1016/0001-6160(53)90006-6.
22. Effects of tailored nitriding layers on comprehensive properties of duplex plasma-treated AlTiN coatings / Yang Deng, Chaolin Tan, Yi Wang [et al.] // *Ceram. Int.* – 2017. – Vol. 43, Iss. 12. – P. 8721–8729. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.03.209.

References

1. Gibrinnye metody formirovaniya tonkoslojnyh vakuumnyh pokrytij / N. M. CHekan, E. V. Ovchinnikov, I. P. Akula, E. I. Ejsymont // *Gornaya mekhanika i mashinostroyeniye.* – 2019. – № 1. – S. 80–88.
2. Kombinirovannyye metody povysheniya iznosostoykosti metalloobrabatyvayushchego instrumenta / V. V. Gavrilova, R. A. Trushel', M. V. Ishchenko [i dr.] // *Gornaya mekhanika i mashinostroyeniye.* – 2015. – № 4. – S. 55–63.
3. Vysokotemperaturnyye mnogoslojnyye pokrytiya na osnove mnogokomponentnyh soedinenij / E. V. Ovchinnikov, N. M. CHekan, V. G. Barsukov [i dr.] // *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni YAnki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika.* – 2017. – T. 7, № 2. – S. 6–17.
4. 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.
5. Fiziko-mekhanicheskie karakteristiki 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.
6. Energeticheskie karakteristiki 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.
7. Nanokompozicionnyye pokrytiya, formiruemye na baze soedinenij AlTiN / E. V. Ovchinnikov, N. M. CHekan, I. P. Akula, E. I. Ejsymont // *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroyeniya.* – 2013. – T. 13, № 1. – S. 15–18.

Материал поступил 10.02.2025, одобрен 22.02.2025, принят к публикации 22.02.2025

УДК 621.833

СНИЖЕНИЕ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ МОТОР-РЕДУКТОРОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ВХОДНОГО И ВЫХОДНОГО ВАЛОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕДАЧ ЭКСЦЕНТРИКОВОГО ТИПА

П. Н. Громыко¹, С. Н. Хатетовский², П. С. Гончаров³, А. В. Мельников⁴

¹ Д. т. н., профессор, профессор кафедры металлорежущих станков и инструментов МОУВО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь, e-mail: grom_7@tut.by

² К. т. н., доцент, заведующий кафедрой металлорежущих станков и инструментов МОУВО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь, e-mail: mechlab@yandex.ru

³ К. т. н., ведущий инженер-конструктор, ООО «РНД Технологии», Минск, Беларусь, e-mail: molekul@mail.ru

⁴ Студент машиностроительного факультета кафедры металлорежущих станков и инструментов МОУВО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь, e-mail: work.alexandr.mel@gmail.com

Реферат

При проектировании цилиндрических мотор-редукторов с параллельными валами с передаточными отношениями 15 и более необходимо использовать как минимум двухступенчатые зубчатые передачи, которые приводят к увеличению как осевых, так и диаметральных размеров механического привода в целом. В данной работе предлагается в конструкции механического привода заменить цилиндрический мотор-редуктор с эвольвентным зацеплением на мотор-редуктор с эксцентриковой передачей с тремя одновременно работающими сателлитами.

На основе кинематической структурной схемы эксцентриковой передачи с параллельными валами разработана компьютерная модель, благодаря которой было установлено, что кинематическая погрешность угла поворота выходного вала не превышает значений более 0,25 угловых минут, а среднее значение КПД зацепления колеблется на уровне 98,6 %.

Компьютерные исследования нормальных сил в зацеплении эксцентриковой передачи позволили получить предварительную оценку габаритных размеров проектируемой эксцентриковой передачи и разработать эксцентриковый мотор-редуктор.

Сравнительный анализ цилиндрического и эксцентрикового мотор-редукторов, имеющие схожие выходные показатели как по КПД, так и по кинематической погрешности выходного вала, показали, что габаритные размеры эксцентрикового редуктора более чем в 2 раза меньше, чем габаритные размеры аналогичного по мощности и выходному моменту цилиндрического редуктора с эвольвентным зацеплением.

Ключевые слова: габаритные размеры мотор-редукторов, эксцентриковая передача с параллельным расположением входного и выходного валов, коэффициент полезного действия, поступательно движущийся сателлит, центральное колесо, механические потери в зацеплении.

REDUCTION OF OVERALL DIMENSIONS OF GEARED MOTORS WITH PARALLEL ARRANGEMENT OF INPUT AND OUTPUT SHAFTS BASED ON THE USE OF ECCENTRIC-TYPE GEARS

P. N. Gromyko, S. N. Khatetovsky, P. S. Goncharov, A. V. Melnikov

Abstract

When designing cylindrical gearmotors with parallel shafts and gear ratios of 15 or more, it is necessary to use at least two-stage gear transmissions, which lead to an increase in both axial and radial dimensions of the mechanical drive as a whole. In this work, it is proposed to replace the cylindrical gearmotor with involute gearing in the mechanical drive design with a gearmotor featuring an eccentric transmission with three simultaneously operating satellites.

Based on the kinematic structural diagram of the eccentric transmission with parallel shafts, a computer model was developed. This model revealed that the kinematic error in the rotation angle of the output shaft does not exceed 0,25 arc minutes, and the average efficiency of the gearing is around 98,6 %.

Computer studies of the normal forces in the eccentric transmission gearing allowed for a preliminary assessment of the overall dimensions of the designed eccentric transmission and the development of an eccentric gearmotor.

A comparative analysis of cylindrical and eccentric gearmotors with similar output characteristics, both in terms of efficiency and kinematic error of the output shaft, showed that the overall dimensions of the eccentric gearmotor are more than two times smaller than those of a cylindrical gearmotor with involute gearing of similar power and output torque.

Keywords: overall dimensions of geared motors, eccentric transmission with parallel arrangement of input and output shafts, efficiency factor, translationally moving satellite, central wheel, mechanical losses in meshing.

Введение

Конвейерное, грузоподъемное, валовое и транспортировочное оборудование, установки для перемешивания, измельчители, экс-трудеры и т. д. – это различные области для применения мотор-редукторов с параллельными валами.

В настоящее время известны двухступенчатые, трехступенчатые, четырехступенчатые, пятиступенчатые и шестиступенчатые цилиндрические мотор-редукторы с параллельными валами с необходимым количеством совмещенных ступеней зубчатых передач. Они изготавливаются на базе эвольвентного зацепления с широким набором передаточных отношений с передаваемыми крутящими моментами от 100 Н·м до 15000 Н·м и подводимыми эффективными мощностями от 0,5 кВт до 160 кВт. В мотор-редукторах этого типа используется прецизионная обработка зубчатых колес, которая гарантирует высокую точность и одновременно повышенную плавность хода [1].

Достоинствами цилиндрических мотор-редукторов являются высокий КПД, высокая кинематическая точность, низкий уровень вибрационных и шумовых характеристик, высокая эксплуатационная надежность, высокая устойчивость к большим радиальным и осевым нагрузкам.

При проектировании цилиндрических мотор-редукторов с параллельными валами с передаточными отношениями от 15 и более необходимо использовать, как минимум, двухступенчатые зубчатые передачи, которые приводят к увеличению как осевых, так и диаметральных размеров.

Поэтому основным недостатком указанных мотор-редукторов являются большие габаритные размеры, которые приводят не только к созданию крупногабаритных приводных устройств, но и к увеличению себестоимости изделия в целом.

Предложено заменить конструкцию цилиндрического мотор-редуктора с параллельными валами и эвольвентным зацеплением на эксцентриковый мотор-редуктор с тремя одновременно работающими сателлитами [2–13].

Мотор-редуктор с параллельным расположением валов на основе передачи эксцентрикового типа

Рассмотрим кинематическую схему эксцентриковой передачи, показанную на рисунках 1, 2.

Отличительной особенностью эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов является многопарность зацепления, обеспечиваемая за счет добавления в контактное зацепление трех сателлитов, расположенных относительно друг друга с угловым смещением, равным 120° [3–6].

Эксцентриковая передача содержит входной вал 1, расположенный на неподвижных подшипниковых опорах C и D , на котором жестко посажены эксцентриковые кривошипы 2, 3, 4, составляющие вращательную пару с отверстиями сателлитов 5, 6, 7 (рисунок 1). Сателли-

ты 5, 6, 7 благодаря наличию вращательных пар между отверстиями сателлитов 5, 6, 7 и эксцентриковыми валами дополнительных кривошипов 12, 13, 14, размещенных на дополнительных осях, которые расположены на неподвижных опорах K и M (ось 11), совершают поступательное движение. Причем сателлиты 5, 6, 7, получающие вращение от основных кривошипов 2, 3, 4 входного вала 1, совершают разнонаправленное поступательное движение (рисунок 2). Каждый из сателлитов 5, 6, 7 имеет внутренние зубчатые венцы 8, 9, 10, которые одновременно взаимодействуют с наружным зубчатым колесом 15. Наружное зубчатое колесо 15 закреплено на выходном валу 16.

На основе приведенной выше кинематической схемы эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов разработана компьютерная модель, показанная на рисунке 3.

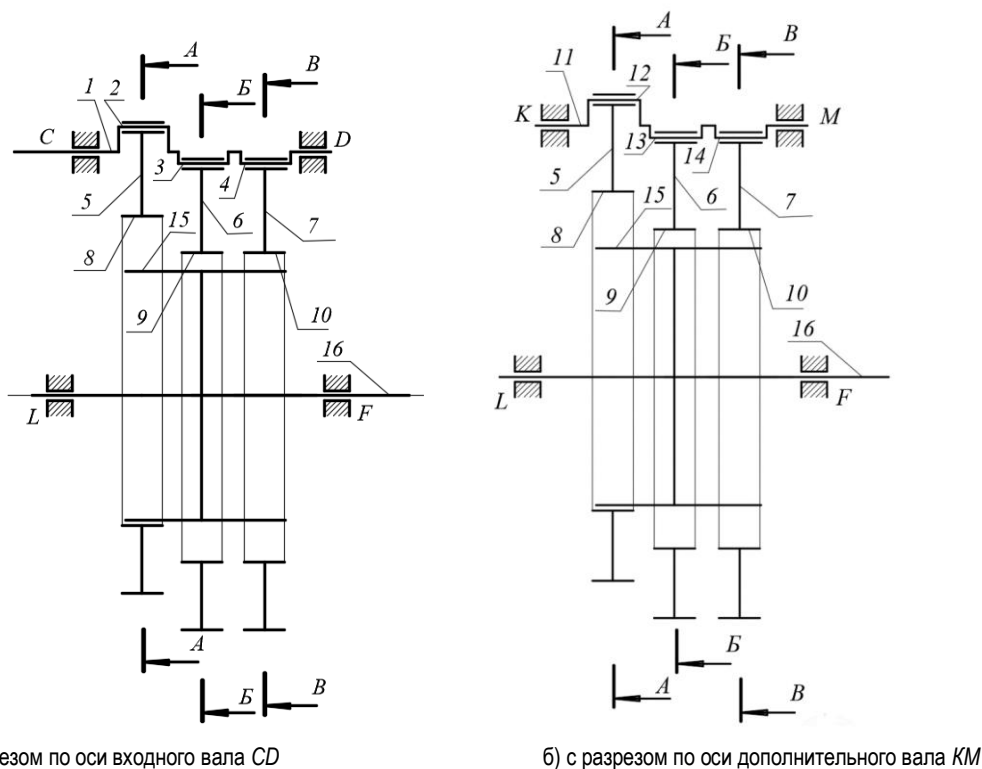


Рисунок 1 – Структурная схема эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов с тремя эксцентриковыми кривошипами и тремя сателлитами

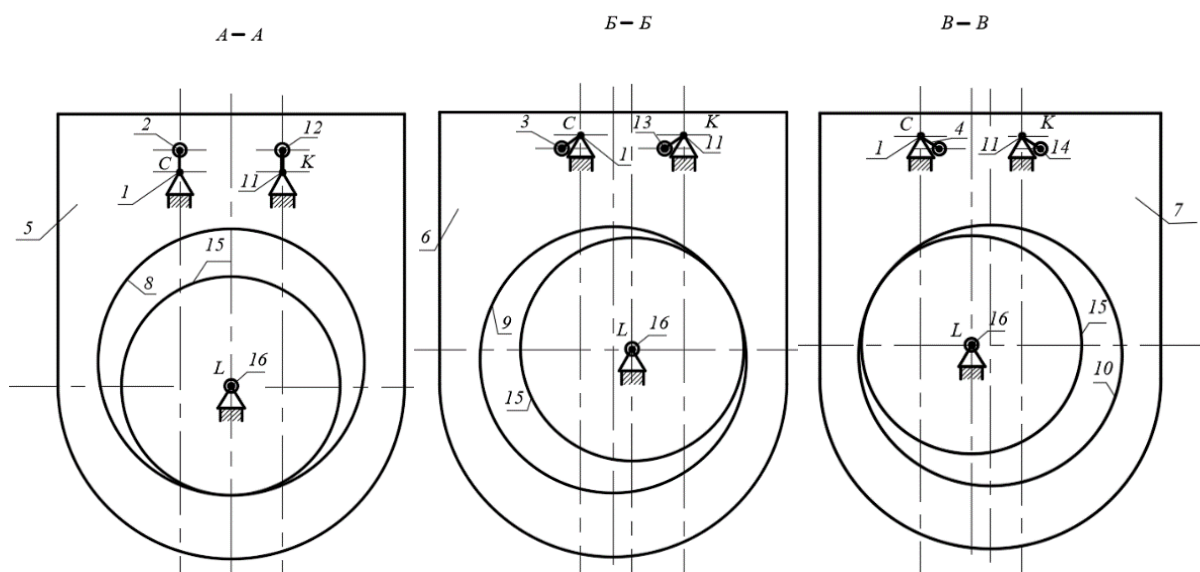


Рисунок 2 – Разрезы $A-A$, $B-B$ и $B-B$

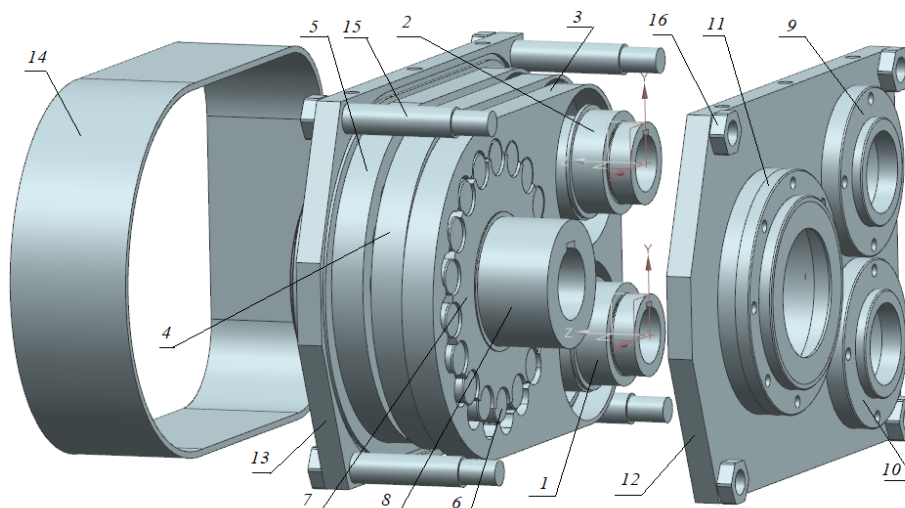


Рисунок 3 – Компьютерная модель эксцентрикового редуктора с параллельным расположением входного и выходного валов

На эксцентриках входного вала 1 размещены с помощью подшипников (не показаны) на неподвижных крышках 10 сателлиты 3, 4 и 5. В отверстиях сателлитов 3, 4 и 5 расположены подшипники (не показаны), внутри которых имеются эксцентрики с дополнительным валом 2. Вращение от эксцентриков входного вала 1 благодаря вращению дополнительного вала 2 передается сателлитам 3, 4 и 5, которые в результате совершают поступательное движение. Причем эксцентрики на входном валу 1 размещены с угловым смещением, равным 120° . Таким образом, сателлиты 3, 4 и 5 при поступательном движении также находятся друг относительно друга с угловым смещением, равным 120° . На внутренних поверхностях сателлитов 3, 4 и 5 имеются зубчатые венцы, входящие в зацепление с роликами 6, расположенными в пазах ведомого колеса 7. Ведомое колесо 7 жестко соединено с выходным валом 8. Входной вал 1, дополнительный вал 2, а также ведомый вал 8 вращаются в подшипниковых опорах (не показаны), которые установлены с двух сторон в крышках 9, 10, 11. Крышки 9, 10, 11 жестко крепятся на правом 12 и левом 13 основании корпуса. Правое 12 и левое 13 основания корпуса жестко посажены на четырех неподвижных осях 15 с помощью гаек 16. Все детали эксцентрикового редуктора размещены в кожухе 14.

Предварительная оценка габаритных размеров проектируемой эксцентриковой передачи на основе исследований компьютерных моделей

Определение основных размеров эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов возможно на основе значений нормальных сил N , возникающих в контакте роликов 6, расположенных в пазах ведомого колеса 7, с внутренними зубьями сателлитов 3, 4, 5 (рисунок 3).

На основе компьютерных исследований эксцентриковой передачи, разработанной с учетом рассчитанных геометрических параметров в работах [3–4] при использовании мощности входного электродвигателя 1 кВт, передаточным отношением редуктора равным 19, при значении выходного момента 200 Н·м, получено максимальное значение нормальной силы $N_{\max} = 2300$ Н.

В основу проверочного расчета была взята формула, используемая для определения величины контактных напряжений в цилиндрической зубчатой передаче с внутренним зацеплением зубьев [14–17].

$$\sigma_H = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{N_{\max} \cdot K \cdot E}{h_c \cdot \rho_{np} \cdot \cos \alpha}}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости ($E = 2,185 \cdot 10^5$ МПа для стали 40Х);

α – угол зацепления (среднее значение составляет 20°);

h_c – рабочая ширина каждого зубчатого венца сателлита 4 может определяться на основе длины роликов 6 и зазоров между зубчатыми венцами ($h_c = 25$ мм);

K – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки между зубьями и по ширине зуба ($K=1$).

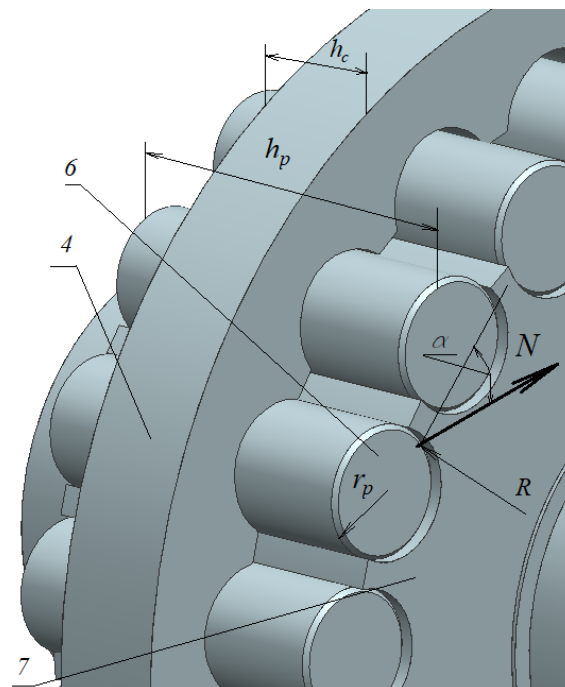


Рисунок 4 – Нормальная сила N в зацеплении роликов 6, расположенных в пазах ведомого колеса 7, с внутренними зубьями сателлита 4

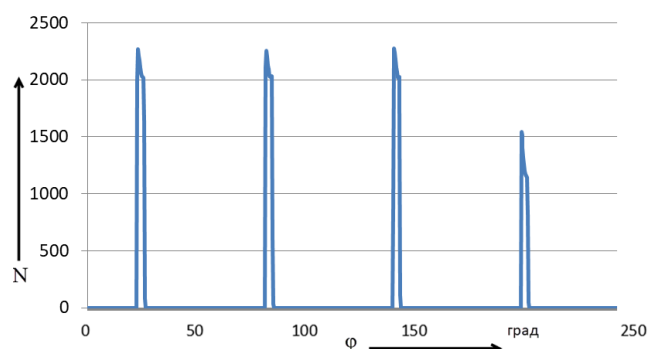


Рисунок 5 – Зависимость нормальных сил в зацеплении роликов 6 выходного колеса с внутренними зубьями 4 одного из сателлитов от угла поворота входного вала

ρ_{np} – приведенный радиус кривизны зубьев, может быть определен по формуле

$$\rho_{np} = \frac{u \cdot r_p}{u - 1} \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

где u – передаточное отношение эксцентрикового редуктора, определяемое количеством роликов ($u = 19$);

r_p – радиус ролика передачи ($r_p = 10$ мм).

То есть значение $\rho_{np} = 3,61$ мм.

Таким образом, подставляя выше полученные значения в формулу (1), получим

$$\sigma_H = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{2400 \cdot 1 \cdot 2,185 \cdot 10^5}{25 \cdot 3,61 \cdot \cos 20^\circ}} = 1039 \text{ МПа}.$$

Согласно требованию обеспечения контактной прочности должно соблюдаться следующее условие

$$[\sigma_H] > \sigma_H, \quad (3)$$

где $[\sigma_H]$ – допускаемое контактное напряжение для стали 40Х равно 1050 МПа.

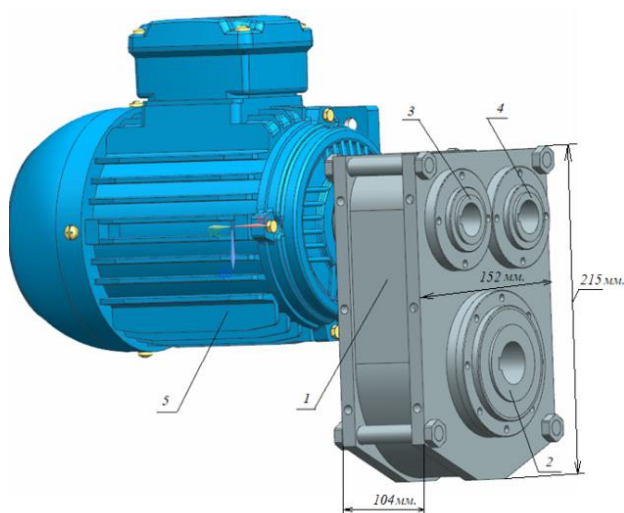
Если указанное условие (3) не соблюдается, то требуется увеличивать рабочую ширину h_c каждого из зубчатых венцов сателлитов 4, что естественно и увеличивает осевой габарит эксцентрикового

редуктора. Возможно также решение условия (3) путем увеличения радиуса R зацепления эксцентриковой передачи с учетом взаимосвязей между параметрами величины эксцентриситета, радиусом роликов [3–4], что конечно неизменно ведет к увеличению диаметральных размеров эксцентриковой передачи (см. рисунок 4).

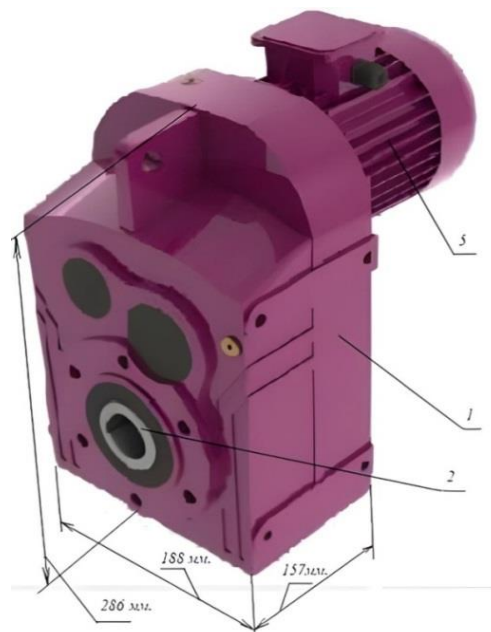
Возможности компьютерных исследований эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов позволяют также определить погрешность угла поворота выходного вала, которая в нашем случае не превышает 0,25 угловых минут, и среднее значение КПД колеблется на уровне 98,6% [3, 4, 9].

Таким образом, с некоторым приближением (формула 1) еще на стадии проектирования эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов можем определить ее основные габаритные размеры, которые составляют – длина 152 мм, ширина 215 мм и высота 104 мм (рисунок 6а).

Сравнительный анализ размеров эксцентрикового мотор-редуктора, рассчитанного на основе приближенного прочностного расчета по формуле (1), и размеров цилиндрического мотор-редуктора с эвольвентным зацеплением цилиндрических колес марки DR272 (мощность электродвигателя 1,1 кВт, передаточное отношение 22,63 при значении выходного момента 163 Н·м) показан на рисунке 6а и рисунке 6б.



а) эксцентриковый мотор-редуктор



б) цилиндрический мотор-редуктор с эвольвентным зацеплением зубчатых колес марки DR272

1 – редуктор; 2 – выходной вал; 3, 4 – входной и дополнительный валы; 5 – электродвигатель

Рисунок 6 – Мотор-редукторы с параллельным расположением входного и выходного валов

Заключение

Сравнительный анализ цилиндрического и эксцентрикового мотор-редукторов, имеющих близкие по выходным показателям значения КПД и кинематические погрешности выходного вала, позволяет сделать вывод, что габаритные размеры эксцентрикового редуктора (152*215*104 мм) (рисунок 6а) более чем в 2 раза меньше, чем аналогичный по мощности и выходному моменту цилиндрический редуктор с эвольвентным зацеплением (188*286*157 мм) (рисунок 6б).

Снижение габаритных размеров эксцентрикового редуктора по сравнению с габаритными размерами цилиндрического редуктора с эвольвентным зацеплением возможно благодаря применению в эксцентриковом редукторе трехпоточной схемы нагружения.

Следует отметить, что диаметральный размер эксцентриковой передачи были определены на основе нормальной силы в контакте зацепления ролика и зубьев сателлита, получаемой на основе компьютерной модели, и формуле (1), позволяющей проверить значения необходимых контактных напряжений (3) в зацеплении.

Список цитированных источников

1. Цилиндрические мотор-редукторы с параллельными валами // Каталог цилиндрических мотор-редукторов ООО "Приводные технологии". – URL: <https://techprivod.com/index.pl?act=SECTION§ion=cilindricheskie+motor-reduktory+s+parallelwymi+valami> (дата обращения: 06.05.2024).
2. Патент 12380 РБ, МПК F 16 H 1/32. Планетарная эксцентриковая передача : № u 20190289; заявл. 18.11.19; опубл. 30.08.2020 / Громыко П. Н., Макаревич С. Д., Макаревич А. С.; заявитель и патентообладатель Белорусско-Российский университет. – 12 с.
3. Основные показатели эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов на основе многопоточной схемы нагружения / П. Н. Громыко, С. Н. Хатетовский, В. Л. Юркова, Д. Ю. Макацария // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2022. – № 2 (128). – С. 75–78.

4. Разработка компьютерной модели для оценки основных показателей эксцентриковых передач с параллельным расположением входного и выходного валов / П. Н. Громыко, Д. М. Макаревич, С. Н. Хатетовский, А. С. Макаревич // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 8 (8). – С. 13–21.
5. Обеспечение поступательного движения сателлита при работе эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов / П. Н. Громыко, С. Н. Хатетовский, Д. Ю. Макацария, А. С. Макаревич // Вестник БарГУ. Серия: Технические науки. – 2022. – № 1 (11). – С. 4–13.
6. Разработка компьютерной модели для оценки основных показателей эксцентриковых передач с параллельным расположением входного и выходного валов / П. Н. Громыко, Д. М. Макаревич, С. Н. Хатетовский, А. С. Макаревич // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 8 (8). – С. 13–21.
7. Патент № 23856 ВУ МПКF 16H 1/32. Планетарная эксцентриковая передача / Громыко П. Н., Макаревич С. Д., Макаревич А. С. // Белорусско-Российский университет, заявлено 20190327, опубл. 30.08.2022.
8. Громыко, П. Н. Использование удлиненной эпициклоиды для формообразования зубчатых поверхностей передач эксцентрикового типа / П. Н. Громыко, С. Н. Хатетовский, В. Л. Юркова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 4. – С. 14–21.
9. Хатетовский, С. Н. Сравнительный анализ КПД эксцентриковых передач с соосным и параллельным расположением входного и выходного валов / С. Н. Хатетовский, П. Н. Громыко, В. Л. Юркова // Инновационные технологии в машиностроении: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. – Новополоцк. – 2023. – С. 148–149.
10. Макаревич А. С. Передачи эксцентрикового типа с параллельным расположением входного и выходного валов / А. С. Макаревич, П. Н. Громыко // Материалы 55-й студ. науч.-техн. конф. 03–04 мая 2019 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 150.
11. Громыко, П. Н. Силовой анализ контактирующих зубьев эксцентриковой передачи, формообразованных на основе использования удлиненной эпициклоиды / П. Н. Громыко, Д. Ю. Макацария, Р. А. Бондарев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 3. – С. 5–13.
12. Громыко, П. Н. Совершенствование механизма передачи движения на выходное звено в эксцентриковых передачах типа K-H-V / П. Н. Громыко, С. Н. Хатетовский, Д. Ю. Макацария // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 2. – С. 27–33.
13. Громыко, П. Н. Совершенствование механизма передачи движения на выходное звено в эксцентриковых передачах типа K-H-V / П. Н. Громыко, С. Н. Хатетовский, Д. Ю. Макацария // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 2. – С. 27–33.
14. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1979. – 702 с.
15. Пронников, А. С. Надежность машин / А. С. Пронников. – М. : Машиностроение, 1978. – 592 с.
16. Олофинская, В. П. Детали машин. Основы теории, расчета и конструирования : учеб. пособие / В. П. Олофинская. – М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2017. – 72 с.
17. Иванов, М. Н. Детали машин : учебник для академ. бакалавриата / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – 16-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2018. – 409 с.
3. Osnovnye pokazateli ekscentrikovoy peredachi s paral-lel'nym raspolozheniem vhodnogo i vyhodnogo valov na osnove mnogopotchnoj skhemy nagruzheniya / P. N. Gromyko, S. N. Hatetovskij, V. L. YUrKova, D. YU. Makacariya // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – № 2 (128). – S. 75–78.
4. Razrabotka komp'yuternoj modeli dlya ocenki osnovnyh pokazatelej ekscentrikovyh peredach s paral-lel'nym raspolozheniem vhodnogo i vyhodnogo valov / P. N. Gromyko, D. M. Makarevich, S. N. Hatetovskij, A. S. Makarevich // Transportnoe mashinostroenie. – 2022. – № 8 (8). – S. 13–21.
5. Obespechenie postupatel'nogo dvizheniya satellita pri rabote ekscentrikovoy peredachi s paral-lel'nym raspolozheniem vhodnogo i vyhodnogo valov / P. N. Gromyko, S. N. Hatetovskij, D. YU. Makacariya, A. S. Makarevich // Vestnik BarGU. Seriya: Tekhnicheskie nauki. – 2022. – № 1 (11). – S. 4–13.
6. Razrabotka komp'yuternoj modeli dlya ocenki osnovnyh pokazatelej ekscentrikovyh peredach s paral-lel'nym raspolozheniem vhodnogo i vyhodnogo valov / P. N. Gromyko, D. M. Makarevich, S. N. Hatetovskij, A. S. Makarevich // Transportnoe mashinostroenie. – 2022. – № 8 (8). – S. 13–21.
7. Patent № 23856 BY MPKF 16H 1/32. Planetarnaya ekscentrikovaya peredacha / Gromyko P. N., Makarevich S. D., Makarevich A. S. // Belorussko-Rossiiskij universitet, zayavleno 20190327, opubl. 30.08.2022.
8. Gromyko, P. N. Ispol'zovanie udlinennoj epicikloidy dlya formoobrazovaniya zubchatyh poverhnostej peredach ekscentrikovogo tipa / P. N. Gromyko, S. N. Hatetovskij, V. L. YUrKova // Vestn. Belarus.-Ros. un-ta. – 2019. – № 4. – S. 14–21.
9. Hatetovskij, S. N. Sravnitel'nyj analiz KPD ekscentri-kovyh peredach s soosnym i paral-lel'nym raspolozheniem vhodnogo i vyhodnogo valov / S. N. Hatetovskij, P. N. Gromyko, V. L. YUrKova // Innovacionnye tekhnologii v mashinostroenii: sb. materialov mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. – Novopolock. – 2023. – S. 148–149.
10. Makarevich A. C. Peredachi ekscentrikovogo tipa s paral-lel'nym raspolozheniem vhodnogo i vyhodnogo valov / A. S. Makarevich, P. N. Gromyko // Materialy 55-j stud. nauch.-tekhn. konf. 03–04 maya 2019 g. – Mogilev : Belarus.-Ros. un-t, 2019. – S. 150.
11. Gromyko, P. N. Silovoj analiz kontaktiruyushchih zub'ev ekscentrikovoy peredachi, formoobrazovannyh na osnove ispol'zovaniya udlinennoj epicikloidy / P. N. Gromyko, D. YU. Makacariya, R. A. Bondarev // Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta. – 2021. – № 3. – S. 5–13.
12. Gromyko, P. N. Sovershenstvovanie mekhanizma peredachi dvizheniya na vyhodnoe zveno v ekscentrikovyh peredachah tipa K-H-V / P. N. Gromyko, S. N. Hatetovskij, D. YU. Makacariya // Gornaya mekhanika i mashinostroenie. – 2021. – № 2. – S. 27–33.
13. Gromyko, P. N. Sovershenstvovanie mekhanizma peredachi dvizheniya na vyhodnoe zveno v ekscentrikovyh peredachah tipa K-H-V / P. N. Gromyko, S. N. Hatetovskij, D. YU. Makacariya // Gornaya mekhanika i mashinostroenie. – 2021. – № 2. – S. 27–33.
14. Birger, I. A. Raschet na prochnost' detalej mashin : spravochnik / I. A. Birger, B. F. SHorr, G. B. Iosilevich. – 3-e izd., pererab. i dop. – M. : Mashinostroenie, 1979. – 702 s.
15. Pronnikov, A. S. Nadezhnost' mashin / A. S. Pronnikov. – M. : Mashinostroenie, 1978. – 592 s.
16. Olofinskaya, V. P. Detali mashin. Osnovy teorii, rascheta i konstruirovaniya : ucheb. posobie / V. P. Olofinskaya. – M. : FORUM : INFRA-M, 2017. – 72 s.
17. Ivanov, M. N. Detali mashin : uchebnik dlya akadem. baka-lavriata / M. N. Ivanov, V. A. Finogenov. – 16-e izd., ispr. i dop. – M. : YUrajt, 2018. – 409 s.

References

1. Cilindricheskie motor-reduktory s paral-lel'nymi valami // Katalog cilindricheskih motor-reduktorov OOO "Privodnye tekhnologii". – URL: <https://tech-privod.com/index.pl?act=SECTION&ion=cilindricheskie+motor-reduktory+s+paral-lel'nyimi+valami> (data obrashcheniya: 06.05.2024).
2. Patent 12380 RB, MPK F 16 H 1/32. Planetarnaya ekscentrikovaya peredacha : № u 20190289; zayavl. 18.11.19; opubl. 30.08.2020 / Gromyko P. N., Makarevich S. D., Makarevich A. S.; zayavitel' i patentoobladatel' Belorussko-Rossiiskij universitet. – 12 s.

Материал поступил 06.02.2025, одобрен 13.03.2025, принят к публикации 13.03.2025

УДК 621.91.002

РАСЧЕТ ТОЛЩИН КОМПЕНСАТОРОВ – ЧЛЕНОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПРОГРЕССИИ С УЧЕТОМ ПОГРЕШНОСТЕЙ СБОРОЧНЫХ РАБОТ ПРИ ДОСТИЖЕНИИ ТОЧНОСТИ СБОРКИ МАШИН МЕТОДОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

О. А. Медведев¹, С. В. Савчук²

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: olanmed56@gmail.com

² К. т. н., доцент, заведующий кафедрой машиноведения УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: sergeyskb@tut.by

Реферат

В статье рассматривается методика рационального определения толщин неподвижных тонких компенсаторов, используемых для достижения точности сборки машин методом регулирования. Для сокращения затрат на изготовление компенсаторов значения их толщин в комплекте на одно изделие целесообразно подчинить геометрической прогрессии со знаменателем 2. Это позволяет при выборочном сложении толщин компенсаторов получить толщину набора компенсаторов любой кратности по отношению к ступени компенсации. Для объективного определения ступени компенсации, при использовании компенсаторов – членов геометрической прогрессии, составлено математическое условие достижения точности сборки, учитывающее влияние технологических факторов на формирование размера компенсатора, а, следовательно, на замыкающее звено сборочной конструкторской размерной цепи. С целью наглядного представления взаимосвязи предельных значений замыкающего звена, составляющих звеньев и компенсатора разработаны рациональные схемы компенсации рассеивания суммы составляющих звеньев. Схемы учитывают встречающиеся на практике возможные варианты влияния суммарного составляющего звена и компенсатора на замыкающее звено. На основе условия достижения точности замыкающего звена разработаны уравнения для расчета ступени компенсации и числа компенсаторов в комплекте для одного экземпляра собираемого изделия. Для облегчения использования предлагаемой методики на производстве результаты расчетов ступени компенсации и числа компенсаторов для наиболее характерных значений параметров звеньев реальных размерных цепей представлены в виде таблиц. Реализация предлагаемой методики позволяет повысить объективность определения ступени компенсации и сократить число компенсаторов в комплекте на одно изделие в 3–4 раза по сравнению с числом тонких компенсаторов одинаковой толщины. Она может быть полезна инженерам-технологам, занимающимся проектированием технологических процессов сборки машин.

Ключевые слова: точность сборки, размерные цепи, метод регулирования, компенсатор, геометрическая прогрессия, схема компенсации.

CALCULATION OF THE THICKNESS OF COMPENSATORS – MEMBERS OF THE GEOMETRIC PROGRESSION, TAKING INTO ACCOUNT THE ERRORS OF ASSEMBLY WORK WHEN ACHIEVING THE ACCURACY OF MACHINE ASSEMBLY BY THE CONTROL METHOD

O. A. Medvedev, S. V. Savchuk

Abstract

The article discusses the method of rational determination of the thickness of fixed thin compensators used to achieve the accuracy of machine assembly by the control method. To reduce the cost of manufacturing expansion joints, it is advisable to subordinate the values of their thickness in a set per product to a geometric progression with a denominator of 2. This makes it possible to selectively add up the thickness of the compensator thicknesses to obtain the thickness of the set of compensators of any multiplicity in relation to the compensation stage. For an objective determination of the compensation stage, when using compensators – members of the geometric progression, a mathematical condition for achieving the accuracy of assembly was compiled, taking into account the influence of technological factors on the formation of the size of the compensator, and, consequently, on the closing link of the assembly design dimensional chain. In order to visualize the relationship between the limit values of the closing link, the constituent links and the compensator, rational schemes have been developed to compensate for the dispersion of the sum of the constituent links. The schemes take into account the possible variants of the influence of the total component link and the compensator on the closing link that occur in practice. On the basis of the condition for achieving the accuracy of the closing link, equations have been developed for calculating the compensation stage and the number of compensators in the set for one copy of the assembled product. To facilitate the use of the proposed method in production, the results of calculations of the compensation stage and the number of compensators for the most typical values of the parameters of the links of real dimensional chains are presented in the form of tables. The implementation of the proposed method makes it possible to increase the objectivity of determining the compensation stage, and to reduce the number of expansion joints in a set per product by 3–4 times compared to the number of thin expansion joints of the same thickness. It can be useful for process engineers involved in the design of machine assembly processes.

Keywords: assembly accuracy, dimensional chains, control method, compensator, geometric progression, compensation scheme.

Введение

Для обеспечения попадания значения замыкающего звена сборочной конструкторской размерной цепи в заданный интервал его допуска регулирование размера неподвижного компенсатора, с целью компенсации значительного суммарного отклонения других составляющих звеньев цепи, возможно только ступенчато [1, 3], путём выбора одного компенсатора определённого размера из заранее изготовленного комплекта или подбора определённого числа равно тонких компенсаторов и дальнейшей установки их в изделие при окончательной сборке. При установке компенсатора определённого размера возможно обеспечить попадание замыкающего звена в пределы его допуска только для тех экземпляров собираемого изде-

лия, у которых суммарное отклонение других составляющих звеньев (не считая компенсатора) находится в диапазоне, равном допуску замыкающего звена. Применив компенсатор с размером больше предыдущего на величину допуска замыкающего звена, возможно обеспечить попадание замыкающего звена в пределы его допуска для тех экземпляров собираемого изделия, у которых суммарное отклонение других составляющих звеньев находится в диапазоне такой же величины, примыкающему к первому диапазону и так далее.

Таким образом, при условии отсутствия погрешностей выбираемых размеров компенсатора, ступень компенсации S (разность размеров соседних компенсаторов в комплекте) равна допуску замыкающего звена TA_Δ [2, 4, 11], а число ступеней компенсации равно отношению

суммарного диапазона рассеивания составляющих звеньев (кроме компенсатора) TA_{Σ} к допуску замыкающего звена. В действительности ступень компенсации должна быть меньше из-за наличия погрешностей изготовления компенсаторов и погрешности определения требуемого размера компенсатора [8, 9, 19].

Для определения размера компенсатора, требуемого в конкретном экземпляре изделия, обычно выполняется предварительная сборка этого экземпляра без компенсатора [12, 14, 16]. При этом на место замыкающего звена устанавливается его эталон. Размер эталона равен наиболее предпочтительному среднему значению замыкающего звена. Затем измеряется полость, которую должен заполнить компенсатор, чтобы замыкающее звено было равно эталону, и из заранее изготовленного комплекта выбирается компенсатор с размером, ближайшим к измеренному, или требуемое количество равно тонких компенсаторов определяется делением найденного при измерении размера на размер одного компенсатора.

После частичной разборки экземпляра изделия эталон удаляется и выполняется окончательная сборка этого объекта с выбранным компенсатором.

Индивидуальным выбором компенсатора устраняется прямая зависимость замыкающего звена от остальных составляющих звеньев (кроме компенсатора), и отклонение замыкающего звена от его среднего значения будет равно отклонению размера выбранного компенсатора (или набора тонких компенсаторов) от размера полости, которая измерялась при предварительной сборке.

Если местоположение компенсатора недоступно для измерения, в отличие от местоположения замыкающего звена, то при предварительной сборке на место компенсатора устанавливается его эталон с размером K_{Σ} , измеряется полученное замыкающее звено $A_{\Delta u}$ и рассчитывается требуемый размер компенсатора с учетом требуемого среднего значения замыкающего звена $A_{\Delta c}$ по следующим формулам:

для уменьшающего компенсатора

$$\bar{K} = \bar{K}_{\Sigma} - (A_{\Delta c} - A_{\Delta u}); \quad (1)$$

для увеличивающего компенсатора

$$\bar{K} = \bar{K}_{\Sigma} + (A_{\Delta c} - A_{\Delta u}). \quad (2)$$

Применение метода регулирования для достижения высокой точности замыкающих звеньев линейных сборочных конструкторских размерных цепей, при большом числе неточных составляющих звеньев обычно приводит к необходимости заблаговременного изготовления комплектов компенсаторов для каждого экземпляра собираемого изделия, каждый из которых включает большое число компенсаторов [10].

Значительные затраты на изготовление компенсаторов вызывают необходимость принятия мер по уменьшению их требуемого количества. Одним из способов сокращения требуемого количества тонких компенсаторов в комплекте для каждого экземпляра собираемого изделия является подчинение значений их толщин геометрической прогрессии со знаменателем 2 [13, 17]. При этом толщина любого компенсатора в комплекте определяется по формуле [5]

$$K_i = 2^{i-1} \cdot C, \quad (3)$$

где i – порядковый номер компенсатора – члена геометрической прогрессии; C – величина ступени компенсации.

Следовательно, $K_1 = C$, $K_2 = 2C$, $K_3 = 4C$, $K_4 = 8C$, $K_5 = 16C$, $K_6 = 32C$, $K_7 = 64C$ и т. д.

Применение прогрессии, в которой каждый следующий член больше предыдущего в 2 раза, позволяет при выборочном сложении толщин компенсаторов получить суммарную толщину набора компенсаторов любой кратности по отношению к ступени компенсации, например: $K_{n1} = 3C = C + 2C$, $K_{n2} = 5C = 4C + C$, $K_{n3} = 6C = 4C + 2C$, $K_{n4} = 7C = 4C + 2C + C$, $K_{n5} = 9C = 8C + C$, $K_{n6} = 10C = 8C + 2C$, $K_{n7} = 11C = 8C + 2C + C$ и т. п. Эффективность такого способа сокращения количества компенсаторов наглядно демонстрирует последний пример, из которого следует, что при диапазоне рассеивания составляющих звеньев равном $11C$ для компенсации отклонения суммы составляющих звеньев в пределах последней одиннадцатой

ступени компенсации потребуется 11 одинаковых тонких компенсаторов или всего 3 компенсатора – члена геометрической прогрессии (из 4-х, необходимых в комплекте).

Несмотря на очевидную рациональность указанного подхода к сокращению числа тонких компенсаторов, он не получил широкого распространения в сборочном производстве. Это обусловлено отсутствием в специальной технической и учебной литературе [1, 2, 4, 11, 15, 18 и др.] приемлемых методик расчета рациональной величины компенсации C и минимально достаточного числа компенсаторов n в комплекте на одно изделие с учетом погрешностей сборочных работ и оснастки (эталонов, измерительных средств, компенсаторов и т. п.).

Постановка задач исследования

Для объективного определения ступени компенсации при использовании компенсаторов – членов геометрической прогрессии необходимо составить математически выраженное условие достижения точности сборки, учитывающее влияние всех технологических факторов на формирование размера компенсатора, а следовательно, на замыкающее звено сборочной конструкторской размерной цепи. Такое условие должно устанавливать взаимосвязь между заданным в технических условиях на сборку допуском замыкающего звена и погрешностями сборочных работ, выполняемых для определения толщины компенсатора.

Для наглядного представления взаимосвязи предельных значений замыкающего звена, составляющих звеньев и компенсатора необходимо разработать рациональные схемы компенсации диапазона рассеивания суммы составляющих звеньев, учитывающие возможные варианты сочетаний этих звеньев, встречающиеся на практике.

На основе условия достижения точности замыкающего звена разработать уравнения для расчета ступени компенсации числа компенсаторов в комплекте для одного экземпляра собираемого изделия.

Для облегчения использования предлагаемой методики определения числа компенсаторов и ступени компенсации на производстве следует представить результаты типовых расчетов для наиболее характерных значений параметров звеньев реальных размерных цепей в виде графиков или таблиц.

Анализ технологических сборочных размерных цепей и составление условия достижения точности сборки

Технологическая сборочная размерная цепь формируется на этапе предварительной сборки изделия (без компенсатора и с эталоном замыкающего звена на месте этого звена), а также при измерении полученной полости под компенсатор и составлении набора из нескольких компенсаторов, имеющих суммарный размер ближайший к измеренному [19]. Замыкающим звеном в ней является сформированный размер (толщина) компенсатора, а составляющими звеньями, кроме размеров штатных деталей изделия, также являются размеры используемой сборочной оснастки и погрешности выполнения сборочных работ.

При окончательной сборке изделия из комплектующих деталей и составленного компенсатора отклонение замыкающего звена конструкторской цепи от его эталона будет равно отклонению толщины составленного компенсатора от размера его местоположения.

Это отклонение складывается из отклонений тех звеньев технологической цепи, которые при предварительной сборке конкретного экземпляра изделия могут приобретать случайные значения, отличающиеся от их значений в конструкторской цепи (погрешность изготовления эталона среднего значения замыкающего звена ε_{Σ} , погрешность установки эталона $\varepsilon_{уэ}$, погрешность измерения местоположения компенсатора $\varepsilon_{и}$, погрешность изготовления компенсаторов $\varepsilon_{к}$, погрешность выбора компенсатора ε_{ϕ}). Погрешности таких звеньев могут быть компенсированы только за счет допуска замыкающего звена конструкторской цепи, а не подбором компенсатора. Так как при сборке большинства экземпляров изделий будут использоваться наборы из нескольких компенсаторов, каждый из которых может иметь погрешность $\varepsilon_{к}$, то возможная по-

грешность суммарной толщины отдельного набора из n компенсаторов будет быть равна произведению $n \cdot \varepsilon_k$.

Следовательно, условие достижения точности сборки, отражающее соотношение допуска замыкающего звена и суммы возникающих погрешностей, при котором замыкающее звено не будет выходить за пределы своего допуска, может быть выражено формулой (4)

$$TA_{\Delta} \geq \varepsilon_{\Sigma} + \varepsilon_{\Sigma} + \varepsilon_u + \varepsilon_{\varepsilon} + n \cdot \varepsilon_k. \quad (4)$$

Анализ условий выбора толщины набора компенсаторов по результату измерения полости под компенсатор позволяет установить, что разница между указанными величинами, при соблюдении сборщиком технологической дисциплины, не может превышать ступень компенсации. Следовательно, формулу (4) можно использовать для определения величины компенсации во взаимосвязи с остальными погрешностями. Заменив $\varepsilon_{\varepsilon}$ на ее максимально возможное значение, равное ступени компенсации C , и приравняв правую и левую части, выражение (4) преобразуем в равенство (5)

$$TA_{\Delta} = \varepsilon_{\Sigma} + \varepsilon_{\Sigma} + \varepsilon_u + C + n \cdot \varepsilon_k. \quad (5)$$

Рекомендации по рациональному определению погрешностей ε_{Σ} , ε_{Σ} , ε_u , ε_k приведены в [7, 8].

Однако использовать уравнение (5) для проектного расчета ступени компенсации невозможно, так как число компенсаторов n является функцией ступени компенсации, что затрудняет выделение C в отдельную часть равенства. Поэтому уравнение (5) можно использовать лишь для проверочных (уточняющих) расчетов. Методика проектного расчета ступени компенсации рассмотрена ниже.

Разработка рациональных схем компенсации диапазона рассеивания суммы составляющих звеньев

Основой предлагаемой методики определения толщин компенсаторов – членов геометрической прогрессии являются схемы компенсации суммарного диапазона рассеивания составляющих звеньев конструкторской сборочной размерной цепи, представляющие собой сочетание конструкторской и технологической сборочных размерных цепей.

Конструкторская цепь реальной машины представляется в схеме компенсации математически тождественной трехзвенной цепью, состоящей из суммарного составляющего звена A_{Σ} , компенсатора K и замыкающего звена A_{Δ} . Суммарное составляющее звено является алгебраической суммой всех реальных составляющих звеньев (кроме компенсатора), а его диапазон рассеивания TA_{Σ} равен арифметической сумме допусков составляющих звеньев (кроме допуска компенсатора). При этом все многообразие реальных конструкторских цепей (при условии, что размер компенсатора сопоставим с допуском замыкающего звена и не может охватывать суммарное составляющее и замыкающее звено) сводится к двум вариантам трехзвенных цепей: 1) цепь с уменьшающим компенсатором и увеличивающим суммарным составляющим звеном; 2) цепь с увеличивающим компенсатором и увеличивающим суммарным составляющим звеном. В схеме компенсации каждое звено трехзвенной цепи представлено его предельными размерами и интервалом допуска (или диапазоном рассеивания).

Технологическую размерную цепь представим в схеме компенсации ступенью компенсации и погрешностями, входящими в равенство (5), в соответствии с которым их сумма должны быть равна допуску замыкающего звена конструкторской цепи TA_{Δ} . При допущении о симметричном распределении суммарной погрешности, совмещаем середину ее поля рассеивания с серединой интервала допуска замыкающего звена конструкторской цепи. Для уменьшения числа элементов, представленных на схеме компенсации, сумма ε_{Σ} , ε_{Σ} , ε_u обозначена как погрешность формирования размера компенсатора ε_{PK} .

С целью уменьшения требуемого числа компенсаторов в комплекте на одно изделие, целесообразно обеспечить частичное перекрытие TA_{Δ} и TA_{Σ} . В случае использования компенсаторов, толщина которых сопоставима с допуском замыкающего звена TA_{Δ} , это всегда можно сделать путем корректировки положения интервала допуска любого из составляющих звеньев конструктор-

ской цепи относительно его номинала. Такое перекрытие позволит без установки компенсатора за счет допуска замыкающего звена компенсировать часть суммарного диапазона рассеивания составляющих звеньев, примыкающую к одной из его границ и равную ступени компенсации.

Для того чтобы набор компенсаторов при любом их числе оставался либо уменьшающим, либо увеличивающим, надо середину TA_{Δ} совместить с серединой первой ступени компенсации. Схемы компенсации, соответствующие описанным рациональным требованиям, приведены на рисунках 1 и 2, для уменьшающего и увеличивающего компенсатора соответственно.

Определение ступени компенсации и требуемого числа компенсаторов в комплекте для одного экземпляра изделия

Для того чтобы использовать уравнение (5) для расчета ступени компенсации, необходимо установить зависимость между числом требуемых компенсаторов n и ступенью компенсации C .

Как видно из разработанных схем компенсации, при перекрытии допуском замыкающего звена TA_{Δ} первой ступени компенсации в пределах TA_{Σ} достаточно иметь такое число компенсаторов в наборе, при котором их суммарная толщина будет равна величине $TA_{\Sigma} - C$. Эту же суммарную толщину n компенсаторов можно выразить формулой для расчета суммы конечного числа n членов геометрической прогрессии с показателем 2 [20]:

$$\sum_{i=1}^n K_i = (2^n - 1) \cdot C. \quad (6)$$

Тогда справедливо равенство (7)

$$\sum_{i=1}^n K_i = (2^n - 1) \cdot C = TA_{\Sigma} - C. \quad (7)$$

Выполним преобразование уравнения (7) с выделением в левую часть равенства 2^n

$$2^n = TA_{\Sigma} / C = N, \quad (8)$$

где N – число требуемых ступеней компенсации.

После логарифмирования уравнения (8) получим уравнение (9) для расчета числа компенсаторов n на точность замыкающего звена TA_{Δ} и TA_{Σ} и погрешностях сборочных работ:

$$n = \log_2 (TA_{\Sigma} / C) = \log_2 TA_{\Sigma} - \log_2 C. \quad (9)$$

Подставив (9) в уравнение (5), получим уравнение (10), которое можно использовать для расчета ступени компенсации при известных параметрах звеньев конструкторской размерной цепи (TA_{Δ} и TA_{Σ}) и погрешностях сборочных работ:

$$TA_{\Delta} = C + \varepsilon_{PK} + \varepsilon_k \cdot \log_2 TA_{\Sigma} - \varepsilon_k \cdot \log_2 C. \quad (10)$$

Таким образом, уравнение (10) учитывает худший случай влияния точности набора компенсаторов на точность замыкающего звена A_{Δ} , при котором набор состоит из наибольшего возможного числа компенсаторов.

Чтобы снизить трудоемкость определения рациональных параметров точности сборочных работ, при которых можно приступить к решению уравнения (10), установим взаимосвязь между ε_{PK} и C . Для достоверного определения суммарной толщины набора компенсаторов – членов геометрического ряда, которая будет наиболее близка к размеру их местоположения, сформированному при предварительной сборке, достаточно ограничить допустимое поле рассеивания этой толщины величиной ступени компенсации. Тогда определение допустимой погрешности формирования толщины набора компенсаторов ($\varepsilon_{PK} = \varepsilon_{\Sigma} + \varepsilon_{\Sigma} + \varepsilon_u$) целесообразно проводить с учетом взаимосвязи между значениями ε_{PK} и C , которая аналогична взаимосвязи допуска контролируемого параметра и допустимой погрешности измерения, регламентированной ГОСТ 8.051-81 [18]. Из этой взаимосвязи следует, что для достоверного измерения и заключения о годности, погрешность измерения не должна превышать одной пятой части от допуска измеряемого размера, если он соответствует точности грубее 9 квалитета, и одной третьей части, если допуск размера соответствует более высокой точ-

ности. Обычно ступень компенсации имеет значение от нескольких сотых до нескольких десятых долей миллиметра, что при размере места под компенсатор в 3–5 раз больше ступени компенсации (то есть до 1 мм) и соответствует точности грубее 9 квалитета. Следовательно, исключить ошибочный выбор толщины набора компенсаторов, отличающейся от ширины местоположения этого набора более чем на одну ступень компенсации, можно, если погрешность измерения будет соответствовать условию

$$\varepsilon_{pk\ max} = 0,2 \cdot C. \quad (11)$$

При указанном условии достоверности измерений для расчетов ступени компенсации можно использовать уравнение

$$TA_{\Delta} \geq 1,2C + \varepsilon_k \cdot \log_2 TA_{\Sigma} - \varepsilon_k \cdot \log_2 C. \quad (12)$$

Уравнения (10) или (12) являются трансцендентными. Их невозможно решить аналитически для определения значения ступени компенсации. Их решение возможно численными методами с определенной точностью. Решение выполнялось методом дихотомии с помощью программы, разработанной в приложении Excel на языке Visual Basic for Application (VBA) [6]. Значения TA_{Σ} , ε_{pk} , ε_k корректировались так, чтобы n получалось целым.

Для упрощения использования предлагаемой методики определения ступени компенсации и числа компенсаторов на производстве, по результатам расчетов составлены таблицы зависимостей $n = f(TA_{\Sigma}, TA_{\Delta}, \varepsilon_k)$ и $C = f(TA_{\Sigma}, TA_{\Delta}, \varepsilon_k)$ для некоторых характерных для техпроцессов сборки машин значений TA_{Σ} , TA_{Δ} , ε_k , которые можно использовать для предварительного определения числа компенсаторов, ступени компенсации и погрешности сборочных работ по формированию толщины набора компенсаторов. Принятые табличные значения могут потребовать корректировки для обеспечения равенства (5).

При известной ступени компенсации размер K_i любого из n компенсаторов (при $1 \leq i \leq n$), независимо от схемы компенсации, может быть рассчитан по формуле (3).

Предельные значения компенсатора каждой ступени с учетом симметричного распределения погрешности его толщины ε_k относительно номинального (среднего) значения толщины следует определять по формулам (12)

$$\begin{aligned} K_{i\ min} &= K_i - \varepsilon_k/2; \\ K_{i\ max} &= K_i + \varepsilon_k/2. \end{aligned} \quad (12)$$

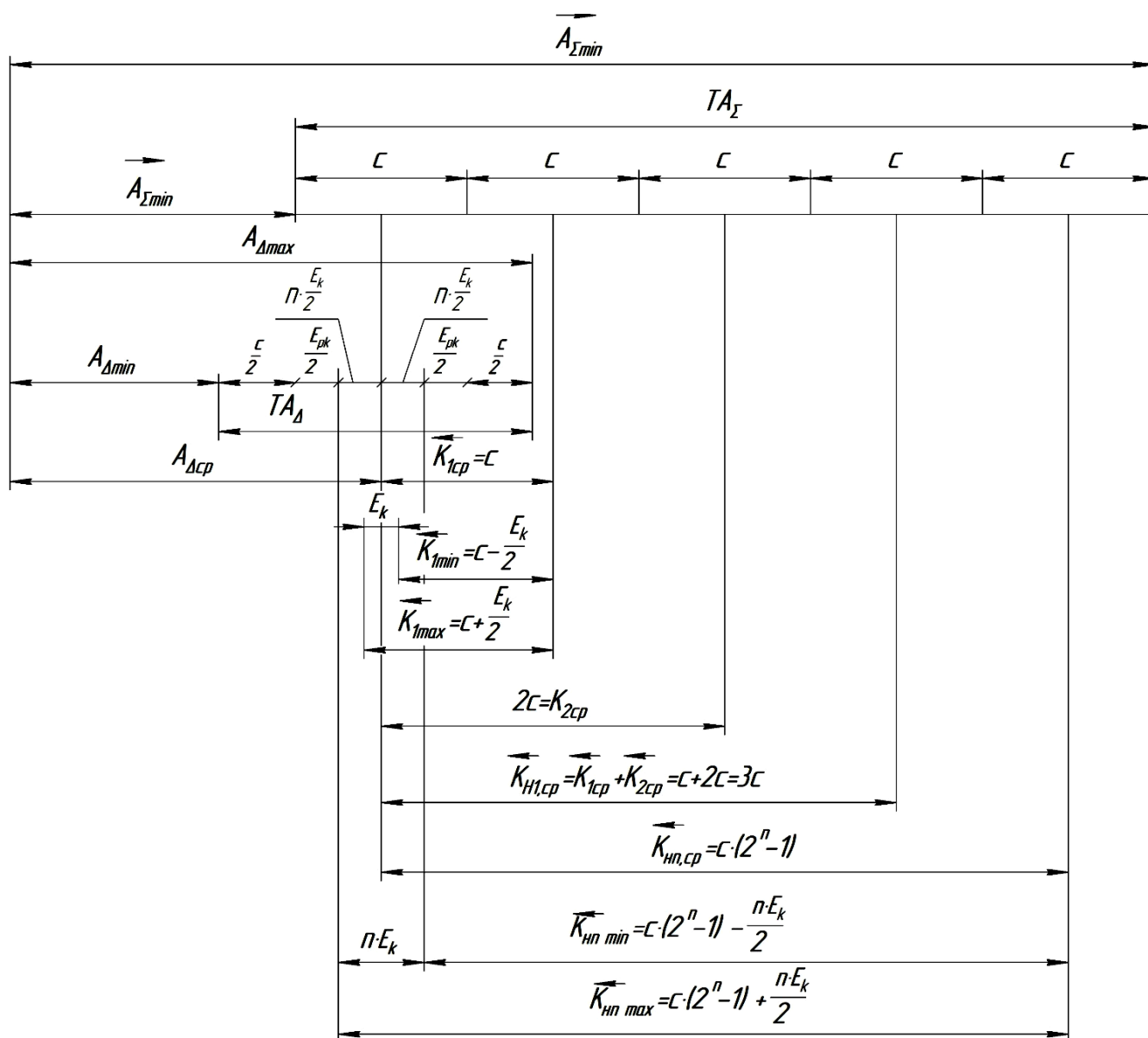


Рисунок 1 – Схема компенсации допусков составляющих звеньев регулированием комплектом неподвижных тонких уменьшающих компенсаторов – членов геометрической прогрессии

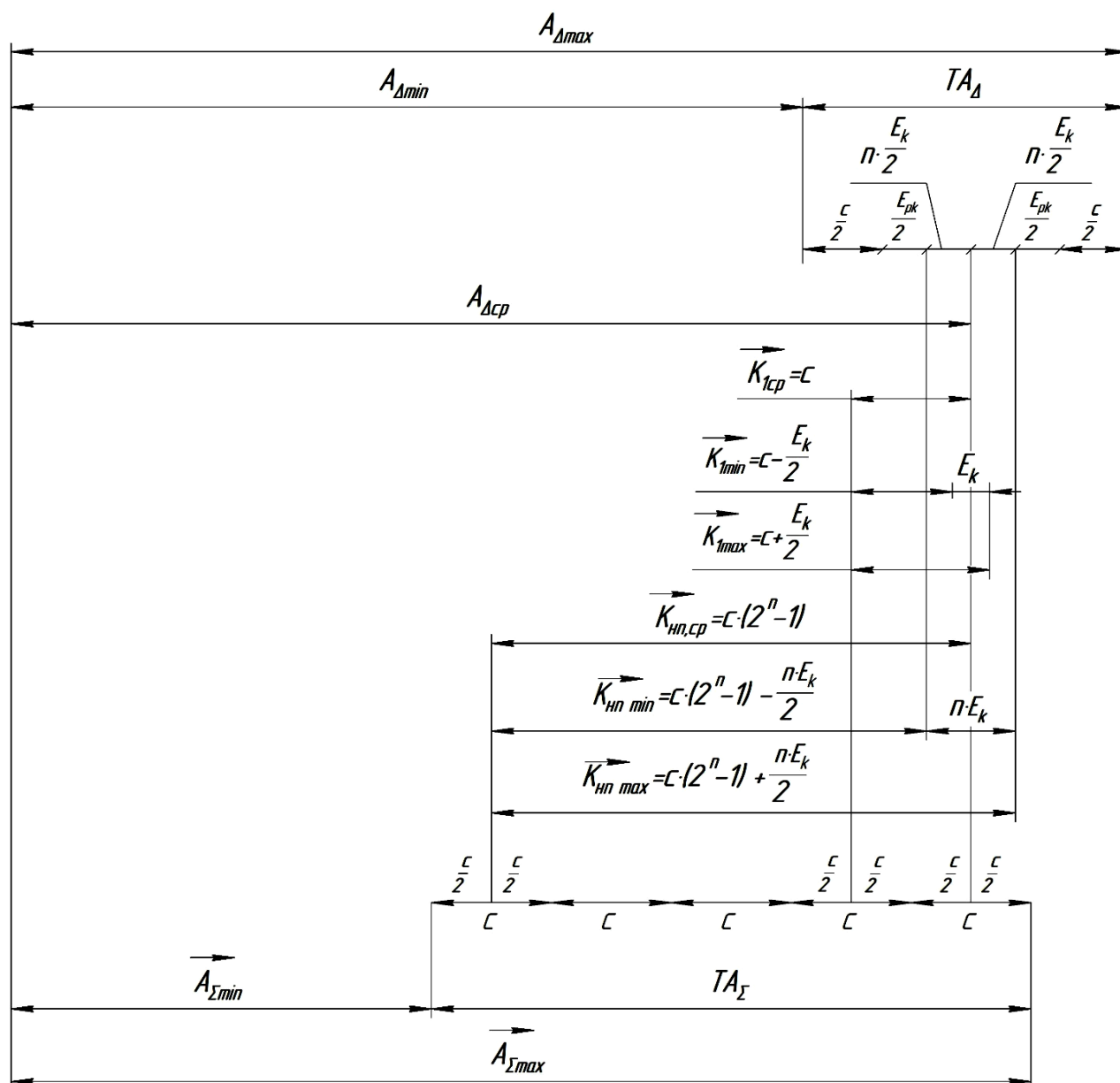


Рисунок 2 – Схема компенсации допусков составляющих звеньев регулированием комплектом неподвижных тонких увеличивающих компенсаторов – членов геометрической прогрессии

Таблица 1 – Требуемые значения n , C , E_{pk} при $TA_{\Delta} = 0,05$ мм; $E_k = 0,006$ мм (по 6 качеству)

TA_{Σ} , мм	Св.0,04... 0,072	Св.0,072...0,124	Св.0,124...0,208	Св.0,208...0,32	Св.0,32...0,512	Св.0,512...0,704
n , шт	1	2	3	4	5	6
C , мм	0,036	0,031	0,026	0,02	0,016	0,011
E_{pk} , мм	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003	0,002

Таблица 2 – Требуемые значения n , C , E_{pk} при $TA_{\Delta} = 0,05$ мм; $E_k = 0,01$ мм (по 7 качеству)

TA_{Σ} , мм	Св.0,041... 0,066	Св.0,066...0,1	Св.0,1...0,128	Св.0,208...0,32
n , шт	1	2	3	4
C , мм	0,033	0,025	0,016	0,0083
E_{pk} , мм	0,006	0,005	0,003	0,0016

Таблица 3 – Требуемые значения n , C , E_{pk} при $TA_{\Delta} = 0,1$ мм; $E_k = 0,01$ мм (по 7 качеству)

TA_{Σ} , мм	Св.0,083... 0,15	Св.0,15...0,264	Св.0,264...0,464	Св.0,464...0,8	Св.0,8...1,28
n , шт	1	2	3	4	5
C , мм	0,075	0,066	0,058	0,05	0,04
E_{pk} , мм	0,015	0,013	0,011	0,01	0,004

Таблица 4 – Требуемые значения n , C , $\varepsilon_{рк}$ при $TA_{\Sigma} = 0,1$ мм; $\varepsilon_{\kappa} = 0,025$ мм (по 9 качеству)

TA_{Σ} , мм	Св.0,083... 0,125	Св.0,125...0,1666
n , шт	1	2
C , мм	0,0625	0,0416
$\varepsilon_{рк}$, мм	0,012	0,008

Таблица 5 – Требуемые значения n , C , $\varepsilon_{рк}$ при $TA_{\Sigma} = 0,2$ мм; $\varepsilon_{\kappa} = 0,01$ мм (по 7 качеству)

TA_{Σ} , мм	Св.0,16... 0,316	Св.0,316... 0,6	Св.0,6... 1,12	Св.1,12...2,08
n , шт	1	2	3	4
C , мм	0,158	0,15	0,14	0,13
$\varepsilon_{рк}$, мм	0,031	0,03	0,028	0,026

Таблица 6 – Требуемые значения n , C , $\varepsilon_{рк}$ при $TA_{\Sigma} = 0,2$ мм; $\varepsilon_{\kappa} = 0,014$ мм (по 8 качеству)

TA_{Σ} , мм	Св.0,166...0,31	Св.0,31...0,56	Св.0,56...1,04	Св.1,04...1,92	Св.1,92...3,456	Св.3,456...6,184
n , шт	1	2	3	4	5	6
C , мм	0,155	0,14	0,13	0,12	0,108	0,0966
$\varepsilon_{рк}$, мм	0,031	0,028	0,026	0,024	0,021	0,019

Таблица 7 – Требуемые значения n , C , $\varepsilon_{рк}$ при $TA_{\Sigma} = 0,2$ мм; $\varepsilon_{\kappa} = 0,025$ мм (по 9 качеству)

TA_{Σ} , мм	Св.0,166... 0,29	Св.0,29...0,5	Св.0,5...0,832	Св.832...1,328	Св.1,328...1,984	Св.1,984...2,624
n , шт	1	2	3	4	5	6
C , мм	0,145	0,125	0,104	0,083	0,062	0,041
$\varepsilon_{рк}$, мм	0,029	0,02	0,018	0,016	0,012	0,008

Таблица 8 – Требуемые значения n , C , $\varepsilon_{рк}$ при $TA_{\Sigma} = 0,3$ мм; $\varepsilon_{\kappa} = 0,014$ мм (по 8 качеству)

TA_{Σ} , мм	Св.0,25... 0,472	Св.0,476...0,9	Св.0,9...1,72	Св.1,72...3,248	Св.3,248...6,112
n , шт	1	2	3	4	5
C , мм	0,238	0,226	0,215	0,203	0,191
$\varepsilon_{рк}$, мм	0,047	0,045	0,043	0,04	0,038

Таблица 9 – Требуемые значения n , C , $\varepsilon_{рк}$ при $TA_{\Sigma} = 0,4$ мм; $\varepsilon_{\kappa} = 0,01$ мм (по 7 качеству)

TA_{Σ} , мм	Св.0,333...0,65	Св.0,65...1,24	Св.1,24...2,46	Св.2,46...4,8	Св.4,8...9,312
n , шт	1	2	3	4	5
C , мм	0,325	0,31	0,308	0,3	0,291
$\varepsilon_{рк}$, мм	0,065	0,062	0,061	0,06	0,058

Заключение

Реализация предлагаемой методики взаимосвязанного определения параметров точности сборочных работ и компенсаторов – членов геометрической прогрессии при достижении точности сборки методом регулирования позволяет повысить объективность определения ступени компенсации, минимально достаточного числа тонких неподвижных компенсаторов в комплекте для каждого экземпляра собираемых изделий.

Она может быть полезна инженерам-технологам, занимающимся проектированием технологических процессов сборки машин.

Список цитированных источников

1. Расчет точности машин и приборов / В. П. Булатов, И. Г. Фридлендер, А. Б. Баталов [и др.] ; под общ. ред. В. П. Булатова, И. Г. Фридлендера. – СПб. : Политехника, 1993. – 495 с.
2. Замятин, В. К. Технология и оснащение сборочного производства машино – приборостроения : справочник / В. К. Замятин. – М. : Машиностроение, 1995. – 608 с.
3. Клименков, С. С. Нормирование точности изделий : учебное пособие / С. С. Клименков, А. Н. Голубев. – Витебск : ВГТУ, 2020. – 250 с.
4. Ковшов, А. Н. Технология машиностроения : учебник / А. Н. Ковшов. – СПб. : Лань, 2021. – 320 с.
5. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1984.
6. Ларсен, Р. У. Инженерные расчеты в Microsoft Office Excel / Р. У. Ларсен. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 544 с.
7. Медведев, О. А. Оптимизация допусков неподвижных компенсаторов разной толщины для достижения точности сборки машин методом регулирования / О. А. Медведев, С. В. Савчук, Б. С. Дарчич // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 1 (133). – С. 125–129.
8. Медведев, О. А. Выбор технологической оснастки для достижения точности сборки методом регулирования неподвижных компенсаторов / О. А. Медведев, П. Н. Ковальчук // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Машиностроение, автоматизация, ЭВМ. – 2008. – № 4 (52). – С. 40–44.
9. Медведев, О. А. Теоретико-вероятностный расчет сборочных размерных цепей машин, содержащих тонкие компенсаторы / О. А. Медведев, Ю. В. Рожков // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Машиностроение. – 2011. – № 4 (70). – С. 50–54.
10. Медведев, О. А. Теоретико-вероятностный расчет числа тонких равных компенсаторов при достижении точности сборки методом регулирования / О. А. Медведев // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2022. – № 2 (128). – С. 87–91.
11. Никифоров, А. Д. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения : учебное пособие для вузов / А. Д. Никифоров. – 4-ое изд. – М. : Высшая школа, 2007. – 295 с.
12. Беляков, Н. В. Основы технологии машиностроения. Проектирование технологических процессов: учеб. пособие / Н. В. Беляков, В. А. Горохов, Е. И. Махаринский. – Старый Оскол : Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2010. – 767 с.
13. Палей, М. А. Допуски и посадки : справочник : в 2 ч. / М. А. Палей, А. Б. Романов, В. А. Брагинский. – 8-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2001. – Ч. 2. – 608 с.
14. Проектирование технологических процессов в машиностроении : учебное пособие для вузов / И. П. Филонов, Г. Я. Беляев, Л. М. Кожуро [и др.] ; под общ. ред. И. П. Филонова. – Минск : УП «Технопринт», 2003. – 910 с.

15. Жолобов, А. А. Проектирование технологических процессов сборки машин : учебник / А. А. Жолобов, В. А. Лукашенко. – Минск : Новое знание, 2005. – 410 с.
16. Размерный анализ конструкций : справочник / С. Г. Бондаренко, О. Н. Черединов, В. П. Губий, Т. М. Игнатцев ; под общ. ред. С. Г. Бондаренко. – К. : Техника, 1989. – 150 с.
17. Солонин, И. С. Расчет сборочных и технологических размерных цепей / И. С. Солонин, С. И. Солонин. – М. : Машиностроение, 1980. – 110 с.
18. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / В. Н. Андреев, А. Н. Афонин, В. Ф. Безъязычный [и др.] ; под ред. А. С. Васильева, А. А. Кутина. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Инновационное машиностроение, 2018. – Т. 2. – 818 с.
19. Технология машиностроения (специальная часть) : учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев, Е. Р. Ковальчук, И. М. Колесов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.
20. Цыпкин, А. Г. Математические формулы. Алгебра. Геометрия. Математический анализ : справочник / А. Г. Цыпкин, Г. Г. Цыпкин. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1985. – 128 с.
9. Medvedev, O. A. Teoretiko-veroyatnostnyj raschet sborochnyh razmernykh cepej mashin, soderzhashchih tonkie kompensatory / O. A. Medvedev, YU. V. Rozhkov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye. – 2011. – № 4 (70). – S. 50–54.
10. Medvedev, O. A. Teoretiko-veroyatnostnyj raschet chisla tonkih ravnykh kompensatorov pri dostizhenii tochnosti sborki metodom regulirovaniya / O. A. Medvedev // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – № 2 (128). – S. 87–91.
11. Nikiforov, A. D. Vzaimozamenyaemost', standartizatsiya i tekhnicheskie izmereniya : uchebnoye posobie dlya vuzov / A. D. Nikiforov. – 4-oe izd. – M. : Vysshaya shkola, 2007. – 295 s.
12. Belyakov, N. V. Osnovy tekhnologii mashinostroyeniya. Proektirovaniye tekhnologicheskikh processov: ucheb. posobie / N. V. Belyakov, V. A. Gorohov, E. I. Maharinskij. – Staryj Oskol : Izd-vo «Tonkie naukoemkie tekhnologii», 2010. – 767 s.
13. Palej, M. A. Dopuski i posadki : spravochnik : v 2 ch. / M. A. Palej, A. B. Romanov, V. A. Braginskij. – 8-e izd., pererab. i dop. – SPb. : Politehnika, 2001. – CH. 2. – 608 s.
14. Proektirovaniye tekhnologicheskikh processov v mashinostroyenii : uchebnoye posobie dlya vuzov / I. P. Filonov, G. YA. Belyaev, L. M. Kozhuro [i dr.]; pod obshch. red. I. P. Filonova. – Minsk : UP «Tekhnoprint», 2003. – 910 s.
15. Zholobov, A. A. Proektirovaniye tekhnologicheskikh processov sborki mashin : uchebnik / A. A. Zholobov, V. A. Lukashenko. – Minsk : Novoe znanie, 2005. – 410 s.
16. Razmernyj analiz konstrukcij : spravochnik / S. G. Bondarenko, O. N. Cherednikov, V. P. Gubij, T. M. Ignatcev ; pod obshch. red. S. G. Bondarenko. – K. : Tekhnika, 1989. – 150 s.
17. Solonin, I. S. Raschet sborochnyh i tekhnologicheskikh razmernykh cepej / I. S. Solonin, S. I. Solonin. – M. : Mashinostroyeniye, 1980. – 110 s.
18. Spravochnik tekhnologa-mashinostroyitelya : v 2 t. / V. N. Andreev, A. N. Afonin, V. F. Bez'yazychnyj [i dr.]; pod red. A. S. Vasil'eva, A. A. Kutina. – 6-e izd., pererab. i dop. – M. : Innovacionnoye mashinostroyeniye, 2018. – T. 2. – 818 s.
19. Tekhnologiya mashinostroyeniya (spetsial'naya chast') : uchebnik dlya mashinostroyitel'nykh spetsial'nostej vuzov / A. A. Gusev, E. R. Koval'chuk, I. M. Kolesov [i dr.]. – M. : Mashinostroyeniye, 1986. – 480 s.
20. Cypkin, A. G. Matematicheskie formuly. Algebra. Geometriya. Matematicheskij analiz : spravochnik / A. G. Cypkin, G. G. Cypkin. – M. : Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit-ry, 1985. – 128 s.

References

Материал поступил 27.02.2025, одобрен 01.03.2025, принят к публикации 12.03.2025

УДК 621.789

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 40Х13 ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ

О. М. Мищирук¹, А. И. Веремейчик², Б. Г. Холодарь³, М. В. Нерода⁴¹ Старший преподаватель кафедры теплогоснабжения и вентиляции УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: purtyupolia@gmail.com² К. физ.-мат. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vai_mrtm@bstu.by³ К. т. н., доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской части УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: hbg@list.ru⁴ К. т. н., доцент, e-mail: nerodaMV@mail.ru

Реферат

Проведено исследование зависимостей характеристик прочности и пластичности образцов из конструкционной коррозионно-стойкой стали 40Х13 от различных схем лазерной поверхностной закалки и легирования с применением технологического комплекса на основе иттербиевого волоконного лазера. Для испытаний на статическое разрушение были подготовлены образцы с габаритными размерами 7 x 20 x 200 мм. На противоположных плоскостях образца с габаритными размерами 20 x 200 мм при скорости сканирования, равной 500 мм/мин, наносились от 2 до 5 дорожек, а также использовалась схема нанесения своеобразной «сетки». Для лазерного легирования образцов выбран наиболее широко распространенный вид лазерного легирования – борирование. Диаграммы зависимости возникающих в образцах напряжений (σ) от удлинения рабочей части образца (Δl) свидетельствуют о незначительном влиянии лазерной обработки на модуль упругости материала. Установлено, что разрушение обработанных образцов во всех случаях обладало признаками, характерными хрупкому разрушению (отсутствие «шейки»; небольшие деформации; ярко выраженный крупнозернистый рельеф излома, состоящий из множества блестящих граней) и невысоким уровнем разрушающих деформаций при напряжениях ниже предела прочности исходного материала. Разрушающие напряжения на обработанных образцах находились в пределах 500–600 МПа и составляли примерно 70–90 % от предела прочности образцов, не подвергавшихся обработке. Предельная упругая нагрузка материала обработанных образцов повысилась, увеличив зону их упругой работы. Полученные результаты могут служить основой для изучения взаимосвязи режимов нагрева лазерным лучом и свойств материала упрочненной зоны.

Ключевые слова: лазерная поверхностная закалка, лазерное легирование, характеристики пластичности, прочностные характеристики, конструкционная сталь 40Х13.

STUDY OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF 40X13 STEEL AFTER LASER HARDENING AND ALLOYING

O. M. Mishchiruk, A. I. Verameichyk, B. G. Kholodar, M. V. Neroda

Abstract

The dependence of strength and ductility characteristics of samples made of 40X13 structural corrosion-resistant steel on various schemes of laser surface hardening and alloying was studied using a technological complex based on an ytterbium fiber laser. Samples with overall dimensions of 7 x 20 x 200 mm were prepared for static destruction tests. From 2 to 5 tracks were applied on opposite planes of a sample with overall dimensions of 20 x 200 mm at a scanning speed of 500 mm/min, and a scheme for applying a kind of "grid" was also used. The most widespread type of laser alloying, boriding, was selected for laser alloying of samples. The diagrams of the dependence of stresses (σ) arising in samples on the elongation of the working part of the sample (Δl) indicate an insignificant effect of laser processing on the elastic modulus of the material. It was found that the fracture of the treated samples in all cases had features characteristic of brittle fracture (absence of a "neck"; small deformations; pronounced coarse-grained fracture relief consisting of many shiny edges) and a low level of destructive deformations at stresses below the ultimate strength of the original material. The destructive stresses on the treated samples were within 500–600 MPa and amounted to approximately 70–90 % of the ultimate strength of the untreated samples. The ultimate elastic load of the material of the treated samples increased, increasing the zone of their elastic work. The results obtained can serve as a basis for studying the relationship between laser beam heating modes and the properties of the material of the hardened zone.

Keywords: laser surface hardening, laser alloying, plasticity characteristics, strength characteristics, structural steel 40X13.

Введение

Такие достоинства сфокусированного лазерного излучения, как бесконтактное и локализованное термическое воздействие, минимальная зона термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения, снижение уровня остаточных напряжений, минимизация коробления и повышенная дисперсность структуры [1], обуславливают замену традиционных методов термической обработки технологиями лазерной обработки поверхности.

Многочисленные публикации отечественных и зарубежных ученых [1–18] подтверждают актуальность проблем, связанных с влиянием режимов лазерной закалки на структуру и свойства различных материалов. Влиянием различных схем лазерной обработки на прочность и жесткость тонкостенных деталей, к которым предъявляются повышенные требования по устойчивости формы, занимались авторы работы [19]. В процессе исследования разработана технология нанесения на внутренней или наружной поверхности

детали (или на обе сразу) упрочняющих дорожек различной конфигурации, которые образуют в теле армирующий каркас с заданной геометрией и представляющий собой участки того же материала с более высокими значениями твердости. Установлены: оптимальное отношение твердости армирующего каркаса к твердости основы, оптимальное отношение ширины дорожек армирующего каркаса к ширине детали, оптимальное отношение глубины упрочненной зоны к толщине детали. Авторы [17] исследовали зависимости характеристик прочности и пластичности, а также микротвердости образцов из коррозионно-стойкой стали 40Х13 от режимов лазерной поверхностной закалки волоконным лазером. Установлено, что разрушение обработанных образцов во всех случаях обладало признаками, характерными хрупкому разрушению, хрупкий характер с низким уровнем разрушающих деформаций при напряжениях ниже предела прочности исходного материала. При скорости движения лазера $V = 500$ мм/мин, пятне сканирования $4,0 \times 2,25$ мм и двусторонней

обработке установлено незначительное увеличение временного сопротивления относительно необработанного материала. В работе [20] проведены исследования влияния скорости лазерного сканирования при лазерной закалке и легировании излучением иттербиевого волоконного лазера мощностью 1 кВт на механические характеристики образцов из стали 10Г2. Результаты испытаний на статическое растяжение указывают на пластический характер разрушения обработанных образцов. Напряжения разрушения закаленных образцов возросли на 10–14 % при пропорциональном снижении характеристик пластичности. Напряжения разрушения борированных образцов также возросли на 10–14 % при снижении характеристик пластичности более чем в два раза. Диаграммы растяжения показали незначительное изменение модуля упругости материала образцов после лазерной закалки и более существенное при лазерном борировании по сравнению с исходным материалом.

Следует отметить, что исследования в основном заключаются в определении влияния режимов лазерной закалки на износостойкость, а проблеме влияния лазерной обработки на прочностные характеристики и характеристики пластичности материала уделяется недостаточное внимание. Анализ литературных источников показал, что среди многочисленных публикаций отечественных и зарубежных ученых недостаточно исследований, посвященных взаимосвязи схем лазерной обработки и механических свойств материала упрочненной зоны.

Методика проведения испытаний

Для определения зависимости характеристик прочности и пластичности стали 40Х13 от схем лазерной поверхностной обработки образцы подвергались лазерной закалке и легированию (таблица 1). Для этого применялся технологический комплекс на основе иттербиевого волоконного лазера. В качестве источника излучения использовался волоконный иттербиевый лазер непрерывного действия ЛК-1000 фирмы IPG (США) (тип YLR-1) с максимальной мощностью 1 кВт, длиной волны 1,06 мкм [21]. Важной особенностью данного вида лазеров является то, что их технико-экономические показатели позволяют изменять мощность излучения с очень высокой скоростью в соответствии с заданной программой.

Технологический комплекс оборудован сканирующей системой на основе 2D-сканера фирмы Ситела (РБ), которая обеспечивает многократное перемещение пятна обработки по обрабатываемой поверхности с высокой частотой в направлении, перпендикулярном направлению обработки. Многократное перемещение лазерного пятна с высокой частотой обеспечивается применением системы двух зеркал, которые согласованно совершают колебания во взаимно перпендикулярных направлениях (рисунок 1). При обработке образцов при скорости подачи координатной системы (скорости сканирования) $V = 500$ мм/мин частота сканирования соответствовала 220 Гц, а размер лазерного пятна равен 0,35 мм. Расстояние от поверхности образца до последнего дефлектора составило 450 мм.

Таблица 1 – Режимы лазерной обработки

Марка стали, размер образца	№ партии	Вид обработки	Обработка, количество дорожек, шт	Количество, шт
40Х13, 7х20х200	НО	Без обработки	–	3
	1	Борирование	С двух сторон, пять дорожек	3
	2		С двух сторон, две дорожки	3
	3		С двух сторон, «сетка»	3
	4	Закалка	С двух сторон, пять дорожек	3
	5		С двух сторон, две дорожки	3
	6		С двух сторон, «сетка»	3

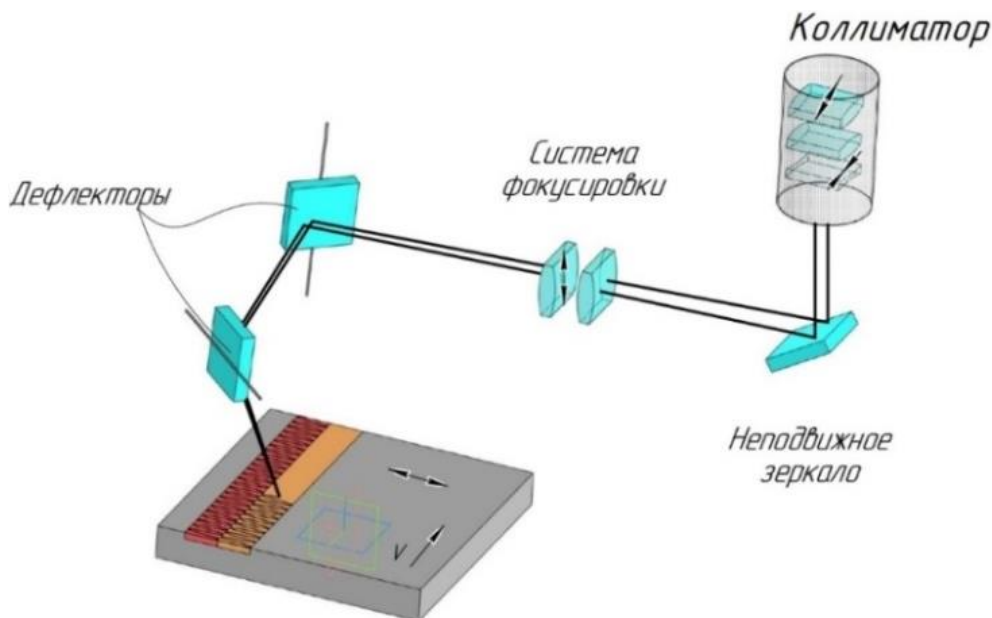


Рисунок 1 – Схема сканирующей системы

Программа движения лазерного пятна, разработанная авторами [22] и применяемая в данном технологическом комплексе, позволяет уменьшить зоны нестабильности тепловых полей, что в свою очередь обеспечивает высокое качество обрабатываемой поверхности и позволяет использовать лазерную обработку в качестве чистовой. По программе лазерный луч при скорости сканирования $V = 0$ мм/мин «отрисовывает» на поверхности образца пятно сканирования с размерами $H \times T$ (рисунок 2). Пятно сканирования может состо-

ять из различного количества «линий». При мощности излучения в 100 % лазерное пятно движется по траектории от точки А до точки В. Между точками В и С, т. е. на переходе от одной линии к другой, мощность излучения равна 0 %. Таким образом лазерное пятно перемещается до точки D, где мощность излучения вновь становится равна 0 % и лазерное пятно возвращается в точку А. При обработке образцов размер лазерного пятна составил $4 \times 2,25$ мм и включал в себя 7 линий.

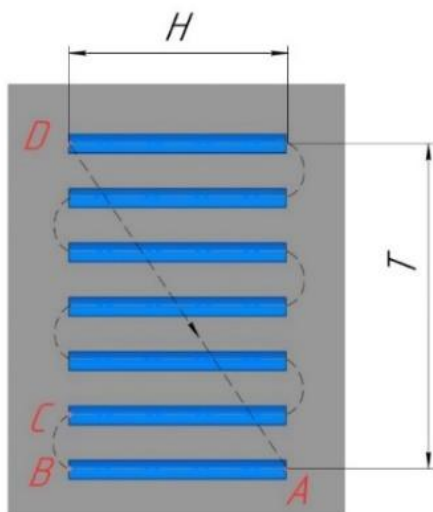


Рисунок 2 – Схема движения лазерного луча по пятну сканирования при скорости подачи $V = 0$

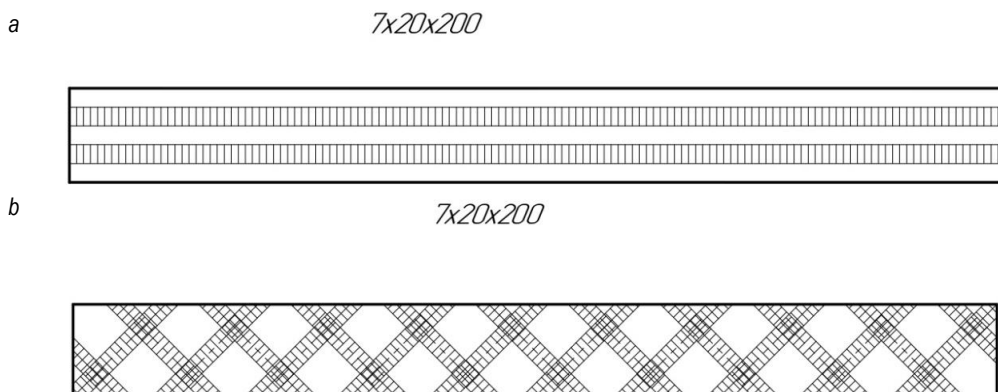
Перемещения оптической системы относительно образцов проводится с помощью координатного стола, оснащенного системой числового программного управления РУХ-4.0 (ООО «Рухсервомотор», РБ) [23]. Скорость сканирования при лазерной обработке составила $V = 500$ мм/мин.

Размеры образцов: толщина – 7 мм, ширина – 20 мм и длина – 200 мм. На противоположных плоскостях образца с габаритными размерами 20×200 мм наносились по 2–5 дорожек (рисунок 3а), а также использовалась схема нанесения своеобразной «сетки» (рисунок 3б). Расстояние между лазерными дорожками «сетки» составило примерно 17 мм по горизонтали. При легировании на образцы предварительно наносилась смесь бора аморфного с ацетоном и клеем БФ-4.

Для определения прочностных характеристик образцы испытывались на статическое растяжение согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» на машине разрывной Meitesi WDW-300 (Китай). Данная машина снабжена программным обеспечением MaxTest, которое позволяет осуществлять настройку параметров в соответствии с основными международными стандартами ISO, ASTM, DIN, EN и ГОСТ. Разрывная машина Meitesi WDW-300 внесена в реестр средств измерений Республики Беларусь и поставляется с поверкой и калибровкой.

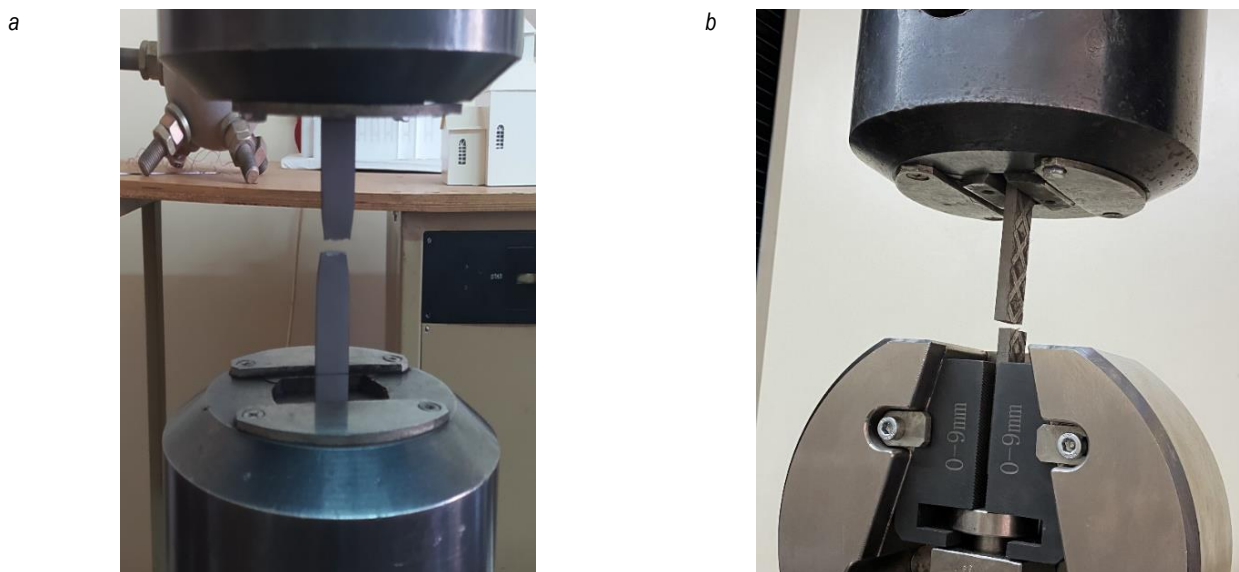
Результаты исследований и их обсуждение

Испытания образцов на растяжение проводились при нагружении со скоростью 5 мм/мин (рисунок 4).



a – нанесение двух дорожек; b – нанесение «сетки»

Рисунок 3 – Схемы нанесения лазерной обработки

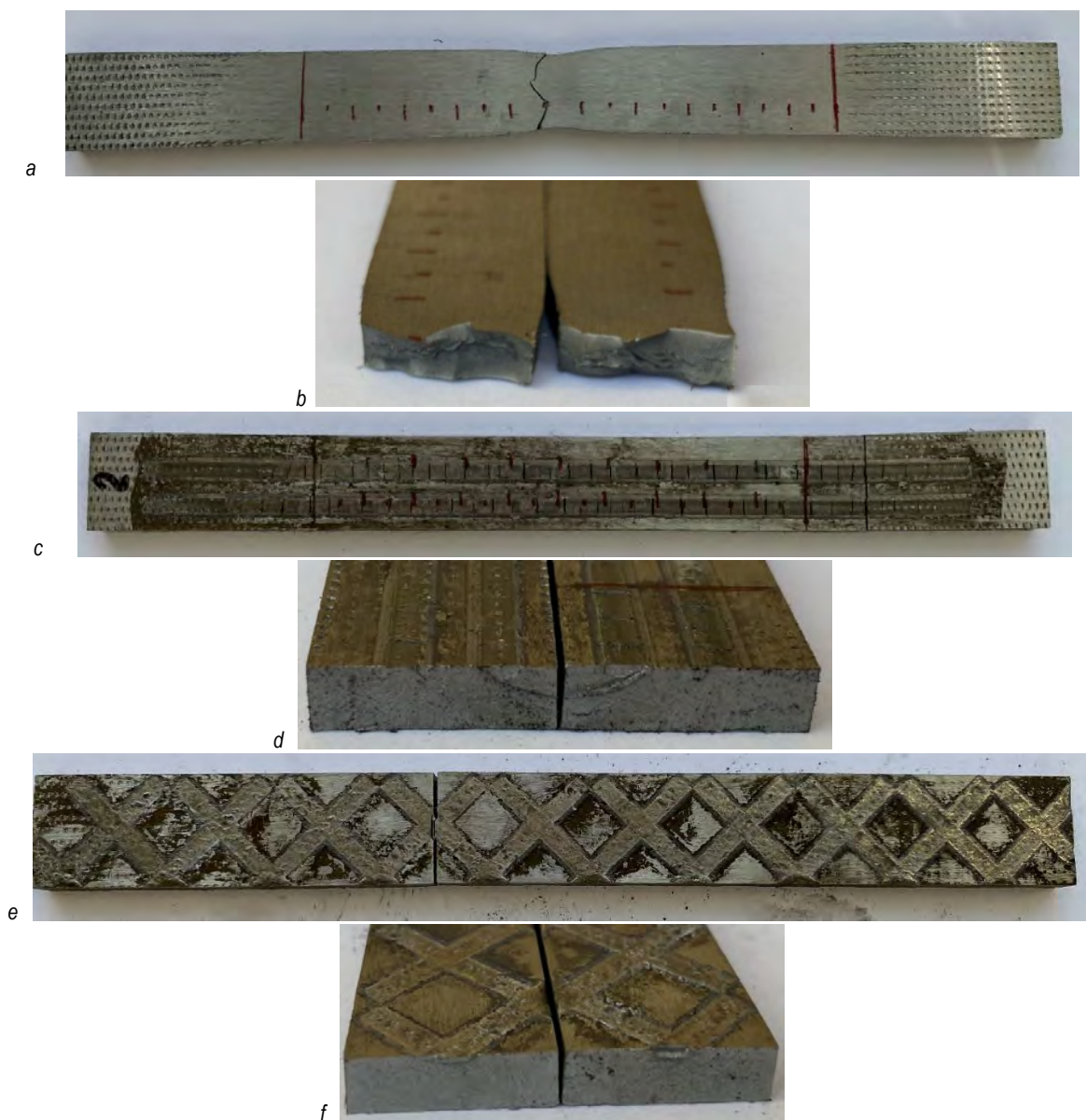


a – необработанный образец [17], b – образец, обработанный лазером (№ 3а)

Рисунок 4 – Испытания материала образцов на растяжение

Во время испытаний необработанные образцы (НО) разрушились в пределах расчетной длины и со всеми признаками вязкого разрушения (образование «шейки», деформации материала), соответствующими требованиям ГОСТ. Разрушение обработанных образцов обладало признаками, характерными хрупкому разрушению: отсутствие «шейки»; небольшие деформации; ярко выраженный крупнозернистый рельеф излома, состоящий из множества блестящих граней. Хрупкий характер

разрушения обработанных образцов можно объяснить образованием в процессе лазерной обработки зон измененной структуры исходного материала, которые оказывают влияние на локальное напряженно-деформированное состояние зерен материала в своей окрестности. Все испытанные образцы разрушились по сечениям, перпендикулярным направлению растягивающей нагрузки. Примеры разрушенных образцов и сечений разрушения приведены на рисунке 5.



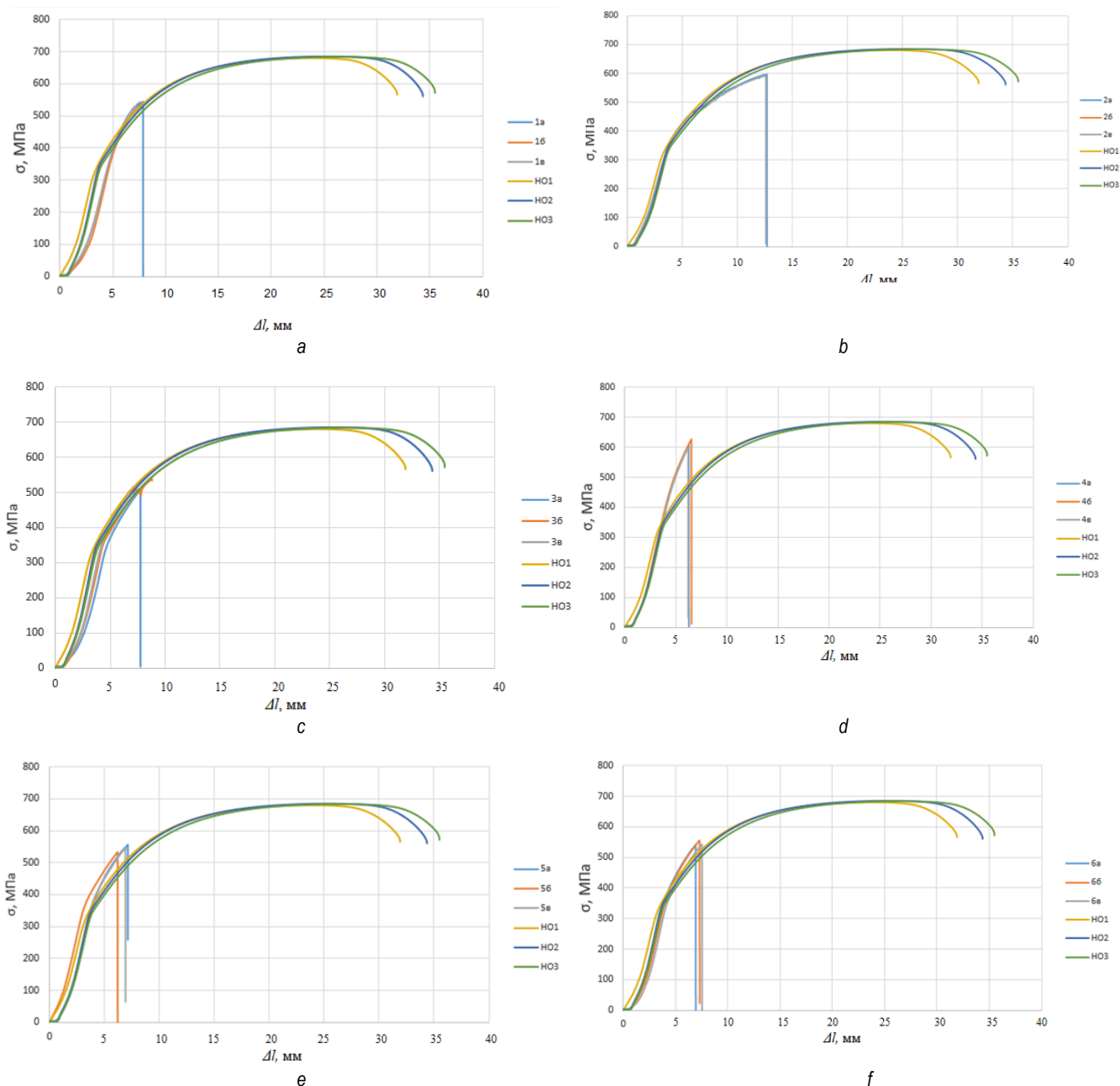
a, b – разрушение в пределах расчетной длины образца НО3; *c, d* – разрушение в зоне захватов образца 2б; *e, f* – разрушение в пределах расчетной длины образца 3а

Рисунок 5 – Разрушенные образцы (*a, c, e*) и сечения разрушения (*b, d, f*)

В результате исследований получены максимальное усилие и диаграммы зависимости продольной растягивающей силы P от удлинения рабочей части образца Δl . По результатам испытаний было определено максимальное нормальное напряжение. Данные сведены в таблицу 2.

По полученным результатам испытаний закаленных и легированных образцов построены зависимости возникающих в них напряжений σ от удлинения рабочей части образца Δl (рисунок 6) с последующим их наложением на графики образцов, не подверженных лазерной обработке. В связи с отличием формы испытываемых образцов от рекомендуемой соответствующими

стандартами и особенностями конструкции захватов испытательной машины в процессе нагружения имело место значительное поверхностное деформирование материала образцов в зоне захватов и их взаимное проскальзывание друг относительно друга (рисунок 7), что особенно заметно сказалось на начальных участках диаграмм нагружения. Поэтому построение соответствующих зависимостей напряжений σ от деформаций ϵ не проводилось. Вместе с тем, для всех образцов на диаграммах σ (Δl) видна высокая повторяемость результатов испытаний, которая, на наш взгляд, позволяет сделать некоторые общие выводы.



а – партия № 1, b – партия № 2, с – партия № 3, d – партия № 4, e – партия № 5, f – партия № 6
 Рисунок 6 – Зависимость возникающих в образцах напряжений (σ) от удлинения рабочей части образца (Δl)

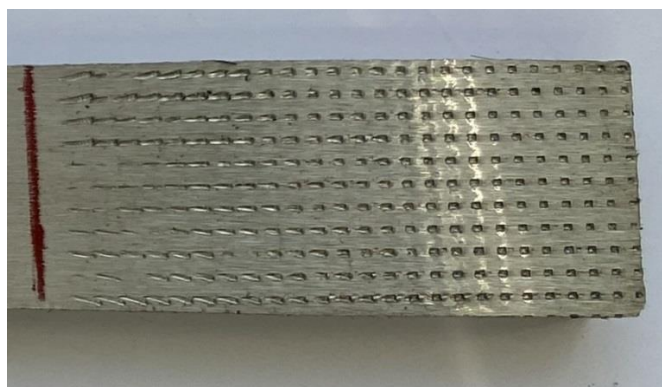


Рисунок 7 – Деформирование материала образцов в зоне захватов (образец 3а)

Диаграммы зависимости возникающих в образцах напряжений (σ) от удлинения рабочей части образца (Δl) свидетельствуют о незначительном влиянии различных схем лазерной закалки и легирования на величину модуля упругости материала, так как изменение угла наклона начального участка диаграммы мало. Для всех обработанных образцов характерен невысокий уровень разрушающих деформаций. Разрушающие напряжения на обработанных образцах находятся в пределах 500–600 МПа и составляют примерно 70–90 % от предела прочности образцов, не подвергавшихся обработке. Наиболее высокий уровень разрушающих деформаций соответствует партии № 4. Предельная упругая нагрузка материала обработанных образцов повысилась, увеличив зону их упругой работы.

Таблица 2 – Некоторые показатели при испытании плоских образцов на статическое растяжение

Номер партии	Маркировка	Начальная площадь поперечного сечения, F_0 , мм ²	Максимальное усилие, P_{max} , Н	Перемещение захватов разрывной машины при максимальной нагрузке, мм	Временное сопротивление, σ_v , Н/мм ²
НО	1	140,00	95 210	23,92	680
	2		95 870	25,92	685
	3		95 716	26,40	684
1	а	140,00	76 280	7,85	545
	б		75 112	7,65	537
	в		73 992	7,35	529
2	а	140,00	83 606	12,69	597
	б		87 776	19,75	627
	в		82 972	12,58	593
3	а	140,00	71 060	7,75	508
	б		75 528	8,79	536
	в		76 526	8,30	547
4	а	140,00	84 814	6,27	606
	б		87 702	6,52	626
	в		83 946	6,21	600
5	а	140,00	77 902	7,13	556
	б		74 688	6,19	533
	в		76 486	6,91	546
6	а	140,00	75 760	6,92	541
	б		77 806	7,29	556
	в		75 984	7,53	543

Заключение

Проведены исследования влияния различных схем лазерной закалики и легирования излучением волоконного иттербиевого лазера на механические характеристики образцов из стали 40Х13. Результаты испытаний образцов на статическое растяжение указывают на хрупкое разрушение обработанных образцов. Разрушающие напряжения закаленных образцов уменьшились на 9–26 % со значительным снижением характеристик пластичности. Диаграммы растяжения не показали изменений модуля упругости материала образцов после лазерной обработки по сравнению с исходным материалом.

Список цитированных источников

- Братухин, А. В. Особенности лазерного упрочнения оснастки для серийного производства авиационного титанового крепежа / А. В. Братухин // Технология машиностроения : обзор.-аналит., науч.-техн. и произв. журн. / Изд. центр "Технология машиностроения". – 2019. – № 5. – С. 25–29.
- Яреско, С. И. Анализ стойкости и изнашивания твердосплавного инструмента после лазерной термообработки / С. И. Яреско // Известия Самарского науч. центра Российской академ. наук. – 2001. – Т. 3, № 1. – С. 27–37.
- The Effects of Laser Surface Hardening on Microstructural Characteristics and Wear Resistance of AISI H11 Hot Work Tool Steel / M. Šebek, Ladislav Falat, F. Kováč, I. Petryshynets [et al.] // Archives of Metallurgy & Materials. – 2017. – Vol. 62. – P. 757–762.
- Effect of Laser Hardening on Die Steel Microhardness and Surface Quality / A. V. Aborkin, V. E. Vaganov, A. N. Shlegel', I. M. Bukarev // Metallurgist. – 2015. – Vol. 59, Issue 7–8. – P. 619–625.
- Dry sliding friction wear behaviour of high power diode laser hardened steels and cast iron / K. Sridhar, V. A. Katkar, P. K. Singh, J. M. Haake // Surface Engineering. – 2007. – Vol. 23. – P. 129–141.
- On the laser quenching of the groove of the piston head in large diesel engines / Q. Liu, Y. Song, Y. Yang [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. – 1998. – Vol. 7. – P. 402–406.
- Laser surface hardening of gray cast iron used for piston ring / J. H. Hwang, Y. S. Lee, D. Y. Kim, J. G. Youn // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2002. – Vol. 11. – P. 294–300.
- The influence of laser hardening on wear in the valve and valve seat contact / T. Slatter, H. Taylor, R. Lewis, P. King // Wear. – 2009. – Vol. 267. – P. 797–806.
- Магин, Д. Ю. Исследование структуры и свойств высокопрочной теплостойкой стали после объемной термической обработки и лазерного поверхностного упрочнения / Д. Ю. Магин, С. В. Костромин // Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. П. Е. Алексеева. – 2013. – № 4. – С. 256–261.
- Девоино, О. Г. Обеспечение ресурсных параметров ответственных элементов механических трансмиссий с использованием поверхностных слоев, формируемых лазерными технологиями / О. Г. Девоино, И. В. Швец // Теоретическая и прикладная механика : Междунар. науч.-техн. сб. / Белорусский нац. техн. ун-т ; редкол.: А. В. Чигарев (пред. редкол.). – Минск : БНТУ, 2019. – Вып. 34. – С. 266–270.
- Влияние лазерной закалики на микроструктуру и абразивную износостойкость стали 30ХГСА / Л. Е. Афанасьева, М. В. Новоселова, И. А. Барабанова, Г. В. Раткевич // Металлы. – 2020. – № 1. – С. 54–58.
- A quantitative analysis of the effect of laser transformation hardening on crack driving force in steels / B. Q. Yang, K. Zhang, G. N. Chen [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Vol. 201. – P. 2208–2216.
- Experimental studies on the microstructure and hardness of laser-treated steel specimens / J. Rana, G. L. Goswami, S. K. Jha [et al.] // Optics and Laser Technology. – 2007. – Vol. 39. – P. 385–393.
- Tianmin, S. Impact wear behavior of laser hardened hypoeutectoid 2Cr13 martensite stainless steel / S. Tianmin, H. Meng, T. H. Yuen // Wear. – 2003. – Vol. 255. – P. 444–455.
- Исследование влияния параметров процесса лазерной наплавки порошка стали 316L на структуру и механические свойства образцов / И. С. Логинова, Д. П. Быковский, С. В. Адиша [и др.] // Технология легких сплавов. – 2016. – № 4. – С. 5–11.
- Журавель, В. М. Лазерное армирование / В. М. Журавель // РИТМ машиностроения. – 2018. – № 5. – С. 34–35.
- Влияние режимов лазерной закалики на свойства стали 40Х13 / О. М. Мицирук, А. И. Веремейчик, О. Г. Девоино [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 103–112. – DOI: 10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112.

18. Девоино, О. Г. Обеспечение ресурсных параметров ответственных элементов механических трансмиссий с использованием поверхностных слоев, формируемых лазерными технологиями / О. Г. Девоино, И. В. Швец // Теоретическая и прикладная механика: Междунар. науч.-техн. сб. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: А. В. Чигарев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – Вып. 34. – С. 266–270.
19. Журавель, В. М. Лазерное армирование / В. М. Журавель // РИТМ машиностроения. – 2018. – № 5. – С. 34–35.
20. Research into the influence of laser scanning speed on the characteristics of 10G2 steel / O. M. Mishchiruk, A. I. Verameichyk, M. V. Neroda, B. G. Kholodar // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – № 3. – P. 69–74. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-69-74.
21. Скойбеда, А. Т. Лазерное упрочнение зубчатых колес из высокопрочного чугуна / А. Т. Скойбеда, А. А. Калина, О. Г. Девоино // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Гос. науч. учреждение "Объедин. ин-т машиностроения Нац. акад. наук Беларуси"; [редкол. А. А. Дюжев (председатель) и др.]. – Вып. 8. – С. 289–293.
22. Закалка крупногабаритных деталей с использованием сканирующего излучения оптоволоконного лазера с программным изменением мощности / О. Г. Девоино, В. В. Жарский, А. П. Пилипчук, В. В. Рудый // Фотоника. – 2019. – Т. 3, № 6. – С. 524–530.
23. Геометрия однослойного покрытия при лазерной наплавке с поперечным сканированием / О. Г. Девоино, М. А. Кардаполова, Н. И. Луцко, Л. И. Пилецкая // Актуальные проблемы прочности: матер. Междунар. науч. конф., Витебск, 23–27 мая 2022 г. / под ред. В. В. Рубаника, – Минск: УП "ИВЦ Минфина", 2022. – С. 48–50.
10. Devojno, O. G. Obespechenie resursnyh parametrov otvetstvennyh elementov mekhanicheskikh transmissij s ispol'zovaniem poverhnostnyh sloev, formiruemyh lazernymi tekhnologiyami / O. G. Devojno, I. V. SHvec // Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: Mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. / Belorusskij nac. tekhn. un-t; redkol.: A. V. CHigarev (pred. redkol.). – Minsk: BNTU, 2019. – Vyp. 34. – S. 266–270.
11. Vliyanie lazernoj zakalki na mikrostrukturu i abrazivnyuyu iznosostojkost' stali 30HGSA / L. E. Afanas'eva, M. V. Novoselova, I. A. Barabonova, G. V. Ratkevich // Metally. – 2020. – № 1. – S. 54–58.
12. A quantitative analysis of the effect of laser transformation hardening on crack driving force in steels / B. Q. Yang, K. Zhang, G. N. Chen [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Vol. 201. – P. 2208–2216.
13. Experimental studies on the microstructure and hardness of laser-treated steel specimens / J. Rana, G. L. Goswami, S. K. Jha [et al.] // Optics and Laser Technology. – 2007. – Vol. 39. – P. 385–393.
14. Tianmin, S. Impact wear behavior of laser hardened hypoeutectoid 2Cr13 martensite stainless steel / S. Tianmin, H. Meng, T. H. Yuen // Wear. – 2003. – Vol. 255. – P. 444–455.
15. Issledovanie vliyaniya parametrov processa lazernoj naplavki poroshka stali 316L na strukturu i mekhanicheskie svoystva obrazcov / I. S. Loginova, D. P. Bykovskij, S. B. Adisa [i dr.] // Tekhnologiya legkih splavov. – 2016. – № 4. – S. 5–11.
16. ZHuravel', V. M. Lazernoe armirovanie / V. M. ZHuravel' // RITM mashinostroeniya. – 2018. – № 5. – S. 34–35.
17. Vliyanie rezhimov lazernoj zakalki na svoystva stali 40H13 / O. M. Mishchiruk, A. I. Verameichyk, O. G. Devojno [i dr.] // Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk. – 2023. – T. 68, № 2. – S. 103–112. – DOI: 10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112.
18. Devojno, O. G. Obespechenie resursnyh parametrov otvetstvennyh elementov mekhanicheskikh transmissij s ispol'zovaniem poverhnostnyh sloev, formiruemyh lazernymi tekhnologiyami / O. G. Devojno, I. V. SHvec // Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: Mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. / Belarus. nac. tekhn. un-t; redkol.: A. V. CHigarev (pred. redkol.) [i dr.]. – Minsk: BNTU, 2019. – Vyp. 34. – S. 266–270.
19. ZHuravel', V. M. Lazernoe armirovanie / V. M. ZHuravel' // RITM mashinostroeniya. – 2018. – № 5. – S. 34–35.
20. Research into the influence of laser scanning speed on the characteristics of 10G2 steel / O. M. Mishchiruk, A. I. Verameichyk, M. V. Neroda, B. G. Kholodar // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – № 3. – P. 69–74. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-69-74.
21. Skojbeda, A. T. Lazernoe uпрочnenie zubchatykh koles iz vysokoprochnogo chuguna / A. T. Skojbeda, A. A. Kalina, O. G. Devojno // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sb. nauch. tr. / Gos. nauch. uchrezhdenie "Ob'edin. in-t mashinostroeniya Nac. akad. nauk Belarusi"; [redkol. A. A. Dyuzhev (predsedatel') i dr.]. – Vyp. 8. – S. 289–293.
22. Zakalka krupnogabaritnykh detalej s ispol'zovaniem skaniruyushchego izlucheniya optovolokonnoho lazera s programmym izmeneniem moshchnosti / O. G. Devojno, V. V. ZHarskij, A. P. Pilipchuk, V. V. Rudyj // Fotonika. – 2019. – T. 3, № 6. – S. 524–530.
23. Geometriya odnoslojnogo pokrytiya pri lazernoj naplavke s poperechnym skaniruvaniem / O. G. Devojno, M. A. Kardapolova, N. I. Lucko, L. I. Pileckaya // Aktual'nye problemy prochnosti: mater. Mezhdunar. nauch. konf., Vitebsk, 23–27 maya 2022 g. / pod red. V. V. Rubanika, – Minsk: UP "IVC Minfina", 2022. – S. 48–50.

References

1. Bratuhin, A. V. Osobennosti lazernogo uprochneniya osnastki dlya serijnogo proizvodstva aviacionnogo titanovogo krepzha / A. V. Bratuhin // Tekhnologiya mashinostroeniya: obzor.-analit., nauch.-tekhn. i proizv. zhurn. / Izd. centr "Tekhnologiya mashinostroeniya". – 2019. – № 5. – S. 25–29.
2. Yares'ko, S. I. Analiz stojkosti i iznashivaniya tverdosplavnogo instrumenta posle lazernoj termoobrabotki / S. I. Yares'ko // Izvestiya Samarskogo nauch. centra Rossijskoj akad. nauk. – 2001. – T. 3, № 1. – S. 27–37.
3. The Effects of Laser Surface Hardening on Microstructural Characteristics and Wear Resistance of AISI H11 Hot Work Tool Steel / M. Šebek, Ladislav Falat, F. Kováč, I. Petryshynets [et al.] // Archives of Metallurgy & Materials. – 2017. – Vol. 62. – P. 757–762.
4. Effect of Laser Hardening on Die Steel Microhardness and Surface Quality / A. V. Aborkin, V. E. Vaganov, A. N. Shlegel', I. M. Bukarev // Metallurgist. – 2015. – Vol. 59, Issue 7–8. – P. 619–625.
5. Dry sliding friction wear behaviour of high power diode laser hardened steels and cast iron / K. Sridhar, V. A. Katkar, P. K. Singh, J. M. Haake // Surface Engineering. – 2007. – Vol. 23. – P. 129–141.
6. On the laser quenching of the groove of the piston head in large diesel engines / Q. Liu, Y. Song, Y. Yang [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. – 1998. – Vol. 7. – P. 402–406.
7. Laser surface hardening of gray cast iron used for piston ring / J. H. Hwang, Y. S. Lee, D. Y. Kim, J. G. Youn // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2002. – Vol. 11. – P. 294–300.
8. The influence of laser hardening on wear in the valve and valve seat contact / T. Slatter, H. Taylor, R. Lewis, P. King // Wear. – 2009. – Vol. 267. – P. 797–806.
9. Magin, D. YU. Issledovanie struktury i svoystv vysokoprochnoj teplostojkoj stali posle ob'emnoj termicheskoy obrabotki i lazernogo poverhnostnogo uprochneniya / D. YU. Magin, S. V. Kostromin // Tr. Nizhegorodskogo gos. tekhn. un-ta im. R. E. Alekseeva. – 2013. – № 4. – S. 256–261.

Материал поступил 11.02.2025, одобрен 22.02.2025, принят к публикации 03.03.2025

ОПЫТ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОБУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМ ДИСЦИПЛИНАМ

Г. Л. Муравьев¹, Ю. Б. Крапивин², Ю. В. Савицкий³, В. И. Хвещук⁴

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: mgl_work@mail.ru

² К. т. н., доцент, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ybox@list.ru

³ К. т. н., доцент, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: yury.savitsky@tut.by

⁴ К. т. н., доцент, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: hvi2018@list.ru

Реферат

Предмет рассмотрения – процессы обучения инженерным дисциплинам в части их компьютерной поддержки, согласованной с методами преподавания, требованиями обучения в вузе. Представлен опыт системного учета особенностей преподавания, тенденций значимости самостоятельной работы, актуальности удаленных форм образования посредством комплексирования принципов модульного обучения и возможностей информационных технологий. Подход к автоматизации рассмотрен применительно к дисциплинам цикла моделирования систем, которые аккумулируют черты технических предметов: характеризуются формализацией, работой с абстрактными системами, моделями; обладают практической направленностью; предполагают использование программных инструментов и т. д. Обучение моделированию является непрерывным, продолжительным процессом, требует соответствующей подготовки учебного материала и автоматизации трудоемких этапов.

Для обеспечения целостности обучения выделено ядро предмета – “объединяющий” модуль “Моделирование систем на базе сетей с очередями”, который: интегрирует знания, получаемые в рамках дисциплины; специализирует их для применения в сфере оценки характеристик объектов; позволяет применить навыки не только фрагментарно, но и ко всему циклу моделирования.

Для поддержки наиболее трудоемких в “ручном” исполнении процессов обучения, контроля и оценки результатов модуль оснащен комплексом программно-информационных средств. Он включает подсистемы построения сетевых и модельных спецификаций, подсистему аттестации (тестирования) моделей, базу данных учебных заданий и др. Комплекс обеспечивает: получение объектов моделирования (уникальных вариантов описаний учебных систем, отвечающих заданным требованиям к их сложности и режиму функционирования); генерацию необходимых для аттестации моделей наборов тестовых данных; построение кодов имитационных моделей систем на входном языке стандартной системы моделирования; проведение аттестации моделей.

Это обеспечивает системный подход к обучению, так как задание на разработку моделей согласуется с его результатами, а сами процессы моделирования имитируются от этапа обследования системы до оценки адекватности моделей, прогнозирования характеристик систем. Комплекс может быть развернут в десктопном варианте, в том числе в составе локальной сети либо как веб-приложение с доступом через стандартный браузер.

Ключевые слова: автоматизация, информационные технологии, обучение, технические дисциплины, модуль, модульные инструкции, подсистема, модель.

EXPERIENCE IN AUTOMATION OF TEACHING ENGINEERING DISCIPLINES

G. L. Muravyov, Y. B. Krapivin, Y. V. Savitsky, V. I. Khviashchuk

Abstract

The subject of consideration is the processes of teaching engineering disciplines in terms of their computer support, consistent with teaching methods and the requirements of education at the university. The article presents the experience of systematically taking into account the characteristics of teaching, trends in the importance of independent work, the relevance of distance learning through the integration of the principles of modular learning and the capabilities of information technology. The approach to automation is considered in relation to the disciplines of the system modeling cycle, which accumulate the features of technical subjects: are characterized by formalization, work with abstract systems, models; have a practical focus; involve the use of software tools, etc. Modeling training is a continuous, lengthy process that requires appropriate preparation of training material and automation of labor-intensive stages.

To ensure the integrity of training, the core of the subject has been identified – the “unifying” module “Modeling of systems based on networks with queues”, which: integrates the knowledge obtained within the framework of the discipline; specializes them for application in the field of assessing the characteristics of objects; allows the skills to be applied not only fragmentarily, but also to the entire modeling cycle.

To support the most labor-intensive processes of training, monitoring and evaluation of results, the module is equipped with a set of software and information tools. The complex consists of a subsystem for constructing network specifications and model specifications, a subsystem for evaluating (testing) models, a database of training tasks, etc. The complex provides: obtaining modeling objects (descriptions of simplified systems that meet specified requirements for their complexity and operating mode); formation of test data sets required for model certification; construction of codes for simulation models of systems in the input language of the standard modeling system; certification of models.

This ensures a systematic approach to learning, since the tasks of developing models are consistent with the results obtained, and the modeling processes themselves are reproduced from the stage of studying the system to assessing the adequacy of models and predicting the characteristics of systems. The complex can be deployed in a desktop version, including as part of a local network, or as a web application with access through a standard browser.

Keywords: automation, information technology, training, technical disciplines, module, modular instructions, subsystem, model.

Введение

Предмет рассмотрения – процессы обучения инженерным дисциплинам в части применения информационных технологий (ИТ) для

обеспечения компьютерной поддержки их планирования и реализации [1, 2], согласованной с методами преподавания, требованиями обучения в вузе.

Особенности современного обучения в высшей школе [3–5]: рост аудитории обучаемых, “анонимности” обучения – дистанции между участниками процесса; разнородность обучаемых по уровню подготовки; проблемы перехода от школьной системы к университетскому образованию, требующему самодисциплины, организованности, мотивации; рост требований государства, общества к системе образования и педагогам в части самосовершенствования, активизации научной работы; вовлеченность студентов в использование Интернета, влияние ИТ, требующие дополнительных усилий педагогов для соответствия новым требованиям.

Перечисленное определяет актуальность работы, так как существует потребность повышения адаптивности курсов дисциплин, сочетающей массовость образования с его индивидуализацией и учитывающей значимую составляющую самостоятельной работы, разнообразие форм подготовки специалистов, трудоемкость организации обучения, необходимость использования ИТ.

Это особо важно из-за распространения сетевых технологий, средств дистанционного обучения, выросшей роли самоподготовки специалиста в ходе переподготовки, повышении квалификации, в том числе на базе заочных, удаленных форм обучения.

Проблема сведена: к анализу особенностей преподавания технических дисциплин на примере обучения моделированию; рассмотрению соответствия модульного подхода (МП) требованиям к организации обучения в высшей школе в рамках указанных дисциплин; разработке и апробации компонентов компьютерной поддержки процессов обучения, согласованных с МП.

Характеристика дисциплин

В работе в качестве примера рассмотрены дисциплины “Моделирование систем”, “Моделирование”, читаемые студентам очной, заочной, сокращенной форм образования специальностей 1 – 53 01 02 Автоматизированные системы обработки информации, 1 – 40 02 01 Вычислительные машины, системы и сети. Предмет дисциплин – системы в части их формализованного описания и моделирования, прогнозирования характеристик функционирования [6, 7].

Выделены характерные черты дисциплин, основные из которых приведены ниже. Дисциплины основываются на определенных уровнях базовой (знаний в области высшей математики, теории вероятностей и математической статистики, случайных процессов и т. д.) и специальной (знаний и умений в предметной области специальности, ИТ, включая владение программированием) подготовке, реализуются комбинированием методов, форм обучения (предусматривают лекционные, лабораторные занятия, выполнение контрольных заданий, самостоятельную работу обучаемых), требуют от обучаемых значительных, постоянных усилий в процессе самостоятельной работы. Что может составить для очной формы обучения от 55–60 % учебного времени) до 80 % (с учетом самостоятельного характера лабораторных занятий) и до 90 % для заочной, заочной сокращенной форм обучения.

Таким образом обучение моделированию является непрерывным, продолжительным, трудоемким процессом, требующим соответствующей подготовки учебного материала и автоматизации наиболее трудоемких этапов обучения. Эти дисциплины аккумулируют характерные особенности технических предметов: базируются на системе предоставляющих математических, инженерных курсов; отличаются формализацией, применением специального математического аппарата, работой с абстрактными системами – де-факто моделированием; обладают выраженной практической направленностью, способствуя выработке специфических навыков применения знаний в предметной области; используют программные инструменты, требуют знаний программирования, необходимых для разработки моделей и др.

Модульный подход, инструкции

Модульное обучение [8–12] как развитие программируемого, деятельностного подхода к образованию базируется на осознанном участии обучаемых. Парадигма МП опирается на принципы общей теории систем, реализуется на базе модулей и модульных инструкций – программ действий по изучению дисциплины, отображающих опыт и видение преподавателя, что имитирует контакт с педагогом. По версии ЮНЕСКО модульный курс это “... обучающий замкнутый комплекс, в состав которого входят педагог, обучаемые, учебный материал, средства поддержки индивидуализированного подхода...”.

А сам модуль – это автономная, целостная единица учебного материала, инструкции, средства контроля и т. д. Важное свойство МП – технологичность, достигаемая в том числе встроенной вариативностью сценариев обучения, возможностью повторного, междисциплинарного использования модулей и др. Актуальные достоинства МП, проблемы их реализации на практике приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики модульного подхода

Достоинства	Проблемы
– сбалансированные системные характеристики (целостность, полнота; структурированность; автономность; универсальность, гибкость, сочетаемость с другими формами обучения и др.)	– трудоемкость подготовки курса (близкая сложности создания учебника), необходимость значительных затрат времени, усилий преподавателя
– относительная простота, удобство применения готового модульного курса; пониженные требования к квалификации педагога; высвобождение его ресурсов, времени	– сложность разработки; требуются педагогическое мастерство, опыт, понимание особенностей преподавания курса
– эффективность использования курса в части адаптивности в отношении выбора темпа, времени, графика работы, методов обучения; масштабируемость на объем аудитории	– необходимы усилия по адаптации курса к учебным планам, программам, графику учебного процесса, распределению занятий по видам и часам
– потенциально высокое качество преподавания и обучения; постоянная обратная связь, контроль и сотрудничество с обучаемыми	– дополнительная эмоционально-психологическая нагрузка как результат интенсивного общения
– учет запросов государства на рост числа специалистов высшей квалификации без значимых дополнительных затрат и потребностей граждан в части реализации образовательных потребностей	– недостаточная поддержка педагогов в плане создания модульных курсов, на разработку которых требуются дополнительные ресурсы
– соответствие требованиям системы образования по согласованию с удаленными, заочными формами обучения, средствами ИТ	– требуется доработка курсов, наличие как минимум пользовательских знаний, умений в области ИТ

Модульная организация дисциплин

В рамках выбранных дисциплин выделены теоретические раздели и с учетом их информационной соподчиненности сформирована иерархия учебных единиц, обеспечивающая выбор сценария обучения с учетом целей и уровня подготовки. Учтены рекомендации ЮНЕСКО [9] по согласованию с международной системой классификации учебных модулей, целесообразность создания динамичных систем обучения, адаптируемых к меняющимся требованиям.

Для обеспечения целостности обучения определено ядро системы – “объединяющий” модуль. При необходимости для этого может быть добавлена специальная учебная единица. Здесь в его роли использован модуль “Моделирование систем на базе сетей с очередями”, где изучаются модели динамического уровня – системы массового обслуживания (СМО), стохастические сети (СС), сети массового обслуживания (СсМО), способы и инструменты их расчета средствами языков высокого уровня либо готовых систем моделирования (СМ) [13–17]. Особенности компьютерной поддержки рассмотрены на его примере. Выбор обусловлен тем, что модуль:

- интегрирует знания, получаемые в рамках дисциплины;
- специализирует их для применения в сфере оценки характеристик объектов;
- позволяет применить умения, навыки не только фрагментарно, но и ко всему циклу моделирования.

Тем самым учитываются базовые причинно-следственные процессы обучения, что отвечает системному подходу – согласует задание на разработку моделей с его результатами (имитируются процессы моделирования от начального этапа – обследования системы до заключительного – оценки адекватности моделей, прогнозирования характеристик систем).

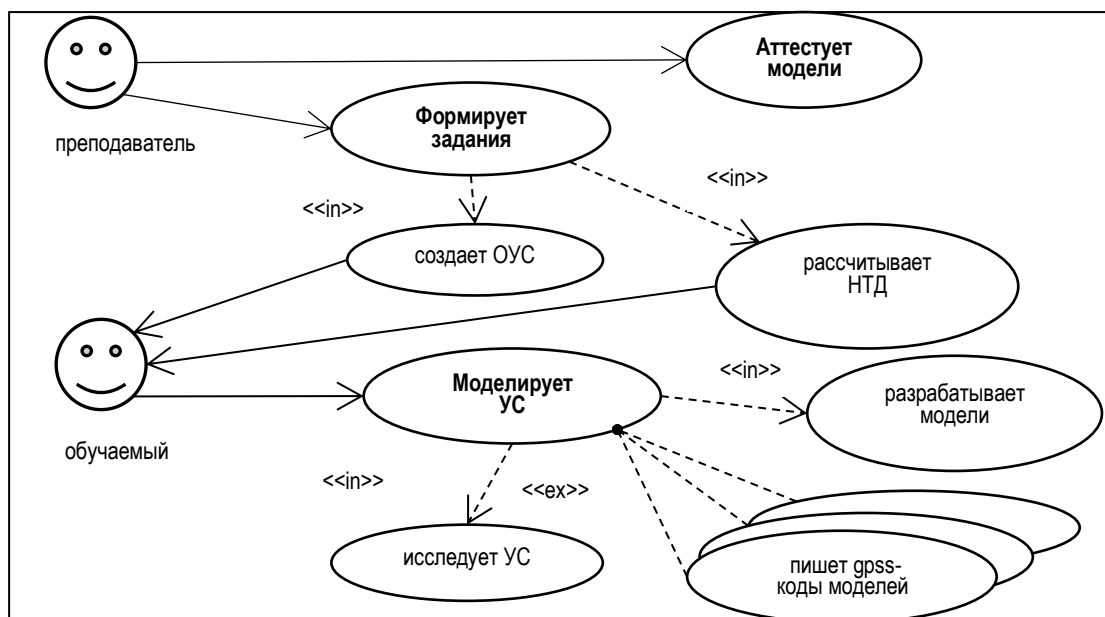


Рисунок 1 – Схема взаимодействия преподаватель – обучаемый

На рисунке 1 приведена упрощенная схема (в нотации диаграмм прецедентов, где обозначения in – include, ex – extend указывают их соотношения) взаимодействия участников процесса обучения в рамках центрального модуля, реализуемая вручную либо поддерживаемая средствами автоматизации.

Здесь преподаватель готовит задания для моделирования учебных систем (УС). Задания включают описания учебных систем ОУС, наборы тестовых данных НТД (параметры и характеристики обслуживания запросов в системе), указания (перечень работ, требования к отчету).

Студент изучает моделирование, проектирует, реализует (в том числе на готовых СМ как GPSS World [18] и др.) и исследует модели и заданную систему. Преподаватель контролирует процессы обучения, аттестует полученные модели на базе эталонных характеристик из НТД.

Трудности обучения на реальных системах, потребность в формировании описаний параметров большого числа УС, сложность “ручного” получения отличающихся вариантов архитектур УС, трудоемкость получения эталонных характеристик сетей, проверки корректности и оценки адекватности моделей делают задачу автоматизации указанных процессов актуальной.

Программно-информационный комплекс

Для практических занятий, самостоятельной работы могут использоваться готовые системы моделирования типа Arena, AnyLogic и др. Здесь выбран GPSS World с языком моделирования GPSS, что не принципиально, но обусловлено поддержкой процессного подхода к описанию моделей, популярностью для обучения, наличием бесплатных версий. А для поддержки наиболее трудоемких в “ручном” исполнении процессов обучения, контроля и оценки результатов модуль оснащен комплексом программно-информационных средств.

Комплекс, помимо стандартной СМ, включает подсистемы:

- построения сетевых (ППСС) и модельных спецификаций (ППМС), подсистему аттестации (тестирования) моделей (ПАМ);
- базу данных заданий и тестов НТД;
- средства аналитического расчета сетей и др.

Комплекс обеспечивает генерацию:

- объектов моделирования (вариантов ОУС, отвечающих заданным требованиями к сложности и режиму функционирования УС);
- получение необходимых для аттестации моделей наборов НТД;
- построение кодов имитационных моделей систем на входном языке СМ (здесь gpss-кодов);
- аттестацию моделей.

Аттестация разработанных обучаемых моделей, поддерживаемая подсистемой ПАМ, выполняется путем оценки погрешностей моделирования характеристик (характеристик обслуживания запросов

и использования ресурсов сети) системы, УС. Реализуется на основе банка данных заданий – описаний ОУС и НТД, содержащих эталонные значения узловых, фрагментарных и сетевых характеристик функционирования УС.

Для визуального представления и работы со стохастическими сетями в виде схем предложен модифицированный вариант системы символов, связей, правил их изображения и применения, сформированный на базе входного языка системы имитационного моделирования ИМСС [19].

Обобщенно порядок использования подсистем комплекса преподавателем иллюстрируется рисунком 2. При этом обучаемый получает доступ к своему заданию (ОУС и НТД в части наборов параметров обслуживания запросов в системе для целей тестирования моделей), а также к СМ для моделирования УС и к ППМС в режиме использования библиотеки учебных сетей для обучения работы в СМ.

Особенности организации двух базовых подсистем комплекса представлены ниже.

Подсистема ППСС

Представлена в виде модулей приложений, обеспечивающих генерацию необходимого (или максимально возможного) числа неповторяющихся ОУС в терминах СеМО, СС с прогнозируемым набором характеристик. ОУС используется обучаемыми для построения моделей, включая результирующие, и получения характеристик систем (учебных систем), которые нужны для самостоятельного тестирования и оценки моделей и для автоматической оценки адекватности моделей.

При этом уникальность и результированность спецификаций УС обеспечивается указанными ниже требованиями к ним и средствами их получения. Они включают:

- управляемость сложностью и режимом функционирования генерируемых сетей, что поддерживается эмпирически и математически обоснованными правилами порождения, хранения спецификаций;
- полноту описаний как достаточность данных для моделирования, тестирования сетей, поддерживаемую генерацией НТД;
- контролируемость описаний, достигаемую построением, в том числе автоматически, соответствующих результирующих моделей, их имитацией и оценкой адекватности;
- документированность, реализуемую процедурами генерации соответствующих отчетов, используемых в разных форматах и целях.

Пользователь может задавать:

- ограничения на архитектуру сети (диапазоны числа потоков, узлов, связей и т. д.);
- диапазоны параметров емкостных блоков различных типов;
- режим функционирования сети (диапазоны значений коэффициентов использования узлов);

– перечень законов распределения параметров сети и т. д. Пользователь также может сохранять результаты в XML базе данных, генерировать html отчёты.

Фрагмент окна интерфейса подсистемы ППСС для управления генерацией ОУС упрощенных разомкнутых неоднородных СС с числом потоков запросов в диапазоне 2–4, узлов-устройств 2–4 с числом каналов 1–2, обратных связей 0–3 и т. д. представлен на рисунке 3.

Работа ППСС базируется:

– на алгоритмах генерации спецификаций архитектур сетей с учетом их типов, сложности, набора законов распределения параметров сети;

– форматах XML-файлов для обеспечения совместимости при передаче данных другим подсистемам комплекса (в т. ч. для согласования с алгоритмами генерации результативных моделей ППМС);

– форматах html для предоставления пользователям средства форматирования отчётов любой сложности;

– использовании иерархии классов, обеспечивающей нужную функциональность подсистемы.

При этом построение ОУС основывается на учете данных, представленных деревом сложности сетей. Оно задает иерархию важности параметров сети по критерию получения описаний, отличающихся полностью (структурой) или частично (значениями параметров).

Сложность сетей ограничивается заданием требований к числу типов потоков запросов, числу и типам узлов, сложности маршрутов, списку законов распределений параметров и т. д. Допустимый режим работы системы (сбалансированный, с “узкими” местами и т. д.) задается диапазонами значений коэффициентов загрузки ее узлов.

В основу генерации положен смешанный комбинаторно-аналитический подход. Он обеспечивает:

– получение каркасов сети (КС), отвечающих заданной сложности, на базе рекурсивного алгоритма перебора вариантов;

– оснащение КС связями узлов (ветвлениями, обратными переходами);

– аналитический расчет матриц переходов, интенсивностей потоков запросов, параметров обслуживающих узлов, соответствующих ограничениям по режиму работы сети;

– декомпозицию параметров по потокам запросов;

– определение значений недостающих параметров сети вероятностным способом.

Для получения УС, оснащенных узлами типа “память”, используются модифицированные алгоритмы. Детальное описание алгоритмов приведено в [20].

Подсистема ППМС

Обучение моделированию предполагает выработку практических навыков использования входных языков готовых СМ, анализу полученных результатов. Для этого используется подсистема ППМС, которая представлена в виде модулей приложений, работающих в консольном и интерактивном режимах.

Подсистема используется:

– для генерации результативных модельных спецификаций (моделей) в терминах входного языка СМ (здесь gpss-кодов) по описаниям параметров систем, учебных систем УС;

– получения эталонного материала по написанию кодов;

– применяется для автоматизации получения тестовых спецификаций НТД.

В ручном режиме пользователь может:

– выбирать тип сети, задавать параметры узлов, определять параметры, законы распределения параметров потоков запросов и т. д.;

– описывать маршруты обработки запросов;

– управлять составом, полнотой, детальностью фиксируемой статистики, строить частотные таблицы;

– оперативно менять параметры сети, режимы генерации, состав собираемых данных.

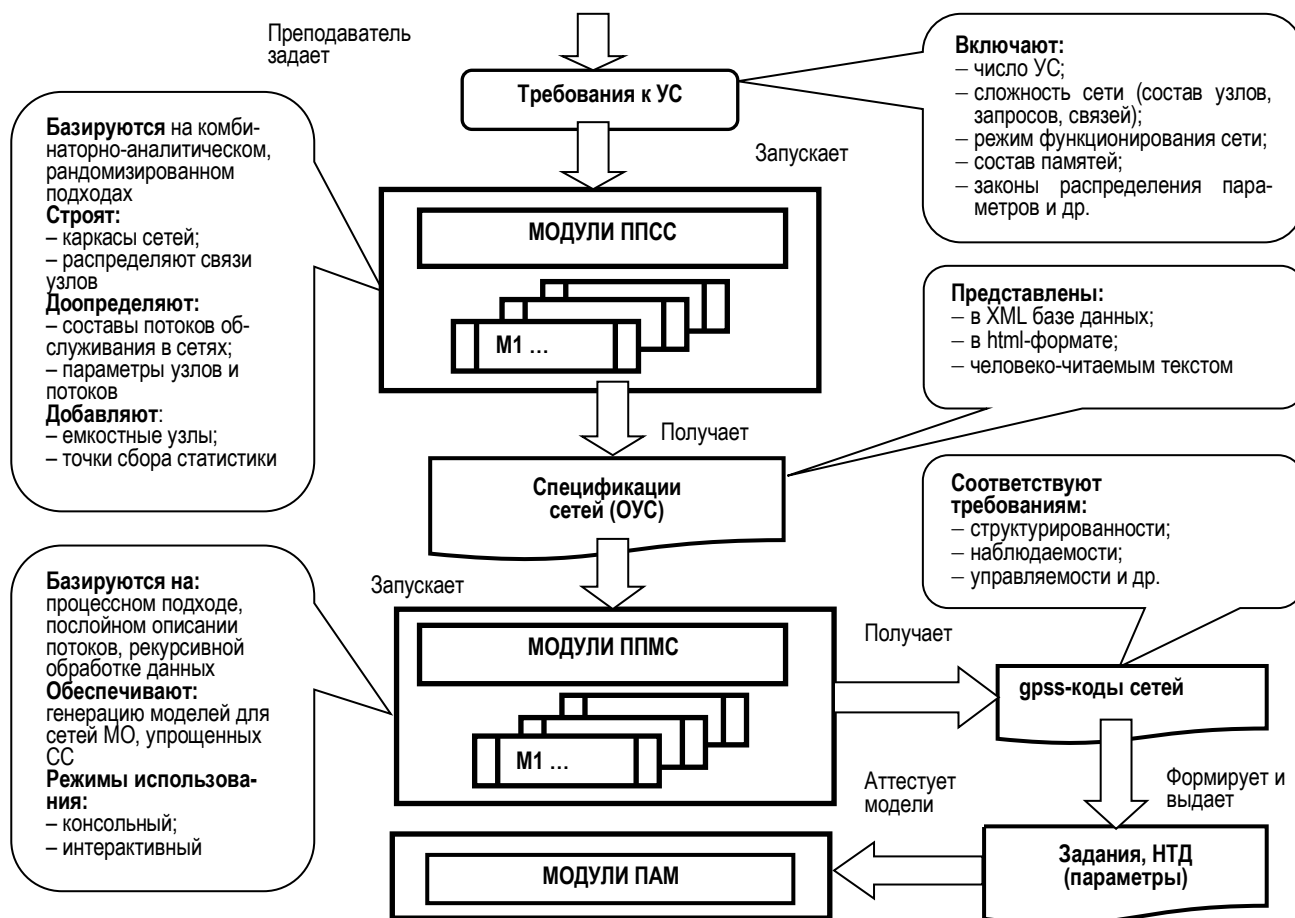


Рисунок 2 – Схема использования средств автоматизации

The screenshot displays the graphical user interface of the PPSS (Program for the Generation of Simulation Models) software. It is divided into several sections with adjustable parameters:

- Устройства (СМО) (Devices (SMD))**:
 - число (number): 2 - 4
 - число каналов (number of channels): 1 - 2
 - коэффициенты загрузки (load coefficients): 0,45 - 0,60
- Потоки (заявки) (Flows (requests))**:
 - количество (quantity): 2 - 4
 - типы (types): radio buttons for ☒ разомкнутые (open) and ☐ замкнутые (closed)
 - параметры генерации (generation parameters):
 - Mt между заявками (Mt between requests): 20,00 - 84,50
 - Mo число заявок (Mo number of requests): (partially visible)
- Маршруты потоков (Flow routes)**:
 - число прямых связей (number of direct connections): 2 - 4
 - число обратных связей (number of feedback connections): 0 - 3
- Памяти (ёмкостные узлы) (Memory (capacity nodes))**:
 - сетевые (network): ☒ всегда (always), ☐ случайно (randomly)
 - фрагментарные (fragmentary):
 - число (number): 1 - 1
 - ☒ сетевые (network), ☐ потоковые (flow)
 - узловые (nodal):
 - число (number): 1 - 2
 - ☒ классические (classic), ☐ мод. (mod.)

Рисунок 3 – Фрагмент окна графического интерфейса ППСС

Базовые требования к модельным спецификациям и к средствам поддержки их генерации:

- согласованность по форматам с источниками формальных описаний спецификаций систем;
- полнота, структурированность, читаемость gpss-кодов;
- управляемость сбором узловой, потоковой и системной статистик;
- поддержка типовых узлов, законов распределений параметров сети.

Здесь полнота данных обеспечивается набором вычисляемых характеристик (точечные оценки, распределения, частотные таблицы и др.), структурированность достигается процессной декомпозицией описания кода модели, а читаемость – применением правил именования объектов (узлов, меток и т. д.).

Управляемость сбором статистики основывается на учете необходимости получения разных видов данных о характеристиках сети (УС) с учетом места их сбора (сеть, фрагмент, узел), детальности представления (для потока, всех потоков и т. д.).

Функционирование ППМС базируется на использовании:

- алгоритмов генерации gpss-кодов исполнимых имитационных моделей систем по их формальному описанию в базе выбранной математической модели (например, в терминах СеМО, СС);
- входных, внутренних и выходных форматов модельных спецификаций, правил именования их объектов;
- иерархии классов, обеспечивающих функциональность подсистемы.

Для входных спецификаций используются:

- математические описания структуры и процессов в сети;
- xml-формат описания сети, согласованный с модулями генерации модельных спецификаций;
- html-формат описания сети, согласованный с отчетными документами.

Формат внутренних спецификаций (объектная модель, ориентированная на алгоритм генерации моделей, управление сбором статистики) определяется на входном с добавлением служебных данных (ссылок переходов запросов в сети; точек сбора данных с указанием вида, полноты статистики и т. д.).

Формат выходных модельных спецификаций (gpss-модели) доопределяется на форматах описания gpss-блоков с добавлением правил:

- формирования структуры кода модели (деклараций, потоковых описаний) и структурирования описаний потоков, оптимизирующего количество переходов в модели;
- правил именования объектов (имен узлов, меток, точек сбора статистики, включая точки сбора данных для частотных таблиц) с учетом особенностей сети, наличия подсетей (фрагментов).

При этом схема модели формируется послойно – каждый слой отображает маршрут и обслуживание одного потока заявок в терминах типизированных узлов, согласованных с функциональными возможностями языка GPSS. Формат выходных спецификаций (отчетов) доопределяет вид стандартного отчета GPSS в соответствии с форматами модели, требованиями к составу, полноте и точности моделируемых характеристик.

Алгоритмы генерации кодов основываются на порождающей парадигме, реализуют анализ и трансформацию входной спецификации сети с использованием специальной объектной модели. Она обеспечивает хранение спецификаций и поддерживает пользовательский интерфейс, дающий возможность при необходимости в интерактивном режиме вносить коррективы в создаваемую исполняемую модель. Детальное описание алгоритмов приведено в [21].

Заключение

В работе представлен опыт системного учета особенностей преподавания технических дисциплин, тенденций значимости самостоятельной работы и мотивации обучаемых, актуальности удаленных форм образования посредством комплексирования принципов модульного обучения и возможностей информационных технологий.

Для выбранной дисциплины показана хорошая согласованность рассмотренных подходов с задачами обучения, результативность выделения объединяющего модуля, возможности компьютерной поддержки наиболее ответственных этапов обучения.

Список цитированных источников

1. Дударев, Ф. Ф. Симуляторы и тренажеры в профессиональном образовании: педагогические и технологические аспекты / Ф. Ф. Дударев, О. В. Максименков // Вопросы образования. – 2020. – № 3. – С. 255–270.
2. Агапитова, О. В. Автоматизированные системы обучения в машиностроении / О. В. Агапитова, Г. Б. Захарова // Весенние дни науки: сборник докладов Междунар. конф., Екатеринбург, 22–24 апреля 2021 г. – Екатеринбург, УрФУ, 2021. – С. 565–569.
3. Trevor, H. The Trouble with Higher Education: A Critical Examination of our Universities / H. Trevor, P. Smith. – Abingdon, Routledge, 2010. – 168 p.
4. UNESCO ICT Competency framework for teachers (version 2.0). – 2011. – URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000213475> (date of access: 23.02.2025).
5. Entwistle, N. Conceptions of Learning and Knowledge in Higher Education: Relationships with Study Behavior and Influences of Learning Environments / N. Entwistle, E. Peterson // International Journal of Educational Research. – 2005. – Vol. 41. – P. 407–428.

6. Компьютерное моделирование. Курс лекций. – 2016. – URL: <https://intuit.ru/studies/courses/643/499/info> (дата обращения: 27.01.2025).
7. Введение в математическое моделирование. Курс лекций. – 2016. – URL: <https://intuit.ru/studies/courses/2260/156/info> (дата обращения: 27.01.2025).
8. Лозинская, А. М. Модульно-рейтинговая технология обучения физике: учеб.-метод. пособие / А. М. Лозинская, Т. Н. Шамало. – Екатеринбург : Уральский гос. педаг. ун-т, 2014. – 162 с.
9. Методологические основы системы модульного формирования содержания образовательных программ и совместимой с международной системой классификации учебных модулей. – URL: https://orensau.ru/ru/prochiedokumenty/doc_view/306.Teaching at University (дата обращения: 27.01.2025).
10. Sejal, K. Modular Method of teaching / Kandarp Sejal // International Journal for Research in Education. – 2015. – URL: <https://ru.scribd.com/document/152646661/29-169-171-Dr-Kandarp-Sejal> (date of access: 27.01.2025).
11. Sadiq, S. Effectiveness of Modular Approach in Teaching at University Level / Sadia Sadiq // Journal of Education and Practice. – 2014. – URL: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JEP/article/download/13916/14068> (date of access: 27.01.2025).
12. Guido, R. Evaluation of a Modular Teaching Approach in Materials Science and Engineering / R. Guido // American Journal of Educational Research. – 2014. – URL: <http://pubs.sciepub.com/education/2/11/20> (date of access: 27.01.2025).
13. Ritchey, T. Outline for a Morphology of Modeling Methods Contribution to a General Theory of Modeling / Tom Ritchey // Acta Morphologica Generalis. – 2012. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 1–20.
14. Curry, G. Manufacturing Systems Modeling and Analysis / L. G. Curry, R. M. Feldman // Springer-Verlag. – Berlin, 2011. – 338 p.
15. Введение в анализ, синтез и моделирование систем. Курс лекций. – 2016. – URL: <https://intuit.ru/studies/courses/83/83/info> (дата обращения: 27.01.2025).
16. Алиев, Т. И. Основы моделирования дискретных систем / Т. И. Алиев. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
17. Константинов, Е. В. Применение имитационного моделирования в учебном процессе транспортного ВУЗа / Е. В. Константинов, В. С. Тимченко // Интернет-журнал «Мир науки». – 2015. – № 3. – URL: <http://mir-nauki.com/PDF/42PDMN315.pdf> (дата обращения: 27.01.2025).
18. Ståhl, I. Teaching simulation to business students' summary of 30 years' experience / Ingolf Ståhl // Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference, New York: ACM. – 2007. – P. 2327–2335.
19. Майоров, С. А. Основы теории вычислительных систем: учеб. пособие для вузов / С. А. Майоров, Г. И. Новиков, Т. И. Алиев [и др.]. – М. : Высш. школа, 1978. – 408 с.
20. Муравьев, Г. Л. Алгоритмы порождения архитектур стохастических сетей с заданными характеристиками / Г. Л. Муравьев, А. Н. Никонюк, В. И. Хвещук // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия : Физика, математика, информатика. – 2012. – № 5 (77). – С. 34–37.
21. Муравьев, Г. Л. Разработка генератора GPSS-кодов имитационных моделей / Г. Л. Муравьев, К. И. Медведский // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам: материалы VII Междуна. науч.-практ. интернет-конф., Мозырь, 24–27 марта 2015. – С. 216–217.
4. UNESCO ICT Competency framework for teachers (version 2.0). – 2011. – URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000213475> (date of access: 23.02.2025).
5. Entwistle, N. Conceptions of Learning and Knowledge in Higher Education: Relationships with Study Behavior and Influences of Learning Environments / N. Entwistle, E. Peterson // International Journal of Educational Research. – 2005. – Vol. 41. – P. 407–428.
6. Компьютерное моделирование. Курс лекций. – 2016. – URL: <https://intuit.ru/studies/courses/643/499/info> (дата обращения: 27.01.2025).
7. Введение в математическое моделирование. Курс лекций. – 2016. – URL: <https://intuit.ru/studies/courses/2260/156/info> (дата обращения: 27.01.2025).
8. Lozinskaya, A. M. Modul'no-rejtingovaya tekhnologiya obucheniya fizike: ucheb.-metod. posobie / A. M. Lozinskaya, T. N. SHamalo. – Ekaterinburg : Ural'skij gos. pedagog. un-t, 2014. – 162 s.
9. Metodologicheskie osnovy sistemy modul'nogo formirovaniya soderzhaniya obrazovatel'nyh programm i sovmestimoy s mezhdunarodnoj sistemoy klassifikacii uchebnyh modulej. – URL: https://orensau.ru/ru/prochiedokumenty/doc_view/306.Teaching at University (дата обращения: 27.01.2025).
10. Sejal, K. Modular Method of teaching / Kandarp Sejal // International Journal for Research in Education. – 2015. – URL: <https://ru.scribd.com/document/152646661/29-169-171-Dr-Kandarp-Sejal> (date of access: 27.01.2025).
11. Sadiq, S. Effectiveness of Modular Approach in Teaching at University Level / Sadia Sadiq // Journal of Education and Practice. – 2014. – URL: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JEP/article/download/13916/14068> (date of access: 27.01.2025).
12. Guido, R. Evaluation of a Modular Teaching Approach in Materials Science and Engineering / R. Guido // American Journal of Educational Research. – 2014. – URL: <http://pubs.sciepub.com/education/2/11/20> (date of access: 27.01.2025).
13. Ritchey, T. Outline for a Morphology of Modeling Methods Contribution to a General Theory of Modeling / Tom Ritchey // Acta Morphologica Generalis. – 2012. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 1–20.
14. Curry, G. Manufacturing Systems Modeling and Analysis / L. G. Curry, R. M. Feldman // Springer-Verlag. – Berlin, 2011. – 338 p.
15. Vvedenie v analiz, sintez i modelirovanie sistem. Kurs lekcij. – 2016. – URL: <https://intuit.ru/studies/courses/83/83/info> (дата обращения: 27.01.2025).
16. Aliev, T. I. Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem / T. I. Aliev. – SPb. : SPbGU ITMO, 2009. – 363 s.
17. Konstantinov, E. V. Primenenie imitacionnogo modelirovaniya v uchebnom processe transportnogo VUZa / E. V. Konstantinov, V. S. Timchenko // Internet-zhurnal «Mir nauki». – 2015. – № 3. – URL: <http://mir-nauki.com/PDF/42PDMN315.pdf> (дата обращения: 27.01.2025).
18. Ståhl, I. Teaching simulation to business students' summary of 30 years' experience / Ingolf Ståhl // Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference, New York: ACM. – 2007. – P. 2327–2335.
19. Majorov, S. A. Osnovy teorii vychislitel'nykh sistem: ucheb. posobie dlya vuzov / S. A. Majorov, G. I. Novikov, T. I. Aliev [i dr.]. – M. : Vyssh. shkola, 1978. – 408 s.
20. Murav'ev, G. L. Algoritmy porozhdeniya arhitektur stohasticheskikh setej s zadannymi harakteristikami / G. L. Murav'ev, A. N. Nikonyuk, V. I. Hveshchuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya : Fizika, matematika, informatika. – 2012. – № 5 (77). – S. 34–37.
21. Murav'ev, G. L. Razrabotka generatora GPSS-kodov imitacionnykh modelej / G. L. Murav'ev, K. I. Medvedskij // Innovacionnye tekhnologii obucheniya fiziko-matematicheskimi i professional'no-tekhnicheskimi disciplinami: materialy VII Mezhdunar. nauch.-prakt. internet-konf., Mozyr', 24–27 marta 2015. – S. 216–217.

References

1. Dudarev, F. F. Simulyatory i trenazhery v professional'nom obrazovanii: pedagogicheskie i tekhnologicheskie aspekty / F. F. Dudarev, O. V. Maksimenkov // Voprosy obrazovaniya. – 2020. – № 3. – S. 255–270.
2. Agapitova, O. V. Avtomatizirovannye sistemy obucheniya v mashinostroenii / O. V. Agapitova, G. B. Zaharova // Vesennie dni nauki: sbornik dokladov Mezhdunar. konf., Ekaterinburg, 22–24 aprelya 2021 g. – Ekaterinburg, UrFU, 2021. – С. 565–569.
3. Trevor, H. The Trouble with Higher Education: A Critical Examination of our Universities / H. Trevor, P. Smith. – Abingdon, Routledge, 2010. – 168 p.

Материал поступил 05.03.2025, одобрен 12.03.2025, принят к публикации 12.03.2025

УДК 621.791

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЗАКАЛКИ СТАЛЕЙ

А. И. Поболь¹, В. Г. Залесский²

¹ Научный сотрудник, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: a.pobol@phti.by

² Д. ф.-м. н., директор, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: v.zalesski@phti.by

Реферат

Применение электронно-лучевого воздействия на материалы дает возможность реализовать физико-химические, металлургические, термические, радиационные, биологические и другие виды процессов в широком спектре применений – от стерилизации пищевой и медицинской продукции до выплавки слитков металлов.

При обработке поверхности изделий из сталей путем нагрева потоком электронов в промежутки времени до 10 с может быть организован режим упрочнения электронно-лучевой закалкой (ЭЛЗ) локальных участков детали. В отличие от метода объемной закалки при ЭЛЗ не требуется закалочная среда, охлаждение нагретого слоя материала происходит путем отвода тепла в ненагретую сердцевину изделия. Благодаря высоким скоростям нагрева и охлаждения структура стали после ЭЛЗ измельчается, твердость закаленных структур выше по сравнению с полученными объемной закалкой.

Режимы проведения ЭЛЗ определяются для применяемой марки материала, конкретного изделия, требуемой конфигурации упрочняемого участка, места расположения на его поверхности детали и определяются для имеющегося типа ЭЛ оборудования. Рациональные значения параметров ЭЛЗ могут быть выбраны с использованием моделирования тепловых процессов. Моделирование и экспериментальное исследование электронно-лучевого воздействия позволяет минимизировать энергозатраты при проведении процессов закалки сталей, при котором количество передаваемого тепла должно быть ограниченным.

Характеристики упрочненной при ЭЛЗ стали зависят от предварительной подготовки структуры и теплофизических свойств материала. Для широко применяемой стали 40Х наилучшее сочетание дисперсности и теплопроводности имеет троост-сорбитная структура, получаемая после предварительной закалки с 850 °С и отпуска при 500 °С. Такой режим объемного термоупрочнения с последующей поверхностной ЭЛЗ даёт возможность на изделии с пластичной сердцевиной получить рабочие участки с высокой твердостью материала. Такое сочетание свойств приводит к улучшению эксплуатационных характеристик деталей. Методы ЭЛЗ обладают рядом преимуществ по сравнению с другими вариантами модифицирования свойств поверхности, в том числе возможностью упрочнения локальных и заглубленных участков.

Ключевые слова: инженерия поверхности, электронно-лучевой нагрев, закалка, моделирование.

SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE ELECTRON BEAM HARDENING OF STEELS

A. I. Pobol, V. G. Zaleski

Abstract

The use of electron beam treatment of materials makes it possible to implement physical-chemical, metallurgical, thermal, radiation, biological and other types of processes in a wide range of applications - from food and medical products sterilization to remelting metal ingots.

When processing the surface of steel products by heating with a flow of electrons in a time interval of less than 10 s, a mode of electron beam hardening (EBH) of local part zones can be organized. Unlike the method of volume heat treatment, EBH does not require a hardening medium, cooling of the heated layer of material occurs by heat transfer into the unheated product core. Due to the high heating and cooling rates, the structure of the steel after EBH is refined, and the hardness of the hardened structures is higher compared to those obtained by bulk hardening.

The modes of EBH implementation are determined for the applied grade of material, a specific product, the required configuration of the hardened zone, the location of the part on its surface and for the existing type of electron beam equipment. Rational values of EBH parameters can be selected using thermal process modeling. Simulation and experimental study of electron beam treatment allows minimizing energy input during steel hardening processes in which the amount of heat transferred must be limited.

The characteristics of steel hardened by EBH depend on the preliminary structure preparation and the thermal material properties. For the widely used 40Kh steel, the best combination of dispersion and thermal conductivity is the troostosorbite structure obtained after preliminary hardening from 850 °C and tempering at 500 °C.

This mode of volume heat treatment with subsequent surface EBH makes it possible to obtain working areas with high material hardness on a product with a plastic core. In general, this combination of properties leads to an improvement in the operational products characteristics.

Keywords: surface engineering, electron beam heating, hardening, simulation.

Введение

Для формирования на поверхности деталей машин, инструмента и других изделий износостойких и/или коррозионностойких защитных слоёв, нанесения покрытий, получения соединений одно- и разнородных материалов применяют широкий спектр высокоэнергетических методов воздействия – лазерного и светового излучения, резистивного, индукционного и электронно-лучевого (ЭЛ) нагрева, потоков ионов и плазмы, механической и магнитной обработки и др. При этом формируются участки закаленного или модифицированного материала основы, на поверхность изделия наносятся слои металлических, керамических или композиционных покрытий с широким диапазоном толщин от десятков нанометров до десятков миллиметров, реализуются совмещенные

технологии упрочнения, сваркой или пайкой изготавливаются высокопрочные соединения. Широкие возможности использования ЭЛ потоков показаны в исследованиях, проводимых в нашей стране и в ведущих мировых научных центрах.

Концентрированное ЭЛ воздействие (термическое, радиационное или радиационно-термическое) позволяет реализовать широкий спектр физико-химических, металлургических, биологических и других видов процессов – в том числе стерилизации пищевой и медицинской продукции, получения отверстий и пазов, испарения металлов, сплавов и керамик (с последующей конденсацией или кристаллизацией в виде порошка, частиц, гранул, слоев на изделиях), сварки, аддитивных технологий, зонной очистки, выплавки слитков металлов и др. [1–13].

В то же время готовые технологические решения, как правило, отсутствуют. Это обусловлено тем, что формирование температурных полей, отвод тепла из зоны воздействия и структурные преобразования в материале существенно зависят от многих индивидуальных факторов, таких как геометрия детали и требования к области упрочнения в конкретном изделии, химического состава материала, характеристик электронного пучка и параметров воздействия. В том числе недостаточно изучен вопрос изменения свойств основного материала (прежде всего сталей) при обработке поверхности изделий электронным лучом в режиме упрочнения локальных участков закалкой. При этом в поиске общих закономерностей и оптимальных режимов ЭЛ обработки может значительно помочь создание модели теплового воздействия.

Параметры электронно-лучевого нагрева

Ускоренный пучок электронов создается и формируется в электронно-оптической системе в условиях вакуума. Электроны ускоряются электрическим полем, прикладываемым между катодом и анодом и характеризующимся ускоряющим напряжением $U_{\text{уск}}$ (кВ), и выходят из пушки в виде пучка с силой тока I (А). Под действием ускоряющего напряжения электрон с зарядом e приобретает кинетическую энергию E_k :

$$E_k = e \cdot U_{\text{уск}} \text{ (эВ)}.$$

Мощность потока электронов:

$$Q = I \cdot U_{\text{уск}} \text{ (Вт)}.$$

Плотность мощности $q_{\text{эл}}$ воздействия рассчитывается из зависимости:

$$q_{\text{эл}} = I \cdot U_{\text{уск}} / F \text{ (Вт/см}^2\text{)},$$

где F – площадь зоны нагрева на поверхности изделия.

Энергия ускоренных электронов выделяется в тонком приповерхностном слое толщиной от единиц – десятков микрон до относительно низких значений ускоряющих напряжений (10–150 кВ) до нескольких сантиметров при использовании релятивистских пучков электронов (с энергией 0,5–10 МэВ). Небольшая часть энергии потока при этом теряется [14, 15]. Далее тепло распространяется в глубь объекта по механизму теплопроводности. Вид ЭЛ физико-технологического процесса, интенсивность нагрева и охлаждения изделий и свойства материала после обработки определяются ускоряющим напряжением, мощностью пучка, плотностью мощности, режимом разветки электронного пучка, характерным временем воздействия пучка t (с) или скоростью перемещения зоны нагрева [2–6].

Обработка в режиме закалки локальных участков поверхности

Для реализации режима электронно-лучевой закалки (ЭЛЗ) локального участка поверхности изделия из стали необходимо организовать быстрый нагрев потоком электронов материала приповерхностного слоя до температуры, превышающей начало аустенитного превращения, и обеспечить последующее скоростное охлаждение нагретого материала путем отвода тепла в массу металла (процесс иногда называют «самозакалкой»). Такой режим реализуется источниками электронов с энергией в широком диапазоне от 10 кэВ до нескольких МэВ. Наибольшее распространение в промышленности имеет оборудование, предназначенное для ЭЛ сварки, в котором, как правило, применяются пучки с энергией до 60 кэВ. Ввиду большой плотности мощности электронного луча время нагрева до необходимой температуры может составлять от нескольких секунд до $\sim 10^{-8}$ с. Скорость охлаждения при этом может варьироваться от $\sim 10^\circ\text{C/с}$ до $\sim 10^7^\circ\text{C/с}$ [2, 5, 16–19]. Для осуществления «самозакалки» нагретого слоя соотношение между толщинами этого слоя и детали должно быть не менее 1:4. Интенсивность теплоотвода «в массу» зависит не только от теплофизических свойств металла, но и от расположения нагреваемого участка на поверхности изделия. В зависимости от требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам деталей, закалке можно подвергнуть зоны с глубиной от десятков мкм до нескольких мм. Форма упрочненных участков может быть точечной, полосчатой, прямоугольной, спиралеобразной, в виде звезды или любой другой формы.

Как и для других вариантов закалки сталей и сплавов с использованием скоростного нагрева (лазерного, плазменного, ТВЧ, пропусканием тока) при ЭЛ нагреве допустим значительный перегрев

стали без опасения интенсивного роста зерен, поскольку температурный интервал диффузионных процессов при быстром нагреве смещается в область более высоких температур. Так, при скорости нагрева порядка 10^3°C/с и выше температурный интервал аустенитного перехода увеличивается на сотни градусов Цельсия [20]. Характерная особенность скоростного нагрева – формирование химически неоднородной высокотемпературной фазы, что приводит к микронеоднородности структуры, сформированной в процессе закалки. Степень такой неоднородности зависит от исходного состояния и регулируется параметрами нагрева.

Использованное оборудование

Экспериментальные исследования условий реализации различных вариантов ЭЛ обработки проводились с использованием электронно-лучевых комплексов типа ЭЛУ-9Б/ПЗ ЕВ 2,5–15 (Prvá Zváračská, Словакия) с ускоряющим напряжением 60 кВ и максимальной мощностью луча до 30 кВт.

Для обработки в режиме ЭЛЗ применяли образцы из сталей У8 (ГОСТ 1435-99) и 40Х (ГОСТ 4543-71) диаметром 15 мм и высотой 20 мм. Углеродистая сталь У8 используется для изготовления инструмента, применяемого без разогрева режущих кромок, конструкционная сталь 40Х – валов, осей, зубчатых шестерён и других деталей, которые требуют высокой прочности и долговечности в эксплуатации.

Шлифы материалов для проведения металлографических исследований были приготовлены при помощи комплекса для пробоподготовки компании «Metkon», Турция.

Измерение твердости проводилось на твердомере URBV-VRS, микротвердости – на микротвердомерах DM8 (оба прибора производства AFFRI, Италия) и ПМТ-3. Структуру образцов изучали на оптическом микроскопе МИ-1.

Система управления электронным лучом позволяла реализовывать нагрев расфокусированным лучом, линейное перемещение луча без сканирующей развертки, сканирование луча по заданной траектории и обеспечивала ЭЛ воздействие на материалы в режимах локального точечного нагрева до нужной температуры строго ограниченного участка с высокой плотностью мощности (до $\sim 10^5$ Вт/см²). Тем самым имелась возможность обрабатывать образцы и заготовки на участке (или нескольких произвольно расположенных участках) диаметром порядка 1 мм, линейной либо любой заданной формы с размерами порядка 100 мм, с широким диапазоном вводимой мощности от 100 Вт до 30 кВт.

Моделирование и экспериментальное исследование воздействия на сталь в режиме закалки

Режимы обработки в режиме ЭЛЗ рассчитываются для конкретного изделия, зоны расположения и требуемой конфигурации упрочняемого участка на поверхности детали и определяются для имеющегося типа ЭЛ оборудования. Реальные диапазоны энергетических параметров ЭЛ нагрева имеют тенденцию значительно изменяться по причине непостоянства в процессе воздействия свойств обрабатываемых материалов, в том числе плотности, коэффициентов теплопроводности и теплоемкости. Оптимальные значения параметров ЭЛ воздействия с учетом требований по ограничению количества передаваемого тепла в изделие могут быть выбраны с использованием моделирования тепловых процессов.

Для моделирования влияния высокоэнергетического воздействия на структуру обрабатываемой детали выбран метод конечно-элементного (КЭ) анализа тепловых полей. Разработана методика КЭ моделирования результатов ЭЛ воздействия в режиме закалки. Задачей стало моделирование условий, наиболее близких к реальным процессам при ЭЛ обработке поверхности без расплавления. За основу взяты данные, полученные экспериментальным путем. Изначально считалось, что вся энергия луча тратится на нагрев, а затем при пересчете, для корректировки результата, применялся коэффициент, учитывающий особенности взаимодействия луча с поверхностью детали.

При моделировании сделан ряд допущений:

– энергия, затрачиваемая и высвобождаемая во время фазовых переходов в материалах, во время нагрева и охлаждения не учитывалась;

– пучок электронов представлялся как равномерный тепловой поток ко всей поверхности благодаря формированию однородного плоского температурного поля при сканировании всей обрабатываемой зоны;

– влиянием излучения нагретой детали и теплопередачи в оснастку благодаря теплопроводности по причине быстрого протекания процесса можно пренебречь.

Экспериментальные исследования ЭЛ нагрева проводились для образца из стали У8 при различной плотности энергии луча (таблица 1). В центре с нижней стороны образца с размерами 30х30х20 мм для термопары выполнено отверстие диаметром 2,5 мм на глубину 19,8 мм, с верхней стороны диаметром 0,4 мм – на 0,2 мм. Спай хромель-алюмелевой термопары располагался у поверхности (рисунок 1). Электронный луч точечной формы диаметром 1 мм с энергией электронов 60 кэВ разворачивался в зону нагрева с размерами 10х10 мм². Мощность и плотность мощности ЭЛ нагрева регулировалась изменением тока луча. Значения температуры регистрировались с помощью шлейфового осциллографа.

Таблица 1 – Режимы ЭЛ обработки образца из стали У8 [5]

№ кривой	1	2	3	4
$q_{эл}$, Вт/см ²	848	1357	1683	2255
t_n , с	14,0	10,0	6,0	2,4

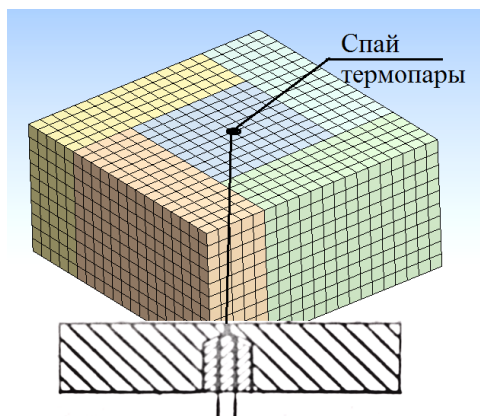


Рисунок 1 – Модель образца с размещенной термопарой

При моделировании плотность мощности потока подбиралась таким образом, чтобы график изменения температуры, полученный КЭ моделированием, максимально совпал с экспериментальным. Внимание уделялось как конечной температуре образца, являющейся показателем количества энергии, поступившей в образец, так и максимальной температуре нагрева образца. Время воздействия соответствовало экспериментальным значениям в соответствии с таблицей 1. Теплофизические свойства стали У8, заложенные в модель, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Теплофизические свойства стали У8 [21]

Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)
20	53	7839	452
100	49	7817	477
200	46	7786	511
300	42	7752	528
400	38	7714	548
500	35	7676	565
600	33	7638	594
700	30	7600	624
800	24	7552	724

В результате расчетов получены диаграммы распределения температур в различные моменты времени при нагреве центральной части образца потоком электронов с размерами 10х10 мм² (рисунок 2), которые показывают существенное влияние геометрии обрабатываемой детали и продолжительности воздействия на характер распространения в ней тепла.

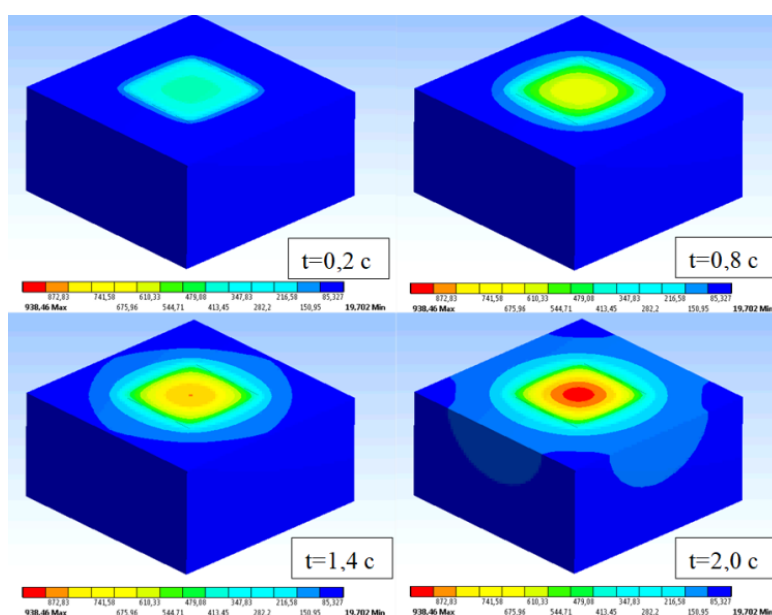


Рисунок 2 – Диаграммы распределения температур в различные моменты времени, полученные конечно-элементным моделированием

Совмещенные графики температуры стали вблизи спая термопары (рисунок 1) в экспериментальном образце и результатов КЭ моделирования представлены на рисунке 3. Графики (1–4) соответствуют номерам режимов ЭЛ нагрева образца в таблице 1. Для удобства сравнения графики 1 и 2 представлены участками, относящимися к последним шести секундам процесса нагрева образца. Цифрами со штрихами обозначены кривые, полученные моделированием.

Неполное соответствие экспериментальных и расчетных данных объясняется следующими причинами: усредненным значением площади облучаемой поверхности в модели (в реальных экспериментах площадь находилась в диапазоне 0,7–1,1 см²); наличием

потери энергии излучения с поверхности нагреваемого тела в реальных экспериментах, не учитываемого при моделировании; некоторым несоответствиям реальных теплофизических свойств, используемым в модели.

Максимальное расхождение наблюдалось между кривыми 2 и 2' и составило 240 °С для участка нагрева. Расхождения экспериментальных и моделируемых кривых на участках максимальных и установившихся температур не превысило 35 °С, что составило 14 % от экспериментальных значений.

Разработанная методика моделирования использована для расчета приближенных энергетических параметров (режимов и циклограмм) процесса ЭЛЗ.

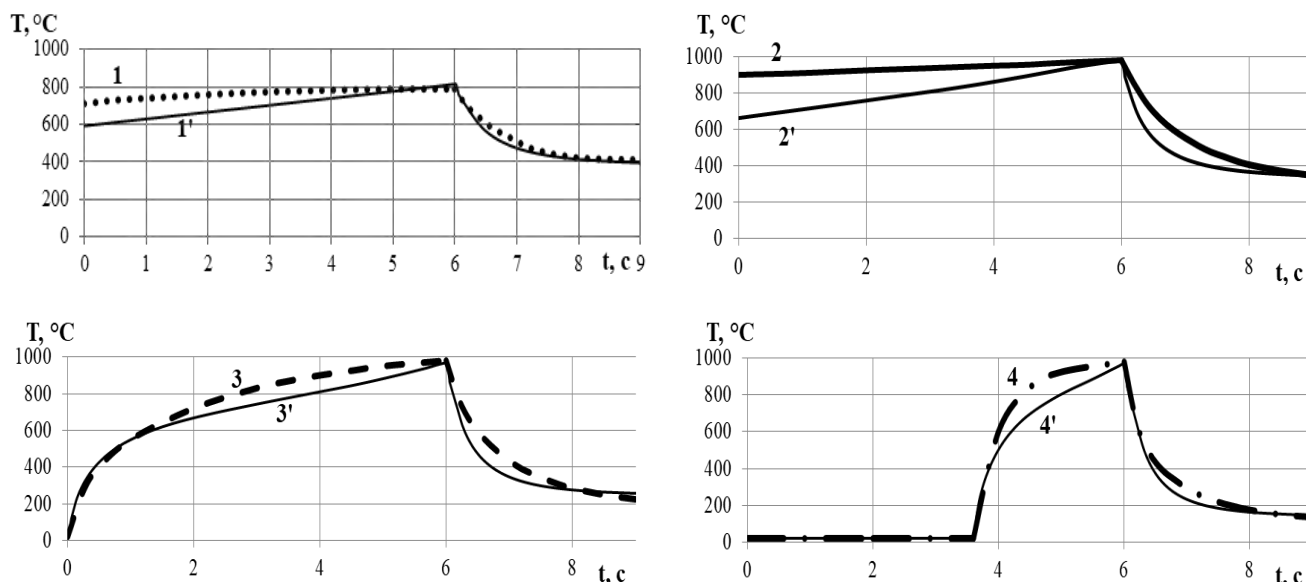


Рисунок 3 – Совмещенные графики температур экспериментальных образцов и результатов конечно-элементного моделирования

Исследование влияния электронно-лучевой заковки на структуру и твердость поверхностного слоя сталей У8 и 40Х

Процесс заковки локального участка поверхности апробирован на образце из стали У8 в виде цилиндра. Луч с плотностью мощности 2,3 кВт/см² разворачивали в зону нагрева размерами 10×10 мм²

при длительности нагрева 2,4 с. После прекращения воздействия происходило охлаждение нагретого слоя стали путем отвода тепла в сердцевину образца. По профилю микротвердости на поперечном шлифе образца (рисунок 4) наблюдался закаленный слой глубиной 0,45 мм.

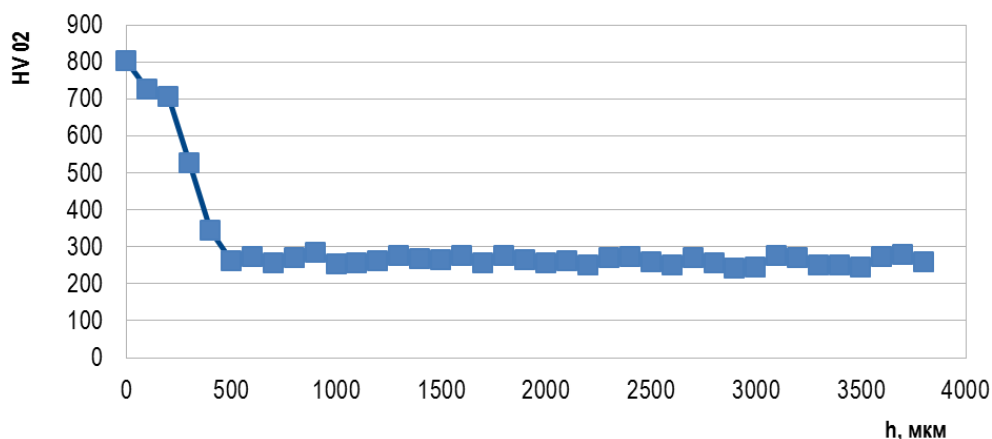


Рисунок 4 – Профиль микротвердости на образце из стали У8 после ЭЛЗ

Микротвердость стали снижается от величины HV0,2 800 в приповерхностной зоне до уровня, соответствующего сердцевине образца. Микроструктура стали – мартенсит заковки и остаточный аустенит. Свойства упрочненного слоя после ЭЛЗ зависели от предварительной подготовки структуры сталей.

В работе исследовались свойства закаленных слоев на образцах из стали 40Х, подвергнутых объемной заковке от 850 °С в масле и отпуску

при 400, 500 и 600 °С на твердость HRC 37, 32 и 22. Микроструктура стали 40Х в исходном состоянии – пластинчатый перлит с ферритной сеткой по границам зерен (рисунок 5а). Размер зерна соответствует 5 баллу по ГОСТ 5639-82. Микроструктура стали после объемной заковки – мартенсит и остаточный аустенит (рисунок 5б). При отпуске при температуре 400 °С образовался троостит (рисунок 5в), при 500 °С – троосто-сорбитная структура, при 600 °С – сорбит (рисунок 5г).

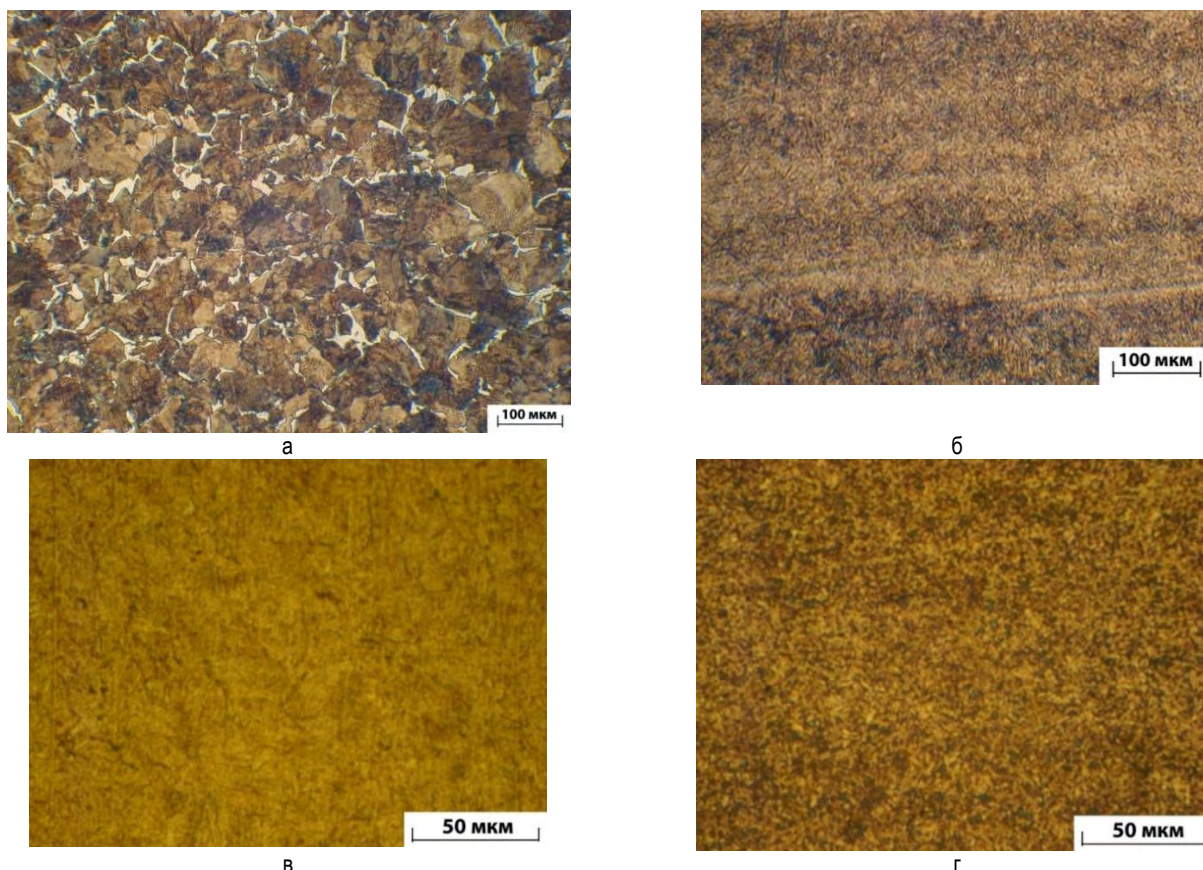


Рисунок 5 – Микроструктура стали 40X в исходном состоянии (а), после объемной закалки (б) и отпуска при температурах 400 °C (в) и 600 °C (г)

ЭЛ обработку выполняли развернутым в зону нагрева $10 \times 10 \text{ мм}^2$ лучом с плотностью мощности $2,5 \text{ кВт/см}^2$, время воздействия составляло 2 с. После выключения ЭЛ источника в результате теплоотвода обеспечивался низкий отпуск закаленных участков. При ЭЛЗ формировалась зона закалки параболической формы в поперечном сечении. По глубине зона структурно неоднородна и состояла из нескольких участков (рисунок 6). Мартенсит в поверхностных слоях мелкозернистый, его дисперсность возрастает по мере удаления от поверхности, что объясняется существованием нормального к поверхности градиента температур. Наблюдалось содержание остаточного аустенита, полученного при охлаждении из гомогенного аустенита. Ближе к исходному металлу наряду с мартенситом содержались элементы феррита. Нижняя граница зоны ЭЛЗ определяется температурой нагрева до точки перехода A_{c1} . Ниже сталь имеет исходную структуру после отпуска.

На рисунке 7 показано распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя в стали 40X после ЭЛЗ образцов с различными режимами предварительной обработки. Твердость на поверхности образцов – 56–61 HRC (таблица 3), микротвердость упрочненного слоя – 6,1–8,5 ГПа, при переходе к основе уменьшалась до 2,3–3,5 ГПа в зависимости от исходной твердости материала. Для профиля микротвердости по глубине характерны плато микротвердости. Глубина закаленных слоев в зависимости от режима предварительной обработки – 1000–1400 мкм. Пониженную микротвердость у поверхности образцов можно объяснить как обезуглероживанием стали при предварительной термической обработке, так и тем, что для приповерхностного слоя металла возможность для охлаждения с достаточно высокой скоростью ограничена. Твердость мартенситной структуры стали 40X после ЭЛЗ превышала твердость мартенсита, получаемого объемной закалкой. Как известно, для повышения прочностных свойств стали 40X уменьшают температуру отпуска её. Отпуск при 200 °C позволяет увеличить пределы текучести и прочности, твердости до 552 НВ (что соответствует HRC 55), но со снижением ударной вязкости стали [22].

Таблица 3 – Твердость образцов из стали 40X после ЭЛЗ в зависимости от режима предварительной термообработки

Температуры предварительной термообработки, °C		Твердость, HRC	
закалка	отпуск	после отпуска	после ЭЛЗ
850	400	37	59
850	500	32	61
850	600	22	56

Исходя из анализа результатов металлографических и дюрOMETрических исследований видно, что для исходной структура троост-сорбита стали 40X при ЭЛЗ достигается наиболее высокое значение твердости закаленного слоя. За одинаковое время сталь с более мелкодисперсной структурой (сорбит) образует после ЭЛЗ более мелкодисперсный мартенсит, однако структура троостита обладает большей теплопроводностью по сравнению с сорбитом [23]. Кроме того, положение критических точек A_{c1} и A_{c3} при скоростном нагреве зависит от степени дисперсности сталей [20]. Структура перлита менее дисперсна, чем сорбита, троостита, мартенсита, и соответственно точки A_{c1} и A_{c3} смещаются вверх. При нагреве за одинаковое время сталь со структурой перлита нагревается до меньшей глубины по сравнению с остальными состояниями. Таким образом, наилучшее сочетание дисперсности и теплопроводности имеет троост-сорбитная структура, полученная после предварительной закалки с 850 °C и последующего отпуска при температуре 500 °C.

Такая последовательность объемного термоупрочнения и поверхностной ЭЛЗ даёт возможность повысить вязкость, снизить твердость сердцевины и существенно (до HRC 61) увеличить твердость рабочих участков изделия с получением упрочненного слоя глубиной порядка 1 мм. В целом такое сочетание свойств приводит к улучшению эксплуатационных характеристик изделий. Методы ЭЛЗ обладают рядом преимуществ по сравнению с другими вариантами модифицирования свойств поверхности, в том числе с широко применяемым видом скоростной закалки – ТВЧ нагревом, в частности возможностью упрочнения локальных, в том числе заглубленных участков.

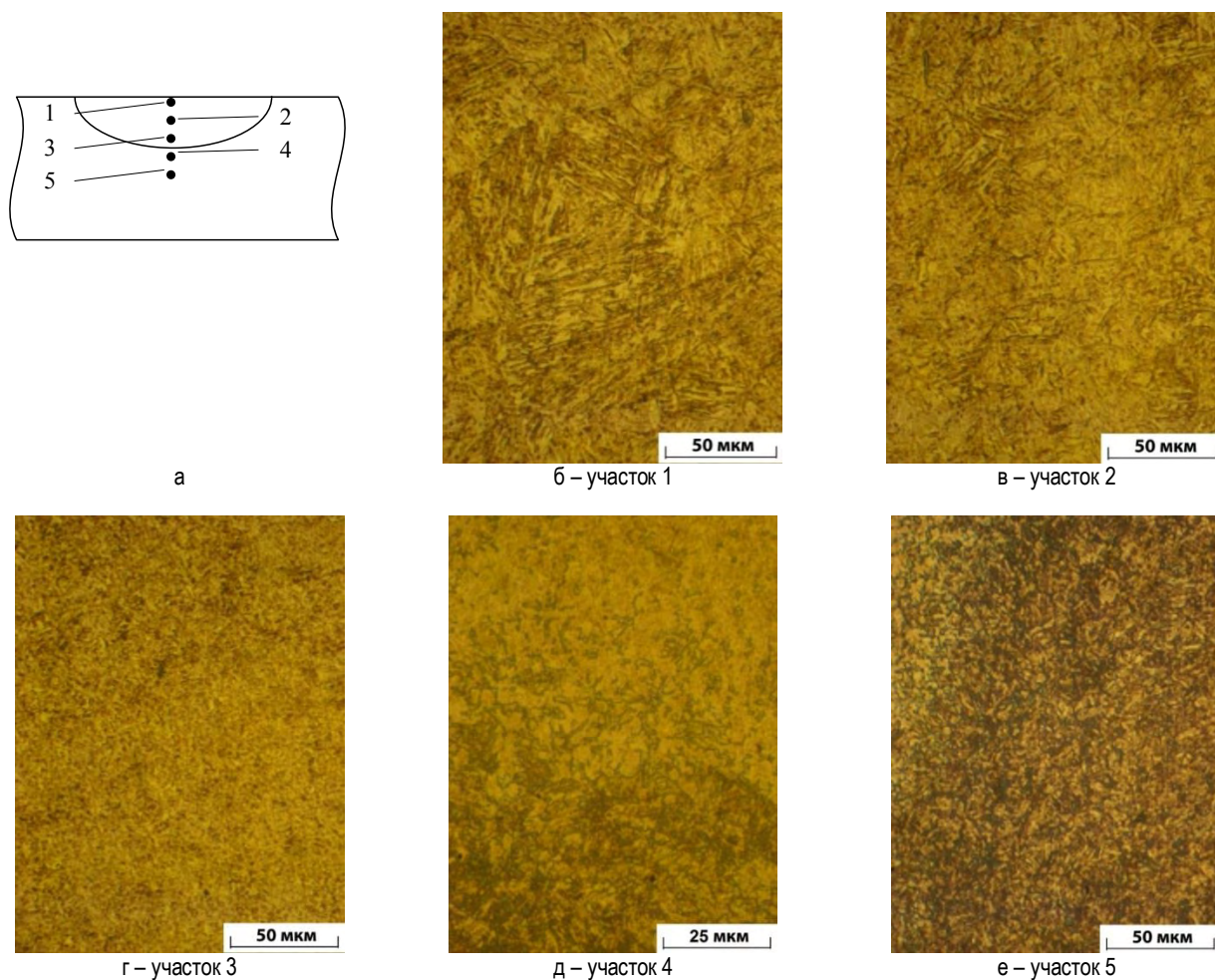


Рисунок 6 – Схема расположения участков регистрации (а) и микроструктуры (б–е) подвергнутых ЭЛЗ образцов из стали 40Х после предварительной объемной закалки при 850 °С и отпуска при 500 °С

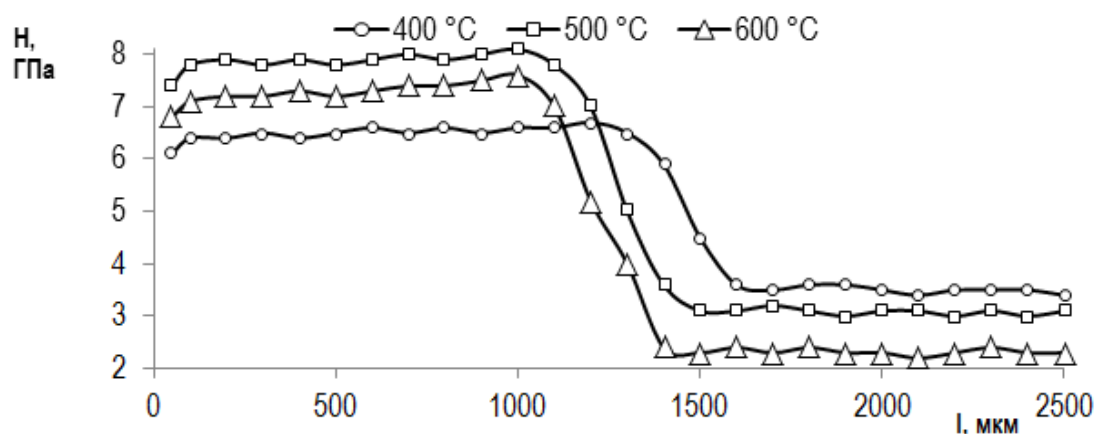


Рисунок 7 – Распределение микротвердости после ЭЛЗ по глубине упрочненного слоя в образцах из стали 40Х с различными исходными структурами (показана температура отпуска после объемной закалки)

Заключение

На основании конечно-элементного моделирования и экспериментального исследования тепловых процессов при скоростном нагреве сталей предложен подход к выбору рациональных значений параметров электронно-лучевой закалки (ЭЛЗ). Полученными диаграммами распределения температур в различные моменты времени показана существенность влияния геометрии обрабатываемой детали и продолжительности воздействия на характер распространения тепла в заготовке при её нагреве и соответственно на конфигурацию закаленной зоны.

Характеристики упрочненной при ЭЛЗ стали зависят от предварительной подготовки структуры и теплофизических свойств материала. Для широко применяемой стали 40Х наилучшее сочетание дисперсности и теплопроводности имеет троосто-сорбитная структура, получаемая после предварительной закалки с 850 °С и отпуска при температуре 500 °С. ЭЛЗ поверхности даёт возможность существенно (до HRC 61) увеличить твердость рабочих участков изделия на глубину до 1 мм с сохранением высокой пластичности сердцевины, что приводит к улучшению эксплуатационных характеристик изделий.

Список цитированных источников

1. Рыкалин, Н. Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машиностроение, 1978. – 239 с.
2. Schiller, S. Electron beam technology / S. Schiller, U. Heisig, S. Panzer. – New York : John Wiley & Sons, 1982. – 508 p.
3. Friedel, K. Oddziaływanie wiązki elektronowej na ciało stałe u warunkach głębokiej penetracji / K. Friedel // *Prac. Nauk. Inst. Technol. Elektron. PWR.* – 1983. – № 27. – 67 s.
4. Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко [и др.] ; под ред. Б. Е. Патона. – Киев : Наукова думка, 1987. – 256 с.
5. Шипко, А. А. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева / А. А. Шипко, И. Л. Поболь, И. Г. Урбан. – Минск : Наука и техника, 1995. – 280 с.
6. Электронно-лучевая обработка материалов / В. Н. Алехнович, А. В. Алифанов, А. И. Гордиенко, И. Л. Поболь. – Минск : Белорусская наука, 2006. – 319 с.
7. Патон, Б. Е. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекреационных металлов / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин. – Киев : Наукова думка, 2008. – 312 с.
8. Zenker, R. Modern thermal electron beam processes - research results and industrial application / R. Zenker // *Metallurgia Italiana.* – 2009. – Vol. 101. – P. 1–8.
9. Dutta, B. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys / B. Dutta, F. H. Froes // *Metal Powder Report.* – 2017. – Vol. 72. – P. 96–106.
10. Prospects of application of gas-discharge electron beam guns in additive manufacturing / D. Kovalchuk, V. Melnyk, I. Melnyk, B. Tugai // *Electrotechnica&Electronica.* – 2016. – № 5–6. – P. 36–42.
11. Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий / В. Г. Залесский, И. Л. Поболь, А. А. Бакиновский, А. Д. Губко // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук.* – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 169–180.
12. A substrate material and thickness influence on the 3D-printing of Ti-6Al-4V components via wire-feed electron beam additive manufacturing / K. N. Kalashnikov, A. V. Chumaevskii, T. A. Kalashnikova, E. A. Kolubaev // *Journal of Materials Research and Technology.* – 2022. – Vol. 16, Iss. 1. – P. 840–852.
13. Аддитивные технологии в производстве металлических конструкций: учебник / А. В. Щербаков, Д. А. Гапонова, А. П. Слива [и др.] ; ред. А. Г. Григорьянц, В. К. Драгунов ; Национальный исследовательский ун-т "МЭИ". – М. : Изд-во МЭИ, 2022. – 675 с.
14. Ерохин, А. А. Об эффективном коэффициенте полезного действия процесса проплавления электронным лучом / А. А. Ерохин, В. Ф. Резниченко, А. Ф. Худышев // *Физика и химия обработки материалов.* – 1970. – № 3. – С. 131–133.
15. Зуев, И. В. Эффективный к.п.д. электронно-лучевого нагрева / И. В. Зуев, Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов // *Физика и химия обработки материалов.* – 1976. – № 1. – С. 22–25.
16. Hanson, P. Computer controlled electron beam treating effective for hardening steel / P. Hanson // *Ind. Heat.* – 1984. – Vol. 51, Iss. 1. – P. 17–20.
17. Bartel, R. Oberflächenschmelzbehandeln mit Elektronenstrahlen / R. Bartel, M. Muller // *Schweisstechnik.* – 1986. – Bd. 36, N 11. – S. 489–491.
18. Stähli, G. Traitement thermique rapide / G. Stähli // *Traitement Thermique.* – 1986. – Vol. 199. – P. 43–53.
19. Bashenko, V. The electron beam alloy hardening factors / V. Bashenko, M. Radchenko // 4-ème Colloq. int. soudage et fusion faisceau electrons et laser. Cannes. – 1988. – P. 515–522.
20. Физические основы электротермического упрочнения стали / В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, С. П. Ошкадеров, Н. Ф. Черненко. – Киев : Наукова думка, 1973. – 336 с.
21. Сорокин, В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.
22. Сталь 40Х: характеристики. – URL: <https://atissteel.ru/stal-40h-harakteristiki> (дата обращения: 20.02.2025).
23. Лившиц, Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Линецкий. – М. : Металлургия, 1980. – 295 с.

References

1. Rykalin, N. N. Osnovy elektronno-luchевой obrabotki materialov / N. N. Rykalin. – M. : Mashinostroenie, 1978. – 239 s.
2. Schiller, S. Electron beam technology / S. Schiller, U. Heisig, S. Panzer. – New York : John Wiley & Sons, 1982. – 508 p.
3. Friedel, K. Oddziaływanie wiązki elektronowej na ciało stałe u warunkach głębokiej penetracji / K. Friedel // *Prac. Nauk. Inst. Technol. Elektron. PWR.* – 1983. – N 27. – 67 s.
4. Elektronno-luchevaya svarka / O. K. Nazarenko, A. A. Kajdalov, S. N. Kovbasenko [i dr.] ; pod red. B. E. Patona. – Kiev : Navukova dumka, 1987. – 256 s.
5. SHipko, A. A. Uprochnenie stalej i splavov s ispol'zovaniem elektronno-luchevogo nagreva / A. A. SHipko, I. L. Pobel', I. G. Urban. – Minsk : Nauka i tekhnika, 1995. – 280 s.
6. Elektronno-luchevaya obrabotka materialov / V. N. Alekhovich, A. V. Alifanov, A. I. Gordienko, I. L. Pobel'. – Minsk : Belorusskaya nauka, 2006. – 319 s.
7. Paton, B. E. Elektronno-luchevaya plavka tugoplavkikh i vysokoreakcionnykh metallov / B. E. Paton, N. P. Trigub, S. V. Ahonin. – Kiev : Navukova dumka, 2008. – 312 s.
8. Zenker, R. Modern thermal electron beam processes - research results and industrial application / R. Zenker // *Metallurgia Italiana.* – 2009. – Vol. 101. – P. 1–8.
9. Dutta, B. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys / B. Dutta, F. H. Froes // *Metal Powder Report.* – 2017. – Vol. 72. – P. 96–106.
10. Prospects of application of gas-discharge electron beam guns in additive manufacturing / D. Kovalchuk, V. Melnyk, I. Melnyk, B. Tugai // *Electrotechnica&Electronica.* – 2016. – № 5–6. – R. 36–42.
11. Poluchenie metallicheskih izdelij s primeneniem elektronno-luchevykh additivnykh tekhnologij / V. G. Zaleskij, I. L. Pobel', A. A. Bakinovskij, A. D. Gubko // *Vest. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekh. nauk.* – 2018. – T. 63, № 2. – S. 169–180.
12. A substrate material and thickness influence on the 3D-printing of Ti-6Al-4V components via wire-feed electron beam additive manufacturing / K. N. Kalashnikov, A. V. Chumaevskii, T. A. Kalashnikova, E. A. Kolubaev // *Journal of Materials Research and Technology.* – 2022. – Vol. 16, Iss. 1. – P. 840–852.
13. Additivnye tekhnologii v proizvodstve metallicheskih konstrukcij: uchebnik / A. V. SHCHerbakov, D. A. Gaponova, A. P. Sliva [i dr.] ; red. A. G. Grigor'yanc, V. K. Dragunov ; Nacional'nyj issledovatel'skij un-t "MEI". – M. : Izd-vo MEI, 2022. – 675 s.
14. Erohin, A. A. Ob effektivnom koeficiente poleznogo dejstviya processa proplavleniya elektronnym luchom / A. A. Erohin, V. F. Reznichenko, A. F. Hudyshev // *Fizika i himiya obrabotki materialov.* – 1970. – № 3. – S. 131–133.
15. Zuev, I. V. Effektivnyj k.p.d. elektronno-luchevogo nagreva / I. V. Zuev, N. N. Rykalin, A. A. Uglov // *Fizika i himiya obrabotki materialov.* – 1976. – № 1. – S. 22–25.
16. Nanson, R. Computer controlled electron beam treating effective for hardening steel / R. Nanson // *Ind. Neat.* – 1984. – Vol. 51, Iss. 1. – P. 17–20.
17. Vartel, R. Oberflächenschmelzbehandeln mit Elektronenstrahlen / R. Vartel, M. Muller // *Sshweissteshnik.* – 1986. – Vd. 36, N 11. – S. 489–491.
18. Stähli, G. Traitement thermique rapide / G. Stähli // *Traitement Thermique.* – 1986. – Vol. 199. – P. 43–53.
19. Bashenko, V. The electron beam alloy hardening factors / V. Bashenko, M. Radchenko // 4-ème Solloq. int. soudage et fusion faisceau eletrons et laser. Sannes. – 1988. – P. 515–522.
20. Fizicheskie osnovy elektrotermicheskogo uprochneniya stali / V. N. Gridnev, YU. YA. Meshkov, S. P. Oshkaderov, N. F. CHernenko. – Kiev : Navukova dumka, 1973. – 336 s.
21. Sorokin, V. G. Marochnik stalej i splavov / V. G. Sorokin, A. V. Volosnikova, S. A. Vyatkin. – M. : Mashinostroenie, 1989. – 640 s.
22. Stal' 40H: harakteristiki. – URL: <https://atissteel.ru/stal-40h-harakteristiki> (data obrashcheniya: 20.02.2025).
23. Livshic, B. G. Fizicheskie svojstva metallov i splavov / B. G. Livshic, V. S. Kraposhin, YA. L. Lineckij. – M. : Metallurgiya, 1980. – 295 s.

Материал поступил 20.02.2025, одобрен 06.03.2025,
принят к публикации 06.03.2025

УДК 681.5+621.52

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПОДСИСТЕМЫ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

О. Н. Прокопеня¹, А. В. Францевич², Л. И. Вабищевич³, А. И. Пикула⁴¹ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: olegprokopenya@mail.ru² Магистр, аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и производств, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: alex.favg@gmail.com³ К. т. н., доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vabik1948@mail.ru⁴ Старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов и производств УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: alexandr.pikula@gmail.com

Реферат

Для мехатронных модулей, используемых в составе промышленных роботов и мобильных транспортных средств, является актуальной проблема оптимизации параметров с целью обеспечения минимальных потерь энергии при заданных динамических характеристиках. Целесообразным является использование в мехатронных модулях трехфазных асинхронных электродвигателей, как обладающих рядом преимуществ. В частности, меньший момент инерции ротора создает предпосылки для получения лучших динамических свойств, чем при использовании в других типов двигателей.

В данной статье предлагается решение задачи оптимизации управляющей части мехатронного модуля с трехфазным асинхронным электродвигателем. Оно основано на использовании линейной математической модели второго порядка, полученной путем линеаризации механической характеристики двигателя, и квадратичного критерия оптимизации. Допустимость линеаризации модели обоснована и подтверждена результатами моделирования. Переменными состояния для рассматриваемого модуля являются угол поворота выходного вала и угловая скорость электродвигателя.

Задача оптимизации решена аналитически. В результате получены аналитические зависимости для расчета оптимальных коэффициентов обратной связи по углу поворота выходного вала и угловой скорости электродвигателя. Данные зависимости могут использоваться в инженерных расчетах. Установлено, что коэффициент обратной связи по углу поворота выходного вала определяется только элементами матриц критерия оптимизации, что позволяет один из элементов выбирать произвольно. Коэффициент обратной связи по скорости зависит также от параметров двигателя. С помощью математической модели исследовано влияние матриц критерия оптимизации на качество переходных процессов и потери энергии. Предложены рекомендации по выбору данных матриц при проектировании оптимальных приводов.

Ключевые слова: мехатронный модуль, оптимизация, трехфазный асинхронный электродвигатель.

OPTIMIZATION OF MECHATRONIC MODULE CONTROL SUBSYSTEM BASED ON THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR

O. N. Prokopenya, A. V. Francevich, L. I. Vabishchevich, A. I. Pikula

Abstract

For mechatronic modules used in industrial robots and mobile vehicles, the problem of optimizing parameters in order to ensure minimum energy losses at given dynamic characteristics is urgent. It is advisable to use three-phase asynchronous motors in mechatronic modules as having a number of advantages. In particular, a smaller moment of inertia of the rotor creates prerequisites for obtaining better dynamic properties than when used in other types of motors.

This article provides a solution to the problem of optimizing the control part of a mechatronic module with a three-phase asynchronous motor. It is based on the use of a linear mathematical model of the second order, obtained by linearizing the mechanical characteristic of the motor, and a quadratic optimization criterion. The model linearization is justified and confirmed by simulation results. The state variables for the module are the rotational angle of the output shaft and the angular velocity of the motor.

The optimization problem is solved analytically. As a result, analytical dependencies were obtained to calculate optimal feedback coefficients for the angle of rotation of the output shaft and the angular velocity of the electric motor. These dependencies can be used in engineering calculations. It was found that the coefficient of feedback on the angle of rotation of the output shaft is determined only by the elements of the matrices of the optimization criterion, which allows one of the elements to be selected arbitrarily. The speed feedback factor also depends on the engine parameters. Using a mathematical model, the effect of optimization criterion matrices on the quality of response curve and energy loss was investigated. Recommendations on selection of these matrices at designing of optimal drives are offered.

Keywords: mechatronic module, optimization, three-phase induction motor.

Введение

Мехатронные модули широко применяются в составе робототехнических устройств, мобильных транспортных средств, поэтому возникает потребность в совершенствовании методов их проектирования [1–9]. Как правило, к ним предъявляются высокие требования по точности, динамическим характеристикам, управляемости. При использовании в мобильных транспортных средствах весьма важное значение имеет энергоэффективность, и предпринимаются попытки ее улучшения [10, 11]. Хорошей управляемостью обладают двигатели постоянного тока, шаговые двигатели, синхронные серводвигатели, которые чаще всего используются в мехатронных модулях. Асинхронные двигатели сложнее в управлении, особенно при работе на низких скоростях, что ограничивает их применение. Однако создание инверторов, обеспечивающих незави-

симое управление частотой и амплитудой выходного напряжения, а также разработка принципов векторного управления скоростью создают предпосылки для широкого применения данных двигателей в мехатронике. Ротор асинхронного двигателя имеет меньший момент инерции в сравнении с двигателем постоянного тока при той же мощности, что позволяет получить более высокое быстродействие и лучшие динамические характеристики модуля.

Мехатронные модули имеют развитую электронную и вычислительную части, что позволяет реализовать оптимальное управление движением. Ранее задача оптимизации была решена применительно к приводу с двигателем постоянного тока [14–16] на основе линейной математической модели объекта и квадратичного критерия, которая именуется аналитическим конструированием регулятора [17]. Описание трехфазно-

го асинхронного электродвигателя линейными уравнениями затрудняется тем, что его механическая характеристика существенно нелинейна.

В данной работе предпринята попытка аналитического решения задачи оптимизации для управляющей подсистемы мехатронного модуля с трехфазным асинхронным электродвигателем на основе линеаризованных уравнений состояния.

Постановка задачи

Для решения задачи оптимизации необходимо получить математическую модель трехфазного асинхронного электродвигателя в виде линейных дифференциальных уравнений (уравнений состояния). Это позволит найти аналитическое решение оптимизационной задачи для управляющей части мехатронного модуля, позволяющее рассчитывать оптимальные значения коэффициентов обратной связи по угловому перемещению выходного вала и скорости двигателя в зависимости от значений элементов, входящих в критерий оптимизации матриц Q и R , которые определяют качество переходного процесса и количество затрачиваемой на регулирование энергии. Последующий анализ влияния коэффициентов данных матриц на показатели качества переходного процесса и потери в приводе даст возможность сформулировать рекомендации по выбору значений элементов данных матриц при расчете и проектировании мехатронных модулей с трехфазным асинхронным электродвигателем.

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

где m_1 – число фаз обмотки статора;

U_1 – напряжение на обмотке статора;

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

Скольжение ротора

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

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

Значения входящих в (3) сопротивлений

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

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

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

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

Для практических расчетов с достаточной точностью можно принимать $c' = 1$ и $c'' = 0$ [18].

$$M = \frac{m_1 U_1^2 (\omega_1 - \omega)}{\omega_1^2 R_2'} = \frac{m_1}{R_2'} \left(\frac{U_1}{\omega_1} \right)^2 \omega_1 - \frac{m_1}{R_2'} \left(\frac{U_1}{\omega_1} \right)^2 \omega. \quad (6)$$

Если считать, что отношение U_1/ω_1 поддерживается инвертором постоянным в процессе регулирования, т. е. $(U_1/\omega_1)^2 = \text{const}$ (на практике в большинстве случаев это имеет место), то выражение (6) представляет собой линейную зависимость момента от угловой скорости. Целесообразно выразить это отношение через номинальные значения напряжения и угловой скорости, т. е. $(U_1/\omega_1)^2 = (U_{1\text{ном}}/\omega_{1\text{ном}})^2$.

Тогда, подставляя (6) в (2), получаем

$$J_{\text{пр}} \cdot \dot{\omega} = \frac{m_1}{R_2'} \left(\frac{U_{1\text{ном}}}{\omega_{1\text{ном}}} \right)^2 \omega_1 - \frac{m_1}{R_2'} \left(\frac{U_{1\text{ном}}}{\omega_{1\text{ном}}} \right)^2 \omega. \quad (7)$$

$$\dot{\omega} = - \frac{m_1}{J_{\text{пр}} R_2'} \left(\frac{U_{1\text{ном}}}{\omega_{1\text{ном}}} \right)^2 \omega + \frac{m_1}{J_{\text{пр}} R_2'} \left(\frac{U_{1\text{ном}}}{\omega_{1\text{ном}}} \right)^2 \omega_1. \quad (10)$$

Решение задачи оптимизации

Исходные уравнения, описывающие динамику привода

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

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

где α – угол поворота выходного звена;

ω – угловая скорость ротора двигателя;

k_p – коэффициент передачи редуктора;

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

M – момент двигателя.

В уравнении (2) не учтен момент сопротивления на валу двигателя, поскольку рассматривается переходный процесс при пуске двигателя без нагрузки. Предполагается также, что инвертор, управляющий двигателем, не обладает инерционностью, т. е. является пропорциональным звеном.

Момент асинхронного электродвигателя [18–19]

Тогда при $s \ll 1$ выражение (3) сводится к виду

$$M = \frac{m_1 U_1^2 s}{\omega_1 R_2'}. \quad (5)$$

Получили линейную зависимость момента от скольжения и, соответственно, от скорости вращения ротора. Данная зависимость достаточно точно описывает рабочий участок механической характеристики асинхронного электродвигателя, на котором располагается точка, соответствующая номинальному режиму работы. Механическая характеристика на данном участке обладает высокой жесткостью, т. е. изменение угловой скорости с ростом момента незначительно. Данному участку соответствует изменение момента и скольжения примерно от нуля до двух номинальных значений ($0 < M < 2M_{\text{ном}}$ и $0 < s < 2s_{\text{ном}}$). Следовательно, выражение (4) справедливо, если в процессе работы двигателя данные переменные поддерживаются в указанных диапазонах. Это можно обеспечить в приводе с частотным регулированием скорости [12], увеличивая задающий сигнал на перемещение по линейному закону, т. е. фактически ограничивая заданную скорость вращения.

Подставляя (4) в (5), получаем

Приводя (1) и (7) к стандартному виду уравнений состояния [20],

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (8)$$

где A и B – матрицы объекта;

x – вектор переменных состояния (в нашем случае α, ω);

u – вектор управления (в нашем случае ω_1),

получаем

$$\dot{\alpha} = k_p \omega; \quad (9)$$

Тогда матрицы модели объекта

$$A = \begin{bmatrix} 0 & k_P \\ 0 & -\frac{m_1}{J_{ПП}R_2'} \left(\frac{U_{1НОМ}}{\omega_{1НОМ}} \right)^2 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{m_1}{J_{ПП}R_2'} \left(\frac{U_{1НОМ}}{\omega_{1НОМ}} \right)^2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Полученная линейная модель объекта позволяет решать задачу оптимизации на основе квадратичного критерия (задача аналитического конструирования регулятора).

Критерий качества регулирования (на интервале времени $t_0 - t_k$)

$$I = \int_{t_0}^{t_k} (u^T R u + x^T Q x) dt, \quad (13)$$

где R – симметричная, положительно-определенная матрица весовых коэффициентов, определяющих затраты на управление;

Q – симметричная, неотрицательно-определенная матрица весовых коэффициентов, определяющих качество переходного процесса.

Оптимальное значение критерия

$$I^* = x^T P(t) x, \quad (14)$$

где $P(t)$ – весовая матрица, в общем случае зависящая от времени.

Постоянные значения весовой матрицы получаются при оптимизации на бесконечном интервале времени и находятся из решения алгебраического уравнения [17]

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0. \quad (15)$$

Найденную матрицу постоянных коэффициентов обозначаем $\bar{P}$.

$$\begin{bmatrix} p_{12}^2 a_{22}^2 / r - q_{11} & \frac{a_{22}^2}{r} p_{12} p_{22} - k_P p_{11} + a_{22} p_{12} \\ \frac{a_{22}^2}{r} p_{12} p_{22} - k_P p_{11} + a_{22} p_{12} & \frac{a_{22}^2}{r} p_{22}^2 + 2a_{22} p_{22} - 2k_P p_{12} - q_{22} \end{bmatrix} = 0. \quad (23)$$

В матрице (23) обозначено

$$a_{22} = \frac{m_1}{J_{ПП}R_2'} \left(\frac{U_{1НОМ}}{\omega_{1НОМ}} \right)^2. \quad (24)$$

Для нахождения p_{12} и p_{22} приравняем к нулю элементы на главной диагонали (23)

$$p_{12}^2 a_{22}^2 / r - q_{11} = 0; \quad (25)$$

$$\frac{a_{22}^2}{r} p_{22}^2 + 2a_{22} p_{22} - 2k_P p_{12} - q_{22} = 0. \quad (26)$$

Из (25) и (26) находим

$$k_2 = -1 + \sqrt{1 + 2 \frac{J_{ПП}R_2'}{m_1} \left(\frac{\omega_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} \right)^2 k_P k_1 + \frac{q_{22}}{r}}, \quad (30)$$

За счет выбора элементов матриц Q и R при вычислении k_1 и k_2 можно получить желаемое соотношение между качеством переходного процесса и затратами энергии на регулирование.

В общем случае для симметричной матрицы

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

При этом оптимальное управление

$$u^* = -Kx, \quad (17)$$

где $K = R^{-1}B^T \bar{P}$ – матрица коэффициентов обратной связи по переменным состояния.

В нашем случае (для системы второго порядка) требуется нахождение коэффициентов k_1, k_2 матрицы K .

Для системы с одним входом матрица R состоит из одного элемента. Обозначим

$$R = [r]. \quad (18)$$

Из (17) с учетом (12), (16), (18) закон управления

$$u^* = -k_1 \alpha - k_2 \omega, \quad (19)$$

$$\text{где } k_1 = \frac{m_1}{J_{ПП}R_2'} \left(\frac{U_{1НОМ}}{\omega_{1НОМ}} \right)^2 \frac{p_{12}}{r}, \quad (20)$$

$$k_2 = \frac{m_1}{J_{ПП}R_2'} \left(\frac{U_{1НОМ}}{\omega_{1НОМ}} \right)^2 \frac{p_{22}}{r}. \quad (21)$$

Таким образом, для построения оптимальной системы требуется

нахождение только двух элементов p_{12} и p_{22} матрицы $\bar{P}$.

Матрицу Q , входящую в критерий (13), принимаем в виде

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 \\ 0 & q_{22} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Уравнение (15) после подстановки матриц (11), (12), (16), (18), (22) приводится к виду

$$p_{12} = \frac{\sqrt{rq_{11}}}{a_{22}}, \quad (27)$$

$$p_{22} = \frac{r}{a_{22}} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2p_{12}k_P}{r} + \frac{q_{22}}{r}} \right). \quad (28)$$

Подставляя (27), (28) в (20), (21), с учетом (24) получаем

$$k_1 = \sqrt{q_{11}/r}, \quad (29)$$

Методика исследований

Для оценки показателей качества переходного процесса и потерь энергии разработана математическая модель в приложении Simulink, которая приведена на рисунке 1.

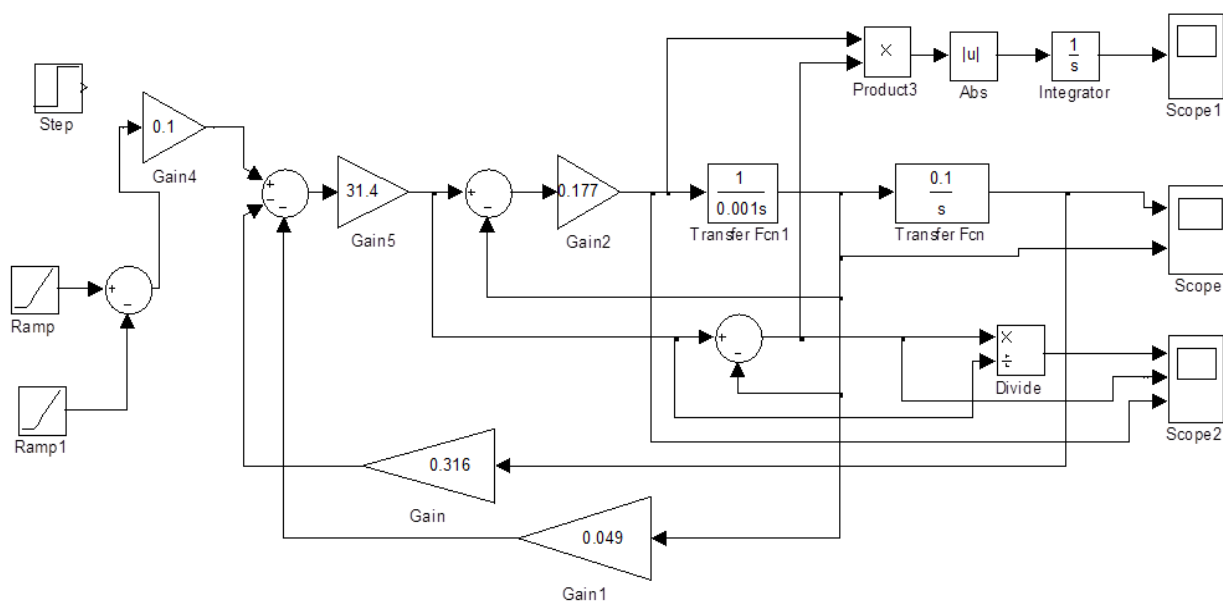


Рисунок 1 – Модель управляющей подсистемы мехатронного модуля в приложении Simulink

В основу математической модели положены уравнения (9), (10), записанные в операторной форме. В модели предусмотрен вывод на осциллограф Scope переменных состояния: угла поворота выходно-

го вала α (она же является выходной переменной) и угловой скорости ω . Вид осциллограммы показан на рисунке 2.

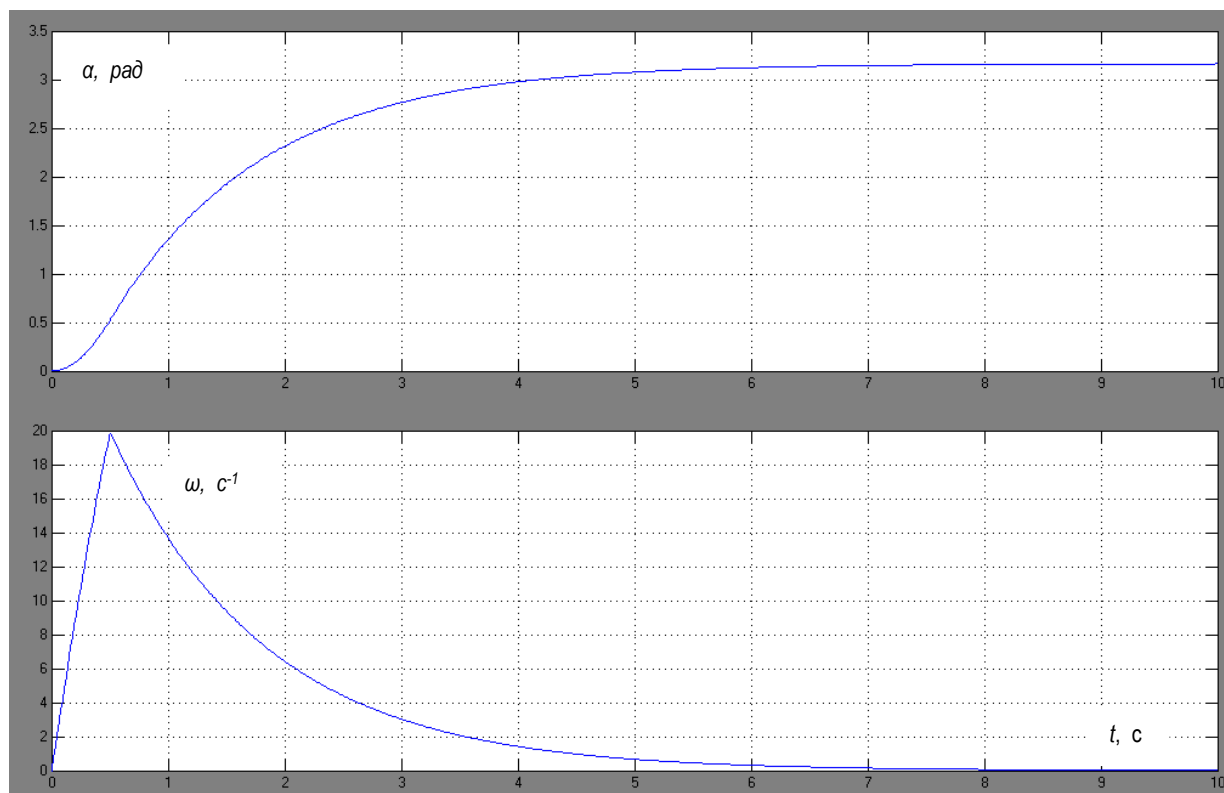


Рисунок 2 – Осциллограммы изменения угла поворота выходного вала и угловой скорости

На осциллограф Scope1 выводится кривая изменения потерь энергии в роторе двигателя $\Delta W_{\Sigma 2}$. Вид осциллограммы показан на рисунке 3. Потери вычисляются путем интегрирования значения мгновенной мощности потерь в роторе [18]

$$\Delta W_{\Sigma 2} = \int M(\omega_1 - \omega) dt \quad (31)$$

Поскольку задача исследования не предполагает определение точного значения потерь в двигателе, а состоит в нахождении настро-

ек, при которых эти потери минимальны, то учет только потерь в роторе вполне допустим. Это обусловлено тем, что изменение тока обмотки ротора приводит к соответствующему изменению тока обмотки статора, поэтому минимальным потерям в обмотке ротора будут соответствовать минимальные потери в двигателе в целом.

Осциллограмма показывает, что интенсивный рост потерь имеет место в период разгона ротора, далее ротор вращается синхронно с полем, и ток в обмотке ротора отсутствует.

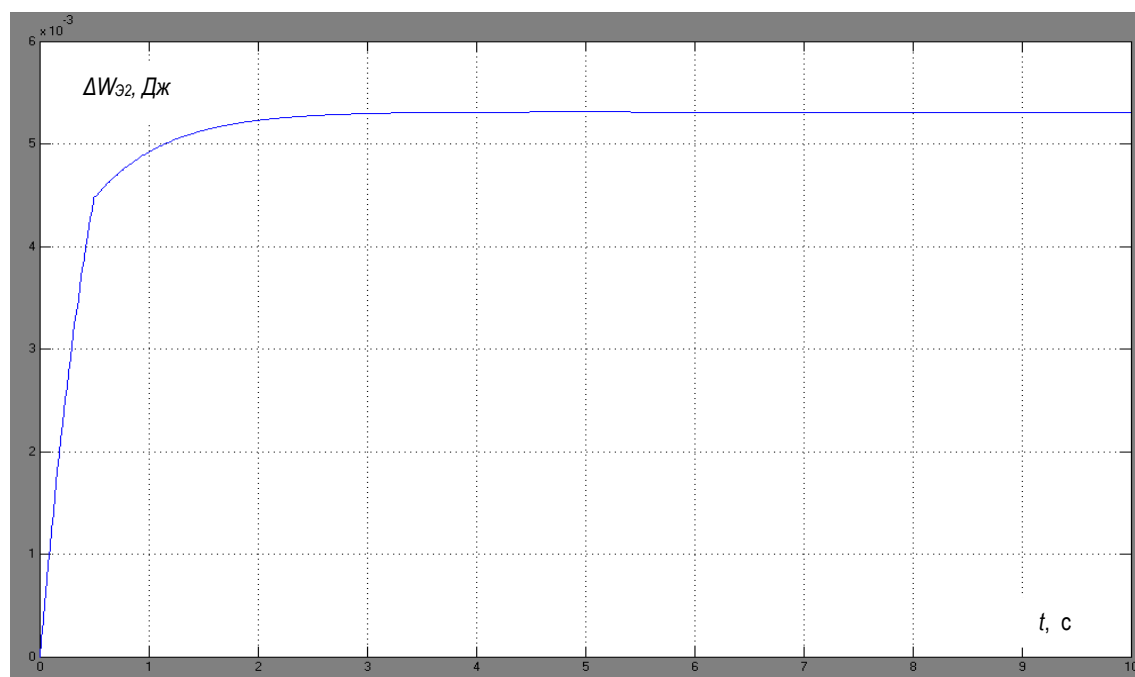


Рисунок 3 – Осциллограмма изменения потерь энергии в обмотке ротора

На осциллограф Scope2 выводятся зависимости скольжения, разности скоростей вращения магнитного поля и ротора, а также момента двигателя от времени. Вид осциллограммы показан на рисунке 4.

Первая кривая показывает, что в самый начальный момент скольжение достаточно велико, однако это не означает, что работа двигателя осуществляется на нелинейном участке характеристики. Просто, при очень низкой скорости вращения ротора скольжение может быть достаточно большим даже при невысокой скорости вращения поля, как следует из (4). Однако при этом не нарушается условие $0 < M < 2M_{\text{ном}}$, а это значит, что рабочая точка не выходит за

пределы линейного участка характеристики. Это подтверждают кривые изменения разности скоростей и момента. Следует отметить, что для выполнения указанного условия входной сигнал изменяется по линейному закону до заданного значения, т. е. скорость его изменения ограничена. Выход за пределы линейного участка может иметь место в случае, если ступенчато подать на вход достаточно большое значение задающего сигнала. Таким образом, подбирая соответствующий темп нарастания входного сигнала, можно обеспечить работу на линейном участке механической характеристики, что делает обоснованными принятые допущения.

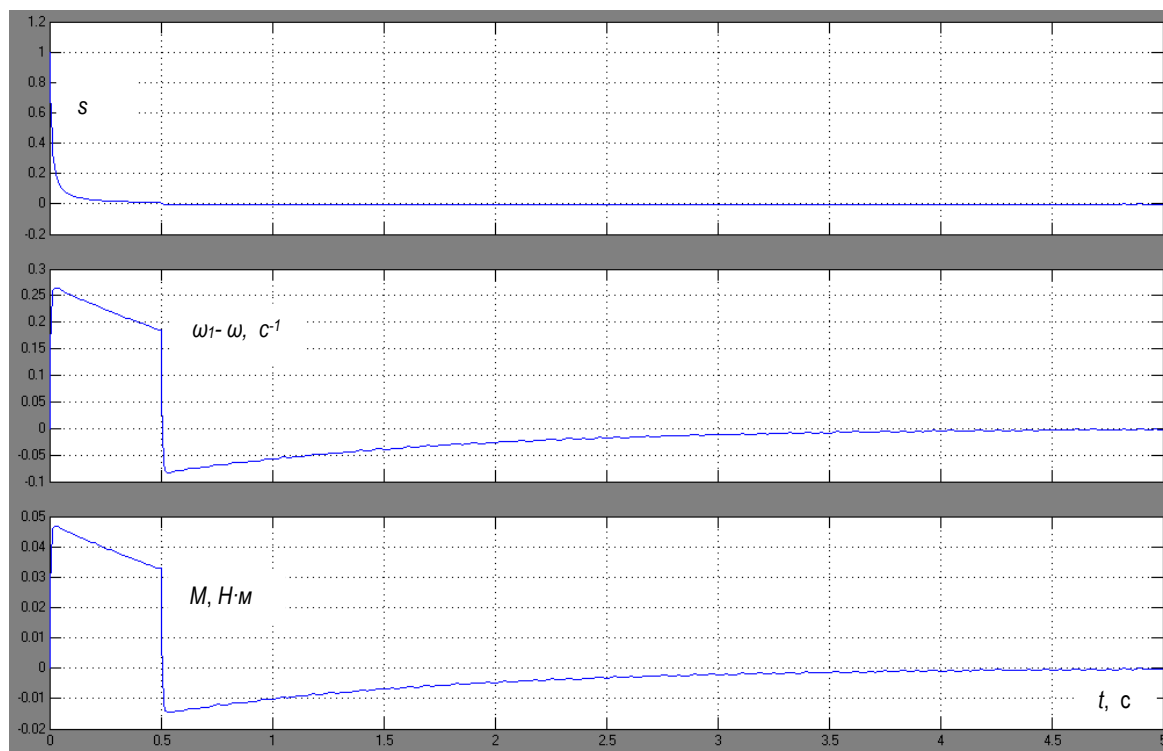


Рисунок 4 – Осциллограммы изменения скольжения, разности скоростей вращения магнитного поля и ротора, а также момента двигателя во времени

Предложенная математическая модель использована для анализа влияния значений элементов матриц Q и R на качество переходного процесса и потери в мехатронном модуле с трехфазным асинхронным двигателем. Расчет выполнен для двигателя 4A71A2Y3, паспортные данные и параметры схемы замещения для которого указаны в [21].

Результаты исследования и обсуждение

Процедура анализа реализуется следующим образом. При заданных значениях элементов матриц Q и R вычисляются значения k_1 , k_2 по (20), (21). Данные коэффициенты вводятся в модель и на основе получаемых в результате моделирования осциллограмм находятся показатели качества переходного процесса и потери энергии. В качестве показателей качества переходного процесса приняты время регулирования t_p (вычисляется при допустимом отклонении регулируемой переменной 5 %) и перерегулирование σ , а в качестве показателя энергоэффективности – потери энергии в обмотке ротора двигателя за время переходного процесса $\Delta W_{\Sigma 2}$.

Поскольку, согласно (20) коэффициент k_1 определяется соотношением q_{11} и r , то целесообразно принять $q_{11} = 1$, а изменять r . Изменению также подлежит коэффициент q_{22} матрицы Q .

Результаты вычислений приведены в таблицах 1–3.

Таблица 1 – Результаты моделирования при $q_{11} = 1$, $r = 1$ ($k_1 = 1$)

q_{22}	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
k_2	0,000565	0,0959	0,184	0,265	0,342	0,415
t_p , с	1,3	4,0	7,0	>10	>10	>10
σ , %	0	0	0	–	–	–
$\Delta W_{\Sigma 2}$, мДж	54,0	5,58	2,06	–	–	–

Таблица 2 – Результаты моделирования при $q_{11} = 1$, $r = 4$ ($k_1 = 0,5$)

q_{22}	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
k_2	0,000335	0,0250	0,0491	0,0727	0,0957	0,1072
t_p , с	2,3	3,7	5,3	7,0	8,0	>10
σ , %	0	0	0	0	0	0
$\Delta W_{\Sigma 2}$, мДж	18,6	6,90	3,62	2,23	1,52	–

Таблица 3 – Результаты моделирования при $q_{11} = 1$, $r = 10$ ($k_1 = 0,316$)

q_{22}	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
k_2	0,000178	0,0101	0,0199	0,0297	0,0394	0,0490
t_p , с	3,2	4,2	5,0	6,0	7,0	7,8
σ , %	0	0	0	0	0	0
$\Delta W_{\Sigma 2}$, мДж	8,65	5,31	3,60	2,60	1,97	1,55

Из полученных результатов следует, что увеличение значения r матрицы R , как и увеличение значения q_{22} матрицы Q , приводит к снижению потерь во всех случаях. Это сопровождается увеличением длительности переходного процесса (времени регулирования). При меньших значениях r влияние q_{22} проявляется более интенсивно.

Одно и то же значение времени регулирования можно получить при различных сочетаниях r и q_{22} . При этом для большего значения r потери несколько ниже (до 10 %). Однако при этом возрастает минимальное время регулирования, которое можно получить при $q_{22} = 0$. Если требуется меньшее время регулирования, то его можно обеспечить уменьшением r . При отсутствии жесткого ограничения на время регулирования следует принимать r по возможности большим.

Следует отметить, что во всех случаях обеспечивается монотонный переходный процесс (отсутствие перерегулирования).

В то же время увеличение r приводит к уменьшению k_1 и, как следствие, k_2 , а увеличение q_{22} – к росту k_2 . Это же следует и из полученных аналитических зависимостей (20), (21). При выборе r можно исходить, в том числе из наиболее приемлемого значения k_1 . Это актуально, если измерительная часть является аналоговой. Увеличение k_1 приводит к повышению быстродействия, что сопровождается ростом потерь.

Таким образом, при выборе элементов матриц Q и R можно использовать следующий подход. Принять $q_{11} = 1$, а r по возможности большим (до 10...15), далее q_{22} увеличивать, пока время регулирования не достигнет максимально допустимого значения. В этом случае потери будут минимальны при заданной длительности переходного процесса.

Заключение

В результате решения задачи оптимального управления для управляющей подсистемы мехатронного модуля с трехфазным асинхронным электродвигателем получены аналитические зависимости для расчета коэффициентов обратной связи по углу поворота выходного вала и угловой скорости. Это позволяет синтезировать оптимальный привод инженерным расчетом, не прибегая каждый раз к процедуре оптимизации. При этом коэффициент обратной связи по положению однозначно определяется значениями матриц Q и R , а коэффициент обратной связи по скорости зависит также от параметров двигателя. Они могут быть вычислены на основе полученных аналитических выражений.

Анализ результатов расчета и последующего моделирования работы оптимального привода при варьировании значениями матриц Q и R показал, что увеличение значения r матрицы R и значения q_{22} матрицы Q во всех случаях приводит к уменьшению потерь в приводе при соответствующем росте длительности переходного процесса. Целесообразно принимать $q_{11} = 1$, а r по возможности больше, вплоть до 10...15. При этом дальнейшее снижение потерь может быть достигнуто за счет увеличения q_{22} в пределах, определяемых допустимым временем регулирования. Выявленные закономерности позволяют целенаправленно подойти к выбору матриц Q и R при проектировании мехатронных модулей с оптимальными параметрами.

Список цитированных источников

1. Жавнер, В. Л. Мехатронные системы: учеб. пособие / В. Л. Жавнер, А. Б. Смирнов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 131 с.
2. Подураев, Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд., стер. / Ю. В. Подураев. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с.
3. Егоров, О. Д. Конструирование мехатронных модулей: учебник / О. Д. Егоров, Ю. В. Подураев. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2004. – 360 с.
4. Проектирование мехатронного модуля с использованием асинхронного двигателя и шарико-винтовой передачи // Научные Статьи.Ру. – URL: <https://nauchniestati.ru> (дата обращения: 24.02.2024).
5. Герман-Галкин, С. Г. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech / С. Г. Герман-Галкин, Б. А. Карташов, С. Н. Литвинов. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 494 с.
6. Поляков, А. Н. Проектирование мехатронных модулей станков с ЧПУ: учебное пособие / А. Н. Поляков. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 128 с.
7. Родичев, А. Ю. Проектирование мехатронных и робототехнических систем: учебное пособие / А. Ю. Родичев, Р. Н. Поляков, А. В. Горин. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023. – 271 с.
8. Волкова, М. А. Приводы мехатронных и робототехнических систем: методические рекомендации / М. А. Волкова. – М.: РТУ МИРЭА, 2024. – 19 с.
9. Романов, А. М. Программное обеспечение мехатронных и робототехнических систем: учебно-методическое пособие / А. М. Романов, М. А. Волкова. – М.: РТУ МИРЭА, 2019. – 68 с.
10. Волков, А. Н. Выбор энергосберегающих законов движения мехатронных приводов технологических машин / А. Н. Волков, О. Н. Мацко, А. В. Мосалова // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – № 4. – С. 141–149.
11. Синтез оптимальных по критерию энергосбережения алгоритмов работы приводов роботов и технологических машин: учеб. пособие / А. Н. Волков, А. А. Корнилова, О. Н. Мацко, А. В. Козлов. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 80 с.

12. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2006. – 363 с.
13. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов постоянного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург : УРО РАН, 2000. – 654 с.
14. Оптимизация привода постоянного тока с регулируемой скоростью / О. Н. Прокопья, Л. И. Вабищевич, А. В. Францевич [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 2. – С. 93–96.
15. Супрунчук, П. Д. Оптимальный электропривод постоянного тока / П. Д. Супрунчук, О. Н. Прокопья, О. Г. Прохизко // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сборник статей / Брестский государственный технический университет – Брест : Издательство БрГТУ, 2021. – С. 20–25.
16. Оптимизация позиционного привода постоянного тока / О. Н. Прокопья, Л. И. Вабищевич, О. Г. Прохизко, А. С. Лапука // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 2. – С. 79–83.
17. Солодовников, В. В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В. В. Солодовников, В. Н. Плотноков, А. В. Яковлев. – М. : Машиностроение, 1985. – 536 с.
18. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины: учебник для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 928 с.
19. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 350 с.
20. Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.
21. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.
7. Rodichev, A. YU. Proektirovanie mekhatronnyh i robototekhnicheskikh sistem : uchebnoe posobie / A. YU. Rodichev, R. N. Polyakov, A. V. Gorin. – Orel : OGU imeni I.S. Turgeneva, 2023. – 271 s.
8. Volkova, M. A. Privody mekhatronnyh i robototekhnicheskikh sistem : metodicheskie rekomendacii / M. A. Volkova. – M. : RTU MIREA, 2024. – 19 s.
9. Romanov, A. M. Programmnoe obespechenie mekhatronnyh i robototekhnicheskikh sistem : uchebno-metodicheskoe posobie / A. M. Romanov, M. A. Volkova. – M. : RTU MIREA, 2019. – 68 s.
10. Volkov, A. N. Vybore energosberegayushchih zakonov dvizheniya mekhatronnyh privodov tekhnologicheskikh mashin / A. N. Volkov, O. N. Macko, A. V. Mosalova // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki. – 2018. – № 4. – С. 141–149.
11. Sintez optimal'nykh po kriteriyu energosberezheniya algoritmov raboty privodov robotov i tekhnologicheskikh mashin: ucheb. posobie / A. N. Volkov, A. A. Komilova, O. N. Macko, A. V. Kozlovich. – SPb. : POLITEKH-PRESS, 2023. – 80 s.
12. Firago, B. I. Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka / B. I. Firago, L. B. Pavlyachik. – Minsk : Tekhnoperspektiva, 2006. – 363 s.
13. Shrejner, R. T. Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov postoyannogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty / R. T. Shrejner. – Ekaterinburg : URO RAN, 2000. – 654 s.
14. Optimizatsiya privoda postoyannogo toka s reguliruemoj skorost'yu / O. N. Prokopenya, L. I. Vabishchevich, A. V. Francevich [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2023. – № 2. – С. 93–96.
15. Suprunchuk, P. D. Optimal'nyy elektroprivod postoyannogo toka / P. D. Suprunchuk, O. N. Prokopenya, O. G. Prozhizhko // Noveye tekhnologii i materialy, avtomatizatsiya proizvodstva : sbornik statej / Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet – Brest : Izdatel'stvo BrGTU, 2021. – С. 20–25.
16. Optimizatsiya pozitsionnogo privoda postoyannogo toka / O. N. Prokopenya, L. I. Vabishchevich, O. G. Prozhizhko, A. S. Lapuka // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 2. – С. 79–83.
17. Solodovnikov, V. V. Osnovy teorii i elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / V. V. Solodovnikov, V. N. Plotnikov, A. V. YAKovlev. – M. : Mashinostroenie, 1985. – 536 s.
18. Ivanov-Smolenskij, A. V. Elektricheskie mashiny: uchebnik dlya vuzov / A. V. Ivanov-Smolenskij. – M. : Energiya, 1980. – 928 s.
19. Vol'dek, A. I. Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka: uchebnik dlya vuzov / A. I. Vol'dek, V. V. Popov. – SPb. : Piter, 2008. – 350 s.
20. Fillips, CH. Sistemy upravleniya s obratnoj svyaz'yu / CH. Fillips, R. Harbor. – M. : Laboratoriya bazovykh znaniy, 2001. – 616 s.
21. Asinhronnye dvigateli serii 4A: spravochnik / A. E. Kravchik, M. M. SHlaf, V. I. Afonin, E. A. Sobolenskaya. – M. : Energoizdat, 1982. – 504 s.

References

1. Zhavner, V. L. Mekhatronnye sistemy: ucheb. posobie / V. L. Zhavner, A. B. Smimov. – SPb. : Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. – 131 s.
2. Poduraev, YU. V. Mekhatronika: osnovy, metody, primeneniye: ucheb. posobie dlya studentov vuzov. – 2-e izd., ster. / YU. V. Poduraev. – M. : Mashinostroenie, 2007. – 256 s.
3. Egorov, O. D. Konstruirovaniye mekhatronnykh modulej: uchebnik / O. D. Egorov, YU. V. Poduraev. – M. : MGТУ «STANKIN», 2004. – 360 s.
4. Proektirovaniye mekhatronnogo modulya s ispol'zovaniyem asinhronnogo dvigatelya i shariko-vintovoy peredachi // Nauchnye Stat'i.Ru. – URL: <https://nauchniestati.ru> (data obrashcheniya: 24.02.2024).
5. German-Galkin, S. G. Model'noye proektirovaniye elektromekhanicheskikh mekhatronnykh modulej dvizheniya v srede SimInTech / S. G. German-Galkin, B. A. Kartashov, S. N. Litvinov. – M. : DMK Press, 2021. – 494 s.
6. Polyakov, A. N. Proektirovaniye mekhatronnykh modulej stankov s CHPU : uchebnoye posobie / A. N. Polyakov. – Orenburg : OGU, 2019. – 128 s.

Материал поступил 02.04.2025, одобрен 08.04.2025,
принят к публикации 14.04.2025

ОЦЕНКА ДОПУСТИМОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ СЖАТИИ ПРЯМОГО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ

Б. Г. Холодарь

К. т. н., доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской части УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: hbg@list.ru

Реферат

Допустимая нагрузка на сжимаемый стержень назначается исходя из условия обеспечения упругого характера его работы. В рассматриваемом случае потеря работоспособности стержня может быть вызвана продольными сжимающими усилиями, которым соответствуют как однородные напряжения сжатия, так и изгибные деформации, чье появление связано с потерей устойчивости стержня. Опасный уровень этих усилий зависит от гибкости стержня, и условия для их ограничения могут быть построены, ориентируясь на предел текучести материала и критическую нагрузку потери устойчивости. Наличие исходных несовершенств стержня и несовершенств условий его нагружения вызывают необходимость в снижении уровня рабочих нагрузок в связи с возможностью развития недопустимого уровня изгибных деформаций. Это в особенности касается стержней с высокой гибкостью. В статье рассматривается вопрос о величине продольной нагрузки, вызывающей выход материала стержня из упругой стадии работы при нескольких видах геометрических несовершенств, связанных с характером установки стержня на опорах (три схемы – с фиксированным эксцентриситетом, две – с исходной погибью, одна схема – эксцентриситет, зависящий от прогиба). Задачи ставятся в статической постановке, большие перемещения и закритические деформации стержня не рассматриваются. Статья иллюстрирована графиками и таблицами, в которых для стержней квадратного и круглого сечений в зависимости от уровня исходных несовершенств системы приводятся данные о параметрах нагрузки, вызывающей появление неупругой деформации материала, и соответствующих ей величинах максимального прогиба и угла поворота опорного сечения. Приведенные результаты и их анализ показывают, что определение допустимой нагрузки может быть основано на линеаризованном подходе, используемом в технической теории изгиба стержней, что существенно облегчает решение вопроса.

Ключевые слова: устойчивость, предел текучести, критическая деформация, допустимая нагрузка, уровень несовершенства.

ESTIMATION OF ALLOWABLE LOAD IN LONGITUDINAL COMPRESSION STRAIGHT ELASTIC ROD

B. G. Kholodar

Abstract

The permissible load on a compressible rod is determined on the basis of the following conditions elastic character of its operation. In the case under consideration, the loss of performance of the rod can be caused by longitudinal compressive forces, which correspond to both homogeneous compression stresses and bending deformations, whose occurrence is associated with the loss of stability of the rod. The dangerous level of these forces depends on the flexibility of the rod, and the conditions for their limitation can be constructed by focusing on the yield strength of the material and the critical load of loss of stability. The presence of initial imperfections of the rod and imperfections of its loading conditions make it necessary to reduce the level of working loads due to the possibility of developing an unacceptable level of bending deformations. This is especially true for rods with high flexibility. The paper deals with the question of the magnitude of the longitudinal load causing the rod material to leave the elastic stage of operation under several types of geometrical imperfections related to the nature of the rod installation on the supports (three schemes – with fixed eccentricity, two schemes – with initial perdition, one scheme – eccentricity depending on the deflection). The problems are posed in a static formulation, large displacements and subcritical deformations of the rod are not considered. The paper is illustrated with graphs and tables in which, for square and circular bars, depending on the level of initial imperfections in the system, data are given on the parameters of the load causing inelastic deformation of the material and the corresponding values of the maximum deflection and the angle of rotation of the support section. The above results and their analysis show that the determination of the allowable load can be based on the linearized approach used in the technical theory of rod bending, which significantly facilitates the solution of the question.

Keywords: stability, yield strength, critical strain, allowable load, imperfection level.

1 Введение

Допустимая нагрузка при продольном статическом сжатии упругого стержня постоянного сечения назначается как доля от предельной упругой $P_T = E\epsilon_{TC}A$ или от критической нагрузки, соответствующей потере устойчивости стержня и устанавливаемой формулой Эйлера $P_{кр} = \pi^2 EJ_z/L^2$, где E – модуль упругости, J_z – соответствующий момент инерции поперечного сечения относительно нейтральной оси, L – приведенная длина стержня, определяемая граничными условиями его закрепления, ϵ_{TC} – деформация предела текучести материала при сжатии (далее пределы пропорциональности и текучести отождествляются), A – площадь поперечного сечения. Применение формулы Эйлера ограничено областью упругой работы материала стержня, которая зависит от его гибкости $\lambda = L/i$, где $i^2 = J_z/A$ – радиус инерции сечения. Вместе с тем, наличие физических и геометрических несовершенств стержня и условий его нагружения, таких как неоднородность материала и его механических свойств, начальная погибь, отклонение нагрузки от продольной оси крепления стержня и др., создают предпосылки возникновения изгибной формы равновесия и соответствующих деформаций, дополнительных к однородным сжимающим. Поэтому вопрос об определении

допустимого уровня нагружения связан с учетом имеющихся несовершенств системы.

Параметр λ является чисто геометрической характеристикой стержня, не зависит от свойств его материала и даже однозначно не определяет распределение изгибных напряжений в сечении, поэтому границу области упругой работы удобнее, на наш взгляд, охарактеризовать величиной критической деформации сжатия, которую определим как $\epsilon_{кр} = P_{кр}/EA = \pi^2 i^2/L^2$. Величины $\epsilon_{кр}$ и λ связаны между собой зависимостью $\epsilon_{кр} = \pi^2/\lambda^2$.

Параметр $\epsilon_{кр}$ является достаточно прозрачным с физической точки зрения и связывает механические и геометрические характеристики материала и конструкции. Условие упругого нагружения в данном случае запишется как $\epsilon_{кр} < \epsilon_T$, где ϵ_T – деформация предела текучести. Для конструкционной мягкой стали она составляет $\epsilon_T \approx 1 \cdot 10^{-3}$, чему соответствует значение гибкости $\lambda \approx 100$, которым обычно и принято ограничивать зону упругой работы стержня в данной задаче.

Вопрос о потере устойчивости упругого стержня решается, исходя из различных подходов [1–5], как точных, основанных на аналитическом решении соответствующих дифференциальных уравнений, так и приближенных (энергетических) [6–10]. В большинстве случаев

используется линеаризованная форма выражения для кривизны оси стержня $\chi = w''/(1+w'^2)^{3/2} \approx w''$, где $w = w(x)$ – прогиб стержня в точке с координатой x , а в дифференциальном уравнении изгиба выражение для момента $M(x)$ записывается с учетом наличия рассматриваемых отклонений от идеализированного прямолинейного состояния стержня. В случае классической задачи Эйлера уравнение имеет вид $w'' + P/EJ_z \cdot w = 0$,

в котором скрыты фактические причины появления изогнутой формы равновесия. При линеаризованном подходе суждение о потере устойчивости выносится из условия реализации бесконечного прогиба стержня, которое приводит к определению критической нагрузки через значения собственных чисел дифференциального уравнения (1). Вопрос о реалистичности бесконечного прогиба стержня при этом опускается [8, стр. 123].

Выполнение ограничений по λ или $\varepsilon_{кр}$ не отменяет, однако возможности развития вызываемых изгибом пластических деформаций в материале, появление которых в данном случае является недопустимым, препятствующим возврату стержня в исходное состояние после снятия внешнего воздействия, и может соответствовать нагрузке меньше критической. Это, в свою очередь, влияет на выбор расчетного коэффициента безопасности [4, 5, 10].

Таким образом, задача о допустимой нагрузке при продольном сжатии стержня фактически приводится к решению задачи прочности.

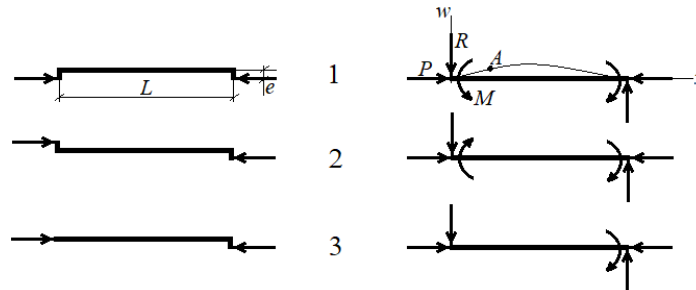


Рисунок 1 – Схемы нагружения

Используя дифференциальное уравнение изогнутой оси первоначально прямого стержня

$$w'' = -M(x)/EJ_z$$

и записав момент $M(x)$ от реактивных силовых факторов P, R, M на левой опоре относительно произвольной точки A оси, уравнения изгиба для схем 1, 2, 3 получим в виде

$$w'' + k^2 w = -M_R(x)/EJ_z, \quad (2)$$

где $k^2 = P/EJ_z$, $M_R(x)$ – момент от поперечной силы и сосредоточенного момента.

Для случая стержня с исходной погибью $w_{исх}$ (случай 4) учитываем, что моменты в сечениях стержня пропорциональны изменению

$$w(x) = e \left((-\alpha_1 \sin(kL - kx) + \alpha_2 \sin(kx)) / \sin(kL) + \alpha_1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \frac{kx}{kL} \right)$$

$$M(x) = Pe \left((-\alpha_1 \sin(kL - kx) + \alpha_2 \sin(kx)) / \sin(kL) \right). \quad (4)$$

Для случая 4 согласно (3):

$$w(x) = w_0 \frac{n^2}{n^2 - k^2} \left(-\frac{\sin(nL)}{\sin(kL)} \sin(kx) + \sin(nx) \right)$$

$$M(x) = Pw(x). \quad (5)$$

Обозначив через $\gamma = P/P_{кр}$ величину относительной продольной силы, имеем $kL = \pi\gamma^{1/2}$.

Для случаев 1–3 при небольших нагрузках максимальный момент сосредоточен в опорном сечении, но начиная с некоторого уровня γ момент $M(x)$ приобретает экстремальное значение в пределах длины стержня.

Используя (4)–(5) и определив на оси X точку x_M , в которой изгибающий момент принимает наибольшую величину, условия выхода суммарных деформаций стержня от сжатия и изгиба на уровень ε_T получим в виде:

$$\gamma \left(I \pm \frac{eA}{W_z} F(\gamma) \right) = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{кр}} \quad \text{и} \quad \gamma \left(I \pm \frac{w_0 A}{W_z} F(\gamma) \right) = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{кр}}, \quad (6)$$

Указанные обстоятельства, связанные с поведением сжатого стержня и определением критической нагрузки, широко известны и обсуждены в соответствующей литературе, однако числовые данные, иллюстрирующие вступление материала стержня в упруго-пластическое состояние, в значительной степени ограничены [4]. Ниже даны результаты решения нескольких задач о продольном нагружении возрастающей нагрузкой шарнирно-опертого стержня, которые позволяют более наглядно подойти к рассмотрению данного вопроса.

Вопросы, касающиеся поведения стержня после появления в нем пластических деформаций, в данной статье не рассматриваются. С особенностями поведения стержней в такого рода случаях, в том числе применительно к железобетонным колоннам, вязкоупругим материалам, а также при действии быстронарастающих и ударных нагрузок, можно познакомиться по многочисленным источникам как обзорного, так и более узкого характера в отечественной и зарубежной литературе [1, 2, 11–20].

2 Постановка и решение задачи, обсуждение результатов

2.1. Несовпадение продольных усилий с направлением оси крепления может соответствовать схемам, приведенным на рисунке 1, на котором показаны также и использованные далее при выводе уравнений расчетные схемы. Схемы 1 и 2 рассмотрены в [1, 3] при условии совпадения величин эксцентриситетов на опорах.

кривизны χ по отношению к исходной $\chi_{исх}$, в связи с чем дифференциальное уравнение изогнутой оси имеет вид

$$w'' - w_{исх}'' = -M(x)/EJ_z,$$

откуда, приняв для $w_{исх}$ синусоидальный закон $w_{исх} = w_0 \sin(nx)$, где $n = \pi m/L$, $m=1,2,3,\dots$, удовлетворяющий условиям шарнирного крепления, получаем

$$W'' + K^2 W = -N^2 W_0 \sin(Nx). \quad (3)$$

Схемы “1–3” можно свести к общему виду, приняв, что в схеме “2” эксцентриситеты на левой и правой опорах составляют $e_1 = \alpha_1 e$ и $e_2 = \alpha_2 e$ (далее $\alpha_2 = 1, -1 \leq \alpha_1 \leq 1$). В этом случае зависимости для перемещения и момента вдоль оси X получают вид:

где через W_z обозначен момент сопротивления сечения, а функции $F(\gamma)$ равны:

$$F(\gamma) = (-\alpha_1 \sin(kL - kx_M) + \alpha_2 \sin(kx_M)) / \sin(kL) \quad \text{– для случаев 1–3}$$

$$F(\gamma) = \frac{1}{1 - \gamma^2} \left(-\frac{\sin(nL)}{\sin(kL)} \sin(kx_M) + \sin(nx_M) \right) \quad \text{– для случая 4.} \quad (7)$$

Первое слагаемое в скобках выражений (6) отражает роль сжатия, второе – изгиба, знаки “+” и “–” относятся к сжатым и растянутым волокнам соответственно.

Входящие в (6) множители eA/W_z и $w_0 A/W_z$ можно выразить в виде отношения e/h и w_0/h (для прямоугольника $eA/W_z = 6e/h$, для круга $eA/W_z = 8e/d$, аналогично для $w_0 A/W_z$), что является более наглядным и сразу позволяет сделать вывод, что для стержня с сечением в виде круга влияние изгибного слагаемого в (6) сказывается сильнее.

2.2. Далее для сравнения рассматриваются прямоугольное (ширина b и высота h) и круглое (диаметр d) сечения с размерами $b = h = d = 1$ см при двух длинах стержней ($L = 100$ и $L = 100/3$ см).

Приведенные ниже расчетные данные показывают, что вступление материала в состояние текучести может достигаться при нагрузке P_T значительно ниже критической $P_{кр}$. Для материала с одинаковыми уровнями деформаций текучести при растяжении и сжатии $\varepsilon_{TR} = \varepsilon_{TC}$ текучесть, естественно, первоначально всегда появится в сжатых волокнах, но при $\varepsilon_{TR} < \varepsilon_{TC}$ может иметь место и противоположный результат, учитывая тем более, что с ростом гибкости стержня критическая деформация $\varepsilon_{кр}$ падает, а роль изгибного слагаемого увеличивается.

В таблицах 1–5 приведены расчетные данные для стержней длиной $L = 100/3$ см прямоугольного и кругового сечений, для которых значения гибкости, критических деформаций и сил соответственно равны $\lambda = 115.47$ и $\lambda = 133.33$, $\varepsilon_{кр} = 0.7402e-3$ и $\varepsilon_{кр} = 0.5552e-3$, $P_{кр} = 14804.4$ Н и $P_{кр} = 8720.5$ Н (для случая 4 принято $m=1$).

В таблицах 1–3 через дробь указаны значения относительной критической силы $\gamma_T = P_T/P_{кр}$, при которых в стержнях достигается предел текучести материала. Случаям, когда для выбранной геометрии при $\gamma \leq 1$ текучесть не достигается, соответствуют прочерки в таблице. Из таблиц видно, что уровни γ_T монотонно снижаются с ростом e и w_0 , перемещения и углы растут, уровни γ_{TC} , определенные для сжатых волокон, ниже, чем для растянутых γ_{TR} . На рисунке 2 данные таблицы 1, 2 проиллюстрированы графиками. Видна близость результатов по схемам 1 и 4.

В таблицах 4–5 также через дробь указаны значения максимальных прогибов W_{max} и производной $W' = dw/dx$ в точке $x = 0$ при достижении предела текучести в сжатом поверхностном слое сечения. Поскольку $b = h = d = 1$ см, то отношение W_{max}/h численно равно значению W_{max} , и из таблиц видно, что для случаев 1–3 оно не превышает значения 0.23, $W_{max}/L \leq 0.007$, а значение $W' \leq 0.025$. Для случая 4 перемещения и углы поворота выше, чем для случаев 1–3: для $w_0 = 0.5$ имеем $W_{max}/h \leq 0.7$, $W_{max}/L \leq 0.02$, $W' \leq 0.07$.

В качестве примера на рисунке 3 (по исходным данным таблицы 2, случай 3) показаны графики изменения отношения $\varepsilon_T/\varepsilon_{кр}$ в зависимости от уровня нагрузки при эксцентриситетах $e=0.1$ и $e=0.3$. Верхние кривые соответствуют сжатию, нижние – растяжению.

Аналогичные по тенденциям результаты при тех же уровнях $\varepsilon_{TC} = 1.0e-3$ и $\varepsilon_{TR} = 0.8e-3$ имеют место для более гибкого стержня длиной $L = 100$ см, которой для прямоугольной и круговой форм сечения отвечают значения $\lambda = 346.41$, $\varepsilon_{кр} = 0.0822e-3$ и $\lambda = 400.00$, $\varepsilon_{кр} = 0.0617e-3$. Но в этом случае в отличие от предыдущих результатов возникновение первоначальной текучести происходит на растянутых, а не сжатых волокнах, что свидетельствует о возрастании опасности выхода конструкции из строя. Не приводя данные по всем ячейкам таблиц, укажем для примера в том же формате результаты расчета γ_T для прямоугольного сечения при $e = w_0 = 0.20$: схема 1 – 0.8837/0.8774, схема 2 – текучесть не достигается, схема 3 – 0.9371/0.9341, схема 4 – 0.9037/0.8985. При этом максимальные расчетные перемещения для $e = w_0 = 0.02 \div 0.50$ лежат в пределах 3.8–5.1 см, что заметно выше данных таблиц 4–5. Отношение W_{max}/L не превышает 5.0e-2.

Таблица 1 – Прямоугольник, $\lambda = 115.47$; $\varepsilon_{кр} = 0.7402e-3$; $\varepsilon_{TC} = \varepsilon_{TR} = 1.0e-3$

№	Уровни несовершенства $e=w_0$, см. Относительная нагрузка γ_{TC}/γ_{TR}					
	$e=w_0=0.02$	$e=w_0=0.10$	$e=w_0=0.20$	$e=w_0=0.30$	$e=w_0=0.40$	$e=w_0=0.50$
1	0.7936/0.9381	0.5421/0.7451	0.4146/0.5841	0.3411/0.4756	0.2916/0.3986	0.2556/0.3426
2	-/-	0.8416/-	0.5916/-	0.4376/-	0.3341/0.9641	0.2611/0.6216
3	0.8671/0.9686	0.6546/0.8561	0.5246/0.7401	0.4406/0.6441	0.3786/0.5631	0.3306/0.4941
4	0.8166/0.9506	0.5666/0.7801	0.4336/0.6216	0.3561/0.5081	0.3036/0.4251	0.2656/0.3636

Таблица 2 – Прямоугольник, $\lambda = 115.47$; $\varepsilon_{кр} = 0.7402e-3$; $\varepsilon_{TC} = 1.0e-3$; $\varepsilon_{TR} = 0.8e-3$

№	Уровни несовершенства $e=w_0$, см. Относительная нагрузка γ_{TC}/γ_{TR}					
	$e=w_0=0.02$	$e=w_0=0.10$	$e=w_0=0.20$	$e=w_0=0.30$	$e=w_0=0.40$	$e=w_0=0.50$
1	0.7936/0.9306	0.5423/0.7162	0.4144/0.5432	0.3411/0.4313	0.2918/0.3549	0.2558/0.3001
2	-/-	0.8416/-	0.5916/-	0.4374/-	0.3341/0.7411	0.2613/0.4343
3	0.8669/0.9643	0.6547/0.8383	0.5246/0.7094	0.4404/0.6035	0.3787/0.5153	0.3307/0.4413
4	0.8166/0.9441	0.5666/0.7535	0.4333/0.5806	0.3560/0.4614	0.3038/0.3780	0.2657/0.3180

Таблица 3 – Круг, $\lambda = 133.33$; $\varepsilon_{кр} = 0.5552e-3$; $\varepsilon_{TC} = 1.0e-3$; $\varepsilon_{TR} = 0.8e-3$

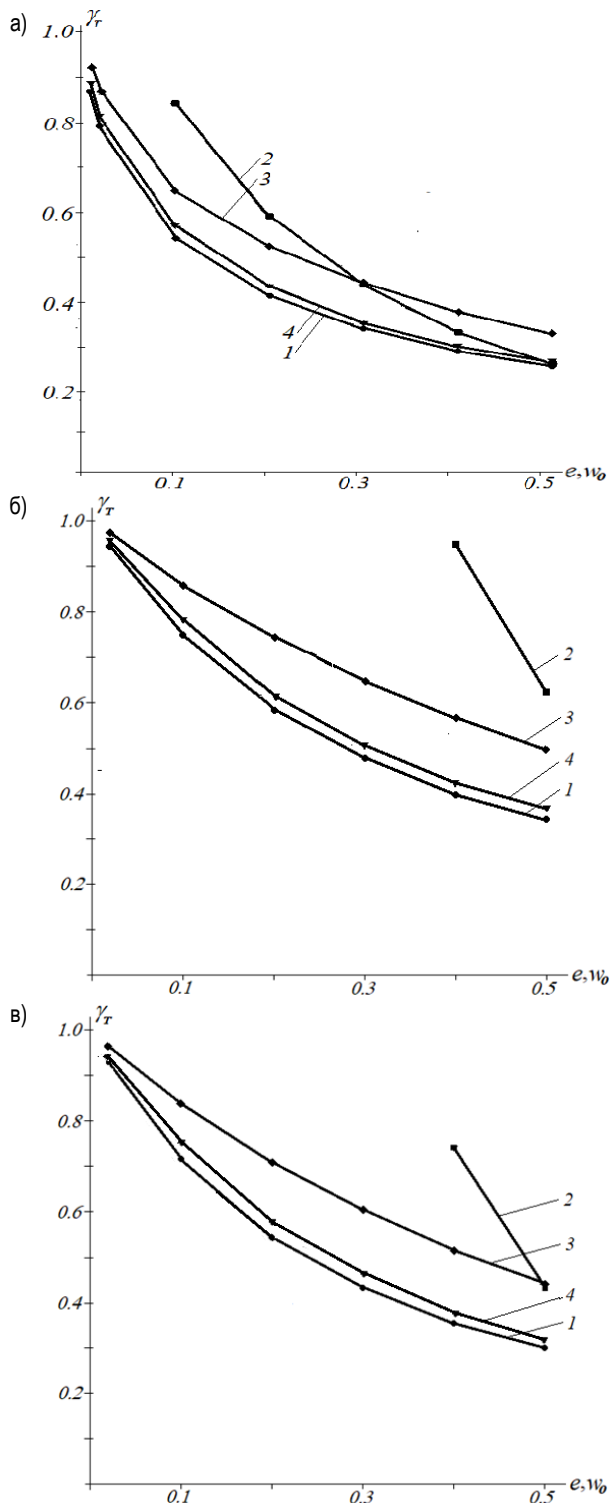
№	Уровни несовершенства $e=w_0$, см. Относительная нагрузка γ_{TC}/γ_{TR}					
	$e=w_0=0.02$	$e=w_0=0.10$	$e=w_0=0.20$	$e=w_0=0.30$	$e=w_0=0.40$	$e=w_0=0.50$
1	0.8322/0.9220	0.5727/0.6933	0.4351/0.5200	0.3563/0.4119	0.3035/0.3393	0.2651/0.2876
2	-/-	0.9999/-	0.6760/-	0.4871/-	0.3648/0.5964	0.2812/0.3694
3	0.9004/0.9597	0.6938/0.8212	0.5570/0.6849	0.4666/0.4619	0.4003/0.4888	0.3486/0.4167
4	0.8553/0.9370	0.6002/0.7308	0.4566/0.5551	0.3731/0.4393	0.3169/0.3601	0.2760/0.3037

Таблица 4 – Прямоугольник, $\lambda = 115.47$; $\varepsilon_{кр} = 0.7402e-3$; $\varepsilon_{TC} = \varepsilon_{TR} = 1.0e-3$

№	Уровни несовершенства $e=w_0$, см. Перемещения / повороты					
	$e=w_0=0.02$	$e=w_0=0.10$	$e=w_0=0.20$	$e=w_0=0.30$	$e=w_0=0.40$	$e=w_0=0.50$
1	0.0972/0.0097	0.1484/0.0158	0.1769/0.0194	0.1935/0.0216	0.2049/0.0231	0.2134/0.0242
2	-/-	0.0168/0.0049	0.0219/0.0065	0.0233/0.0070	0.0231/0.0069	0.0221/0.0067
3	0.0827/0.0076	0.1197/0.0105	0.1393/0.0119	0.1491/0.0126	0.1538/0.0128	0.1559/0.0129
4	0.1091/0.0103	0.2307/0.0217	0.3528/0.0333	0.4659/0.0439	0.5744/0.0541	0.6808/0.0642

Таблица 5 – Круг, $\lambda = 133.33$; $\varepsilon_{кр} = 0.5552e-3$; $\varepsilon_{TC} = \varepsilon_{TR} = 1.0e-3$

№	Уровни несовершенства $e=w_0$, см. Перемещения / повороты					
	$e=w_0=0.02$	$e=w_0=0.10$	$e=w_0=0.20$	$e=w_0=0.30$	$e=w_0=0.40$	$e=w_0=0.50$
1	0.1256/0.0124	0.1682/0.0158	0.1925/0.0210	0.2070/0.0230	0.2169/0.0244	0.2242/0.0254
2	-/-	0.0210/0.0060	0.0257/0.0076	0.0263/0.0079	0.0254/0.0077	0.0239/0.0073
3	0.1148/0.0106	0.1432/0.0127	0.1586/0.0137	0.1656/0.0140	0.1685/0.0141	0.1689/0.0140
4	0.1382/0.0130	0.2501/0.0236	0.3681/0.0347	0.4785/0.0451	0.5856/0.0552	0.6906/0.0651



“а” – сжатые волокна (таблица 1), “б”, “в” – растянутые волокна (таблица 1, 2)

Рисунок 2 – Зависимости γ_r от уровня эксцентриситета e и исходной погиби w_0

Для материалов, у которых предел текучести на растяжение σ_{TP} значительно ниже предела текучести на сжатие σ_{TC} (например, высокопрочный бетон), уровень γ_{TP} может оказаться меньше γ_{TC} даже при невысоких значениях λ . Например, при $\varepsilon_{TP} = 0.1\varepsilon_{TC}$ для короткого стержня ($L = 100/3$ см) это становится возможным уже при $e/d = 0.024$ для круглого и $e/h = 0.069$ для прямоугольного сечений при небольших уровнях перемещений.

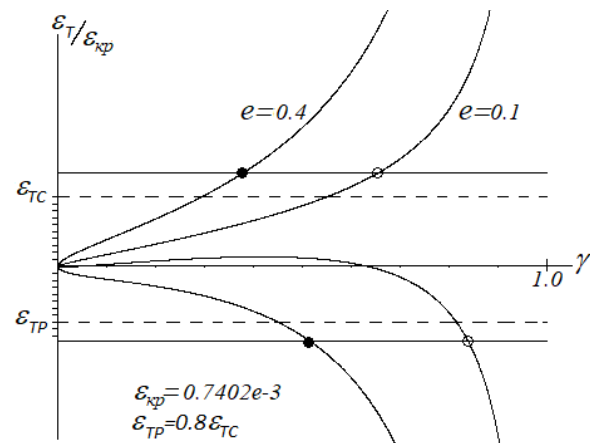


Рисунок 3 – Деформация поверхностных слоев стержня в зависимости от нагрузки

Зависимости (6) можно применить и для случая несимметрично-го сечения, учтя в расчетах отличие моментов сопротивления для сжатых и растянутых волокон.

Естественно, что при выборе исходной погиби стержня вместо полусинусоиды в иной подходящей условиям закрепления форме, например параболы, результаты расчетов не могут существенно отличаться от приведенных выше.

Ввиду линейности постановки задачи совместное присутствие в ее условиях и эксцентриситета e и начальной погиби $w_{исх}$ влияет только на уровни γ_r , не внося особенностей в решение и соответствующие выводы. При этом простое суммирование результатов не имеет места в связи с различием положения точек максимального момента на оси стержня для случаев 1–4.

Указанные в таблицах 4–5 результаты показывают, что по крайней мере для рассмотренных исходных числовых данных расчетные значения W_{max}/h и W_0^2 таковы, что укладываются в принятые ограничения технической теории изгиба стержней, поэтому, не прибегая к рассмотрению задачи в нелинейной постановке, можно, исходя из физически обусловленного критерия $\gamma = \gamma_r$, использовать результаты линейной теории для практических расчетов допустимых усилий продольного сжатия, корректируемых далее соответствующими коэффициентами безопасности. При этом следует иметь в виду, что учет динамичности конструкции может внести свои изменения, например, при нагружении силой, возрастающей с постоянной скоростью, переход напряжений через предел текучести возникает при нагрузках более низких, чем это ожидается при статическом подходе [13, 14].

2.3. Выше рассматривалась система с исходной погибью стержня между опорами в виде полуволны синусоиды $w_{исх} = w_0 \sin(n_1 x)$, что автоматически удовлетворяло условию шарнирного закрепления концов. Однако несовершенство стержня может проявиться также через отличие фактической длины полуволны синусоиды L_1 от наперед заданного расстояния между опорами L (рисунок 4).

В этом случае $w_{исх} = w_0 \sin(n_1 x)$, $w_{исх}(L) \neq 0$, $n_1 = \pi/L_1 = \pi\Psi/L$, $\Psi = L/L_1$. Если на изогнутом стержне взять отрезок длиной L и, повернув его на угол α , установить на прежних опорах, то его кривизна относительно оси X изменится, приняв вид

$$w_{исх}'' = -w_0 n_1^2 \sin(n_1 x) / (w_0 n_1 \sin \alpha \cos(n_1 x) + \cos \alpha)^3,$$

где $\alpha = \arcsin(w_0 \sin(n_1 \Psi)/L)$. Для рассматриваемых в задаче числовых данных первое слагаемое в знаменателе имеет величину не более 0.001 и потому сам знаменатель незначительно отличается от постоянной величины $\cos^3(\alpha) \approx 1$. Включив ее в значение w_0 , получаем для кривизны $w_{исх}''$ выражение, по форме совпадающее с использованным ранее.

При этом зависимость $w(x)$ для прогиба оси вместо (7) запишется в виде

$$w(x) = w_0 \frac{\psi^2}{\psi^2 - \gamma} \left(-\frac{\sin(n_1 L)}{\sin(kL)} \sin(kx) + \sin(n_1 x) \right), \quad n_1 L = \pi \Psi$$

и на первый взгляд указывает на возможность появления бесконечных перемещений при $\gamma = \psi^2$, что с учетом $M(x) = P_{\text{ф}} \gamma w(x)$

при значении $\psi < 1$ соответствовало бы появлению критической нагрузки ниже эйлеровой. Это, однако, не имеет места, поскольку предел выражения $w(x)$ равен бесконечности только при $\gamma = \psi^2 = 1$. Расчеты показывают, что данный вид несовершенства сравнительно со случаем $\psi = 1$ при одинаковых значениях w_0 увеличивает уровень γ_T для $\psi < 1$ и уменьшает его для $\psi > 1$, в связи с тем, что для таким образом установленных стержней максималь-

ное отклонение точек от оси нагружения и их кривизна в случае $\psi > 1$ выше, чем при $\psi < 1$. В случае $\psi > 1$ на стержне также имеет место наличие участков с кривизной противоположных знаков. В качестве примера приведем данные для стержня прямоугольного сечения при $L = 100/3$ и $\varepsilon_{TC} = \varepsilon_{TP} = 1.0 \cdot 10^{-3}$:

$\psi = 0.9 - \gamma_{TC}/\gamma_{TP} = 0.4681 / 0.6681$; $\psi = 1.0 - \gamma_{TC}/\gamma_{TP} = 0.4336 / 0.6221$; $\psi = 1.1 - \gamma_{TC}/\gamma_{TP} = 0.4081 / 0.5866$.

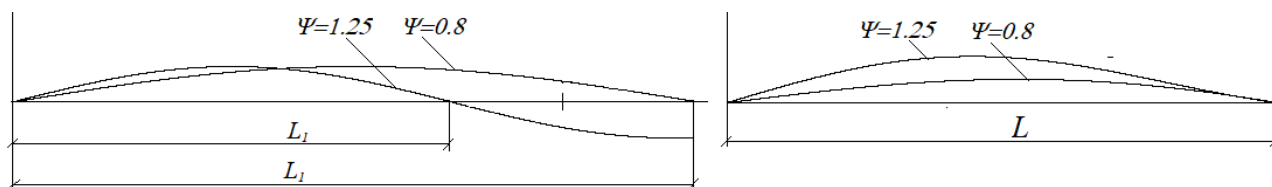


Рисунок 4 – Стержни с разной формой исходной погиби

2.4. Характерной особенностью рассмотренных выше задач является приложение продольной нагрузки в определенных фиксированных на стержне точках. Вместе с тем вполне реально предположить, что точка приложения нагрузки с ее ростом может смещаться относительно тела стержня. Например, это будет иметь место при нагружении стержня прямоугольного сечения с исходной погибью и плоским торцом через деформируемую прокладку между стержнем и силовозбудителем (рисунок 5). Примем, что ее модуль упругости $E_n = \omega E$ составляет некоторую долю ω от модуля E , толщина равна t_0 , из возникающих в ней при деформации напряжений учитываются только нормальные, направленные вдоль оси X (т. е. прокладка эквивалентна набору независимых параллельных пружин). Локальная податливость материала стержня в зоне нагружения не учитывается.

При движении контактной поверхности прокладки на расстояние s и сопутствующего поворота стержня от начального угла α_0 до текущего значения α максимальное обжатие материала прокладки составит $s+u$, соответствующее напряжение $\sigma = E_n(s+u)/t_0$. Характер эпюр напряжений в зависимости от величины смещения s показан на рисунке 5.

Для эпюры треугольной формы равнодействующая сила P и ее эксцентриситет e_s относительно опорной точки описываются выражениями

$$P = \frac{E_n b}{2t_0} \left(s + \frac{h}{2} (\sin \alpha - \sin \alpha_0) \right)^2 \left(Tg \alpha - \frac{1}{Tg \alpha} \right),$$

$$M(x) = P \frac{A}{W_z} \left(e_s \sin(kx) / \sin(kL) + w_0 \frac{n^2}{n^2 - k^2} \left(\frac{\sin(nL)}{\sin(kL)} \sin(kx) - \sin(nx) \right) \right)$$

$$w(x) = e_s \left(\sin(kx) / \sin(kL) - \frac{kx}{kL} \right) + w_0 \frac{n^2}{n^2 - k^2} \left(-\frac{\sin(nL)}{\sin(kL)} \sin(kx) + \sin(nx) \right).$$

С использованием уравнения типа (6) можно определить величину относительной нагрузки γ_T , при которой в сжимаемом стержне появляются неупругие деформации.

В данной задаче имеет место совместное и взаимозависимое действие исходной погиби стержня и эксцентриситета приложения нагрузки. На начальном этапе нагружения эксцентриситет всегда

$$e_s = \frac{h}{2} \cos \alpha + \frac{1}{3} \left(s + \frac{h}{2} (\sin \alpha - \sin \alpha_0) \right) \left(Tg \alpha - \frac{1}{Tg \alpha} \right),$$

для второй эпюры выражения не приводятся ввиду их громоздкости. При вычислениях значения e_s использовались по данным с предыдущего шага по s . Расчетная схема задачи соответствует случаю 3 на рисунке 1.

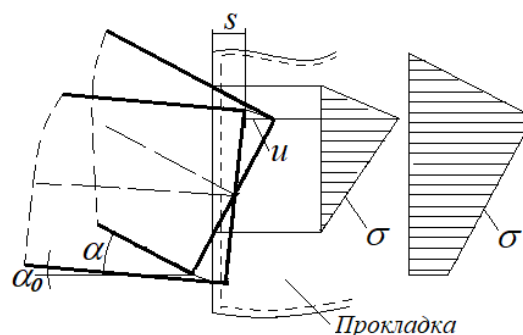


Рисунок 5 – Схема нагружения стержня через торцевую прокладку

Изгибающий момент в сечениях стержня и его прогиб имеют вид:

понижается, но с ростом силы P при малых значениях параметра ω равнодействующая может оказаться приложенной и на боковой поверхности стержня. В таблице 6 в зависимости от величины ω указаны значения γ_{TC} и соответствующего этому уровню нагрузки эксцентриситета e_s при начальной погиби стержня $w_0 = 0.5$ см.

Таблица 6 – Прямоугольник, $\lambda = 115.47$; $\varepsilon_{TP} = 0.7402 \cdot 10^{-3}$; $\varepsilon_{TC} = \varepsilon_{TP} = 1.0 \cdot 10^{-3}$; $w_0 = 0.5$

	Параметр жесткости ω						
	$\omega = 0.001$	$\omega = 0.005$	$\omega = 0.0075$	$\omega = 0.01$	$\omega = 0.05$	$\omega = 0.1$	$\omega = 1.0$
γ_{TC}	0.106	0.288	0.338	0.352	0.346	0.345	0.343
e_s	1.955	0.617	0.498	0.472	0.483	0.486	0.490

Из таблицы видно, что допустимая нагрузка γ_T при мягкой прокладке заметно снижается, эксцентриситет приложения нагрузки в зависимости от ω проходит через некоторый минимум. В целом результаты расчетов соответствуют предыдущим схемам.

3 Заключение

Рассмотрено поведение упругого шарнирно-опертого стержня с гибкостью выше критической при продольном нагружении в условиях наличия различных геометрических несовершенств стержня и приложения нагрузки. Результаты расчетов показывают, что работоспособность стержня может нарушаться при нагрузке ниже критической, причем переход материала в пластическое состояние может произойти

Машиностроение

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-136-1-110-115>

первоначально как в сжатой, так и растянутой зоне сечения в зависимости от соотношения величин пределов текучести на сжатие и растяжение. С ростом отклонений от идеализированного случая допустимые нагрузки монотонно уменьшаются. Для реальных уровней несовершенств ограничение на действующие нагрузки можно задавать по результатам решения задачи в линейном приближении, не выходя за рамки принятых предположений сопротивления материалов.

Большое различие в уровнях η при фактически трудно контролируемых параметрах несовершенств определяет значительный разброс экспериментальных данных по критическим нагрузкам и подчеркивает сложный статистический характер результатов испытаний.

Список цитированных источников

1. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 986 с.
2. Болотин, В. В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости / В. В. Болотин. – М.: Наука, Физматгиз, 1961. – 339 с.
3. Пановко, Я. Г. Устойчивость и колебания упругих систем. Современные концепции, парадоксы и ошибки / Я. Г. Пановко, И. И. Губанова. – М.: Наука, 1967. – 420 с.
4. Тимошенко, С. П. Сопротивление материалов / С. П. Тимошенко. – М.: Наука, 1965. – Т. 1. – 364 с.
5. Тимошенко, С. П. Сопротивление материалов / С. П. Тимошенко. – М.: Наука, 1965. – Т. 2. – 480 с.
6. Основы современных методов расчета на прочность в машиностроении / С. Д. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев [и др.]. – М.: Mashgiz, 1952. – Т. 2. – 862 с.
7. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М.: Наука, 1986. – 514 с.
8. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1978. – 744 с.
9. Курс сопротивления материалов : в 2 ч. / М. М. Филоненко-Бородич, С. М. Изюмов, Б. А. Олисов [и др.]. – М.: ГИТТЛ, 1956. – Ч. I. – 644 с.
10. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – М.: Наука, 1965. – 856 с.
11. Снитко, Н. К. Устойчивость стержневых систем в упруго-пластической области / Н. К. Снитко. – Л.: Изд-во литературы по строительству, 1968. – 247 с.
12. Shanley, F. R. Inelastic column theory / F. R. Shanley // Journal of the Aeronautical Science. – 1947. – Vol. 14, № 5. – P. 261–268. – DOI: 10.2514/8.1346.
13. Холодарь, Б. Г. Описание процесса потери устойчивости прямого упругого стержня / Б. Г. Холодарь // Строительная механика и расчет сооружений. – 2019. – № 2. – С. 30–35.
14. Холодарь, Б. Г. Потеря устойчивости стержня как задача динамики продольно-поперечного изгиба / Б. Г. Холодарь // III Международная научно-техническая конференция «Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР)», Брест, 29–30 марта 2019 г. Сборник статей. – Брест: БрГТУ, 2019. – С. 109–112.
15. Buckling problem for a rod longitudinally compressed by a force smaller than the Euler critical force / A. K. Belyaev, N. F. Morozov, P. E. Tovstik, T. P. Tovstik // Mechanics of Solids. – 2016. – Vol. 51. – P. 263–272. – DOI: 10.3103/S0025654416030031.
16. Brzuz, A. Stability analysis of steel compression members under shock loads / A. Brzuz, G. Bak // Bulletin of the Military University of Technology. – 2018. – Vol. 67. – P. 107–125. – DOI: 10.5604/01.3001.0011.8051.
17. Xiaochun Zhang. Study on Stability of Elastic Compression Bending Bar in Viscoelastic Medium / Zhang Xiaochun, Hu Jianhan, Chen Shuyang // Appl. Sci. – 2023. – Vol. 13. – P. 11111. – DOI: 10.3390/app131911111.
18. Dhakal, R. P. Determination of Buckling Length of Reinforcing Bars Based on Stability Analysis / R. P. Dhakal, K. Maekawa // Transactions of the Japan Concrete Institute. – 2000. – Vol. 22 (3). – P. 73–79.
19. Kashani, M. M. Inelastic buckling of reinforcing bars: A state-of-the-art review of existing models and opportunities for future research / M. M. Kashani // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 411. – P. 134634. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134634.
20. Cosenza, E. Experimental behaviour and numerical modelling of smooth steel bars under compression / E. Cosenza, A. Prota // Journal of Earthquake Engineering. – 2006. – Vol. 10 (3). – P. 313–329. – DOI: 10.1080/13632460609350599.

References

1. Vol'mir, A. S. Ustoichivost' deformiruemykh sistem / A. S. Vol'mir. – M.: Nauka, 1967. – 986 s.
2. Bolotin, V. V. Nekonservativnye zadachi teorii uprugoy ustoichivosti / V. V. Bolotin. – M.: Nauka, Fizmatgiz, 1961. – 339 s.
3. Panovko, YA. G. Ustoichivost' i kolebaniya uprugih sistem. Sovremennye koncepcii, paradoksy i oshibki / YA. G. Panovko, I. I. Gubanova. – M.: Nauka, 1967. – 420 s.
4. Timoshenko, S. P. Soprotivlenie materialov / S. P. Timoshenko. – M.: Nauka, 1965. – T. 1. – 364 s.
5. Timoshenko, S. P. Soprotivlenie materialov / S. P. Timoshenko. – M.: Nauka, 1965. – T. 2. – 480 s.
6. Osnovy sovremennykh metodov rascheta na prochnost' v mashinostroenii / S. D. Ponomarev, V. L. Biderman, K. K. Liharev [i dr.]. – M.: Mashgiz, 1952. – T. 2. – 862 s.
7. Feodos'ev, V. I. Soprotivlenie materialov / V. I. Feodos'ev. – M.: Nauka, 1986. – 514 s.
8. Rabotnov, YU. N. Mekhanika deformiruемого твердого тела / YU. N. Rabotnov. – M.: Nauka, 1978. – 744 s.
9. Kurs soprotivleniya materialov : v 2 ch. / M. M. Filonenko-Borodich, S. M. Izumov, B. A. Olisov [i dr.]. – M.: GITTL, 1956. – CH. I. – 644 s.
10. Belyaev, N.M. Soprotivlenie materialov / N. M. Belyaev. – M.: Nauka, 1965. – 856 s.
11. Snitko, N. K. Ustoichivost' stержnevyyh sistem v uprugoplasticheskoy oblasti / N. K. Snitko. – L.: Izd-vo literatury po stroitel'stvu, 1968. – 247 s.
12. Shanley, F. R. Inelastic column theory / F. R. Shanley // Journal of the Aeronautical Science. – 1947. – Vol. 14, № 5. – P. 261–268. – DOI: 10.2514/8.1346.
13. Holodar', B. G. Opisanie processa poteri ustoichivosti pryamogo uprugogo stержnya / B. G. Holodar' // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij. – 2019. – № 2. – S. 30–35.
14. Holodar', B. G. Poterya ustoichivosti stержnya kak zadacha dinamiki prodol'no-poperechnogo izgiba / B. G. Holodar' // III Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya "Teoriya i praktika issledovaniy i proektirovaniya v stroitel'stve s primeneniem sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya (SAPR)", Brest, 29–30 marta 2019 g. Sbornik statej. – Brest: BrGTU, 2019. – S. 109–112.
15. Buckling problem for a rod longitudinally compressed by a force smaller than the Euler critical force / A. K. Belyaev, N. F. Morozov, P. E. Tovstik, T. P. Tovstik // Mechanics of Solids. – 2016. – Vol. 51. – P. 263–272. – DOI: 10.3103/S0025654416030031.
16. Brzuz, A. Stability analysis of steel compression members under shock loads / A. Brzuz, G. Bak // Bulletin of the Military University of Technology. – 2018. – Vol. 67. – P. 107–125. – DOI: 10.5604/01.3001.0011.8051.
17. Xiaochun Zhang. Study on Stability of Elastic Compression Bending Bar in Viscoelastic Medium / Zhang Xiaochun, Hu Jianhan, Chen Shuyang // Appl. Sci. – 2023. – Vol. 13. – P. 11111. – DOI: 10.3390/app131911111.
18. Dhakal, R. P. Determination of Buckling Length of Reinforcing Bars Based on Stability Analysis / R. P. Dhakal, K. Maekawa // Transactions of the Japan Concrete Institute. – 2000. – Vol. 22 (3). – P. 73–79.
19. Kashani, M. M. Inelastic buckling of reinforcing bars: A state-of-the-art review of existing models and opportunities for future research / M. M. Kashani // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 411. – P. 134634. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134634.
20. Cosenza, E. Experimental behaviour and numerical modelling of smooth steel bars under compression / E. Cosenza, A. Prota // Journal of Earthquake Engineering. – 2006. – Vol. 10 (3). – P. 313–329. – DOI: 10.1080/13632460609350599.

Материал поступил 10.01.2025, одобрен 28.02.2025, принят к публикации 28.02.2025

UDC 69.05:658.512.6

ANTHROPOGENIC IMPACT ON THE RIVERS OF THE BELARUSIAN POLESIE (USING THE LAN RIVER AS AN EXAMPLE)

A. A. Volchak¹, S. I. Parfomuk², S. V. Sidak³

¹ Doctor of Geographical Sciences, Professor, Professor of the Department of Environmental Management, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: volchak@tut.by

² Ph.D, Associate Professor, Head of the Department of Mathematics and Informatics, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: parfom@mail.ru

³ Senior Lecturer of the Department of Mathematics and Informatics, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: harchik-sveta@mail.ru

Abstract

The work is devoted to assessing changes in the water regime of the Lan River in modern conditions and the near future with the aim of developing a strategy for the rational use of the water potential of small rivers in the Belarusian Polesie region. There was a tendency towards an increase in annual runoff at the Loktyshi and Mokrovo gauging stations during the study period from 1948 to 2015, which was caused by anthropogenic factors in the form of amelioration measures; and in the upper reaches of the river at the Lognovichi gauging station there was a slight decrease in runoff caused by climatic influences. Testing the hypothesis about the homogeneity of the runoff series under consideration for periods with different averaging intervals has showed heterogeneity for some types of runoff. This was caused by intensive economic activity, which significantly disrupts the natural hydrological regime. A runoff forecast was made for the Lan River at the Mokrovo gauging station for the period up to 2035 based on archive of meteorological data using a multi-model ensemble of four CMIP5 scenarios. A slight decrease in runoff was predicted, caused by additional evaporation from the water surface of the reservoir due to increased air temperature, as well as a slight shift in the peak of the spring flood to March.

Keywords: runoff, anthropogenic factors, climate changes, forecast, Lan River, Belarusian Polesie.

АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РЕКИ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ЛАНЬ)

А. А. Волчек, С. И. Парфомук, С. В. Сидак

Реферат

Работа посвящена оценке изменений водного режима реки Лань в современных условиях и на ближайшую перспективу с целью разработки стратегии рационального использования водного потенциала малых рек Белорусского Полесья. За исследуемый период с 1948 по 2015 г. на гидропостах Локтыши и Мокрово наблюдалась тенденция к увеличению годового стока, что было обусловлено антропогенными факторами в виде проведения мелиоративных мероприятий, а в верховьях реки на гидропосте Логновичи наблюдалось некоторое уменьшение стока, вызванное климатическими воздействиями. Проверка гипотезы об однородности рассматриваемых рядов стока для периодов с различными интервалами осреднения показала неоднородность по некоторым типам стока. Это обусловлено интенсивной хозяйственной деятельностью, которая существенно нарушает естественный гидрологический режим. На основе архива метеорологических данных с использованием многомодельного ансамбля из четырех сценариев CMIP5 выполнен прогноз стока реки Лань в створе Мокрово на период до 2035 г. Прогнозируется незначительное уменьшение стока, вызванное дополнительным испарением с водной поверхности водохранилища из-за повышения температуры воздуха, а также небольшим смещением пика весеннего половодья на март.

Ключевые слова: сток, антропогенные факторы, изменения климата, прогноз, река Лань, Белорусское Полесье.

Introduction

The nature of fluctuations in water resources is determined by climatic factors, but starting from the second half of the 20th century, the role of the anthropogenic component in a number of cases becomes comparable to natural influences. Thus, it can be stated that the end of the 20th – beginning of the 21st century is characterized by pronounced climate variability and an increase in anthropogenic impact on water resources [1–4]. Natural causes determine the spatiotemporal fluctuations of water resources depending on differences in its physical and geographical conditions, as well as under the influence of the annual and secular course of climatic conditions affecting the formation of water resources. Intra-annual fluctuations occur constantly and consistently. The main feature of natural causes is that the changes that occur do not have a one-sided tendency [5–7].

Anthropogenic causes are the result of various types of human activities. They affect water resources and water quality relatively quickly and unilaterally, which is their main difference from natural causes [8, 9]. The types of economic activities that cause changes in the quantitative and qualitative characteristics of water resources are very diverse and depend on the physical and geographical conditions of the territory, the characteristics of its water regime and the nature of its use [10, 11].

The increased unevenness of precipitation and rising air temperatures in the territory of the Belarusian Polesie in recent decades have led to an increase in the frequency of drought events. In recent years, there

have been numerous cases of shallowing, pollution and disappearance of small rivers under the influence of anthropogenic factors, which have recently been aggravated by modern climate change [12].

The listed climatic and anthropogenic factors have a huge impact on the formation of the river runoff of the Belarusian Polesie, therefore the main goal of this work was to assess changes in the flow regime of the Lan River in modern conditions and in the near future. Such an assessment will allow us to gain an understanding of the processes on the small rivers of the Belarusian Polesie and develop a scientifically based strategy for the conservation and rational use of the water potential of the small rivers in the region.

Materials and methods

The Belarusian Polesie is a unique natural site, with numerous small rivers and lakes, located in the south of Belarus and covers an area of about 61 thousand km², which is approximately a third of the country's territory. The length of the region's territory from west to east is about 500 km, from north to south – about 200 km. Small rivers of the Belarusian Polesie are very sensitive to changes in natural factors and anthropogenic impacts and are most vulnerable, unlike medium and large rivers.

The climate of the Belarusian Polesie is determined by its geographical location in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere. The amount and nature of the distribution of atmospheric precipitation over the territory of are determined by a number of factors, the main of which are the charac-

teristics of atmospheric circulation and the terrain. On average, 600–650 mm of precipitation falls annually in Polesie. Deviations from long-term average values are often observed. In wet years, up to 800 mm of precipitation falls, in dry years it is about 500 mm. The study area is characterized by high air humidity throughout the year, which is due to the predominance of temperate sea air from the Atlantic Ocean, relatively low temperatures in the warm season, and vast areas occupied by wetland complexes and forests. Average annual air temperature within the territory of the Belarusian Polesie for the period 1988–2015 increased by 1.3 °C compared to the period 1945–1987 and amounted to 7.8 °C.

The Lan River is a typical river of Belarusian Polesie and the left tributary of the Pripyat River (Figure 1). The length of the Lan River is 147 km, the catchment area is 2190 km², the average annual water flow at the mouth is about 11.3 m³/s [13]. The floodplain is 0.6–1 km wide and is crossed by irrigation canals. The riverbed is canalized. The depth range in the river is 1.5–2.5 m. The width of the channel is 4–8 m, in the lower reaches 15–20 m. Small slopes of the channel and wide floodplains create favorable conditions for the accumulation of river water during high

water and summer flash floods, which leads to swamping in the surrounding areas, a dense network of irrigation canals and ditches [14]. The Loktyshi reservoir of the riverbed type was created on the river in 1977 for water supply of the Loktyshi fish farm. The bottom of the reservoir is flat, mostly muddy. Water level fluctuations throughout the year are up to 2 m. The area of the reservoir is 15.9 km², length is 6 km, maximum depth is 4.9 m, maximum width is 4.2 km, water volume is 50.2 million m³, catchment area is 940 km² [13]. The highest flood level is observed in April, the average height above the low-water level before river regulation is 1.5 m, and the highest is 1.9 m (1947) near the village of Loktyshi.

Time series of runoff (annual, maximum, minimum summer-autumn and minimum winter) of the Lan River were used as initial data from 3 gauging stations: Lognovichi with a catchment area $A = 480$ km² and observation period from 1979 to 1988; Loktyshi ($A = 909$ km²; 1948–1977) and Mokrovo ($A = 2550$ km²; 1975–2015). For comparability of the results obtained, a single calculation period from 1948 to 2015 lasting 68 years was adopted. The restoration of gaps in data series was carried out using the "Hydrolog" computer software package [15] with the involvement of analogue rivers.

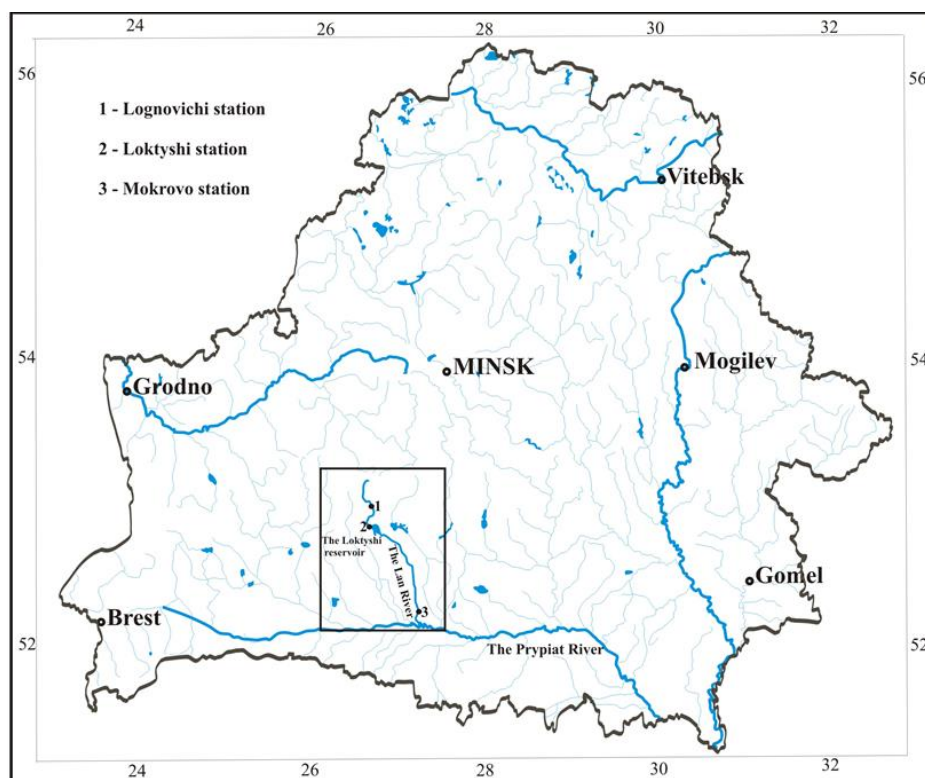


Figure 1 – The map of the study area

The "Hydrolog" computer program was developed in 2009 on the basis of regulatory documents and methods used in hydrology, and software is constantly being improved to take into account modern requirements in the field of hydrological calculations. The program implements many functions, one of which is the extension of time series in the absence of observational data. For this purpose, up to 9 analogue rivers from the region under study are used in automatic or manual mode. The runoff correlation coefficient between the time series of the river under study and the analogue river is used as an indicator. The program displays an assessment of the calculation period and statistical information about analogue rivers, and implements a graphical representation of the hydrographs and the difference integral curve of the studied catchment. Next, to extend the time series of the river under study, one-, two-, or three-factor models are formed depending on the required values of the correlation coefficients and the ratio of the regression coefficients to their standard deviation. For extension models, it is possible to view the given statistical parameters of the original series (norm, dispersion, coefficients of variation, asymmetries and autocorrelation). Direct extension of the hydrological series under study is carried out using several regression equations in descending order of pair or multiple correlation coefficients. When extending, the main statistical parameters of the original and extended series are compared with the

corresponding graphical representation. The "Hydrolog" software has been used in many organizations in Belarus and, during experimental testing, has shown very good results, including for solving the problem of extending hydrological series [15, 21].

The method of hydrological-climatic calculations was adapted for forecast in runoff changes of the Lan River. The method is based on the joint solution of the equations of water and heat-energy balances [16]. An algorithm and a computer model that includes a standard equation for the water balance of a land area with an independent assessment of the main elements of the balance (precipitation, evapotranspiration and climatic runoff) on an annual basis have been developed. The adapted model was used to assess possible changes in river water resources depending on certain hypotheses of climate fluctuations and anthropogenic impacts on the characteristics of the catchment area.

The equation of the water balance of the river basin for a certain period of time is as follows:

$$Y_c(I) = H(I) - E(I) \pm \Delta W(I), \quad (1)$$

where $Y_c(I)$ – the total climatic runoff [mm]; $H(I)$ – the total humidification resources [mm]; $E(I)$ – the total evaporation [mm]; $\Delta W(I)$ – changes in moisture reserves of the active soil layer; I – averaging interval.

Total evaporation is calculated as follows:

$$Z(I) = Z_m(I) \left[1 + \frac{\left(\frac{Z_m(I)}{W_{HB}} + V(I)^{1-r(I)} \right)^{n(I)}}{\frac{X(I) + g(I)}{W_{HB}} + V(I)} \right]^{\frac{1}{n(I)}}, \quad (2)$$

where $Z_m(I)$ – the maximum evaporation [mm]; W_{HB} – the smallest

moisture content of the soil [mm]; $V(I) = \frac{W(I)}{W_{HB}}$ – the relative humidity of

soil at the beginning of the calculated period; $X(I)$ – the amount of precipitation [mm]; $g(I)$ – the groundwater component of the water balance [mm]; $r(I)$ – the parameter that depends on the water-physical properties and mechanical composition of soil; $n(I)$ – the parameter that takes into account physical and geographical conditions of runoff.

Relative soil moisture at the end of the calculation period is determined from the ratios

$$V(I+1) = V(I) \cdot \left(\frac{V_{cp}(I)}{V(I)} \right)^{r(I)}; \quad (3)$$

$$V_{cp}(I) = \left(\frac{KX(I) + g(I)}{\frac{W_{HB}}{E_m(I)} + V(I)^{1-r(I)}} \right)^{\frac{1}{r(I)}}. \quad (4)$$

The obtained values $V_{cp}(I)$ are compared with the relative value of the total moisture capacity V_{PB} . If $V_{cp}(I) \leq V_{PB}$, then the calculated value of the relative average humidity is taken, otherwise, $V_{cp}(I) = V_{PB}$ is taken into account for the calculation, the difference $(V_{cp}(I) - V_{PB}) \cdot W_{HB}$ refers to surface runoff.

The amount of atmospheric precipitation in the months of the cold period, minus the amount of total evaporation, is transferred to the flood period, i.e. for the month of March.

The total moisture resources are determined as follows:

$$H(I) = KX(I) + W_{HB}(V(I) - V(I+1)). \quad (5)$$

The solution of the system of equations (1)–(5) is carried out using the iteration method until the value of the relative humidity of the soil at the beginning of the calculation interval is equal to the value of the relative humidity at the end of the last interval. When calculating, the initial value of humidity is taken equal to the value of the lowest moisture capacity, i.e. $W(1) = W_{HB}$, where $V(1) = 1$.

Climate runoff is adjusted using coefficients that take into account the influence of various factors on the formation of riverbed runoff, i.e.

$$Y_R(I) = k(I) \cdot Y_C(I), \quad (6)$$

where $Y_R(I)$ – total riverbed runoff [mm]; $k(I)$ – coefficient taking into account the hydrographic parameters of the catchment.

Modeling of the river water balance is implemented in the form of a computer program and is carried out in two stages. At the first stage, the model is calibrated taking into account the known components of the water-heat balance of the river under study. The goal of model tuning is to achieve the best possible conformity between measured and calculated runoff. The model parameters are varied for all possible values until a match is found between the two runoff types. The first stage ends with the construction of runoff graphs and the output of the modeling error (Figure 2). Good conformity between measured and calculated runoff indicates the validity of the model. The obtained model parameters then used to conduct a numerical experiment [20].

The second stage is a direct calculation of the water balance of the river under study, using the parameters obtained during model calibration. The calculation of the elements of the water balance of the river is

carried out taking into account the specific features of the watershed under consideration and described in [17].

The simulation modeling technique have been tested on almost all the main climatic characteristics, which made it possible to attract an additional large amount of hydrometeorological information about possible variants of values and changes included in the balance equations of random variables.

The modeling results indicate a high accuracy of water balance calculations for both practical application and theoretical research, which has been tested on a large number of rivers in Belarus with a catchment area of about 1000 km², where hydrometric observations are carried out [17]. Thus, the created computer program in the presence of data on precipitation, air temperature, air humidity deficits for the calculation period and modern values of river runoff, as well as hydrographic characteristics of the watershed, allows one to obtain predictive estimates of the water balance of small rivers of the Belarusian Polesie for the estimated future [20].

To obtain forecast estimates of meteorological values, time series of observations were used for the period from 1986 (the beginning of the increase in average annual air temperatures) to 2015 with monthly increments. For this period, linear trends were constructed for monthly and annual values of atmospheric precipitation, air temperature and air humidity deficits, and the resulting parameters were used to obtain average monthly and annual values for the period until 2035. The procedure for assessing climatic parameters for the estimated future is presented in more detail in the work [18].

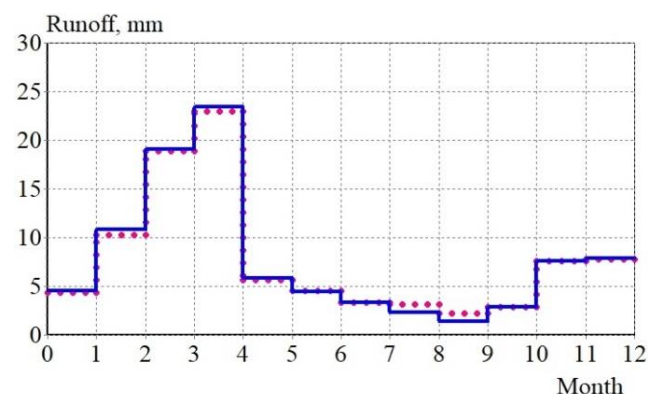


Figure 2 – Measured (—) and calculated (---) runoff during model calibration

Results and discussion

At the first stage of research, a procedure was carried out to bring hydrological series to a single calculation period from 1948 to 2015. Table 1 shows the main hydrological parameters of annual runoff, as well as the annual runoff of the different probabilities, determined using a three-parameter gamma probability distribution for two periods: directly from measured data and from representative period (68 years) for 3 gauging stations of the Lan River.

Figure 3 shows the long-term course of annual runoff for 3 gauging stations of the Lan River.

There was a tendency towards an increase in annual runoff along the Loktyshi and Mokrovo gauging stations by about 0.2 m³/s for 10 years. That was largely due to amelioration of the second half of the last century [19]. At the same time, there was a decrease in runoff (0.09 m³/s for 10 years) in the upper reaches of the river (the Lognovichi gauging station), that mostly were caused by climatic influences. For the maximum runoff throughout the river, there was a significant decrease in the maximum runoff due to natural factors (everywhere in Belarus there was a decrease in the maximum spring flood runoff [20]) and the accumulation of part of the spring flood runoff by the Loktyshi reservoir. The general trend of changes in the minimum runoff on the territory of Belarus was a widespread increase in winter runoff caused by modern climatic warming in the cold period, as a result of frequent thaws and an increase in runoff; summer runoff has not changed with the exception of the Belarusian Polesie, where there has been a slight increase in runoff caused by large-scale amelioration [18]. Fluctuations in the minimum runoff at the Loktyshi and Mokrovo gauging stations, both in summer-autumn and in winter, are determined by the operating regime of the reservoir and are predictable.

Table 1 – Statistical parameters and annual runoff of the Lan River for 2 periods

Parameter		Gauging station		
		Lognovichi (A=480 km ²)	Loktyshi (A=909 km ²)	Mokrovo (A=2550 km ²)
Number of years		10 / 68	29 / 68	40 / 68
Period		1979–1988/1948–2015	1948–1977/1948–2015	1975–2015/1948–2015
Average runoff, m ³ /s		1.90±0.17 / 2.04±0.07	3.68±0.19 / 4.09±0.13	8.84±0.53 / 8.59±0.46
Autocorrelation coefficient		0.37 / 0.16	-0.17 / 0.19	0.28 / 0.12
Flow rate, m ³ /s		1.94 / 2.04	3.71 / 4.12	8.84 / 8.59
Coefficient of variation (Cv)		0.22 / 0.27	0.29 / 0.28	0.29 / 0.36
Ratio (Cs/Cv)		3.5 / 3.0	5.5 / 4.0	2.5 / 2.0
Runoff of the different probabilities, m ³ /s	1 %	3.06 / 3.41	6.35 / 6.79	13.9 / 15.8
	5 %	2.64 / 2.91	5.26 / 5.76	12.1 / 13.3
	25 %	2.17 / 2.32	4.15 / 4.65	9.96 / 10.2
	50 %	1.89 / 1.98	3.58 / 4.00	8.68 / 8.32
	75 %	1.66 / 1.70	3.22 / 3.48	7.51 / 6.69
	95 %	1.38 / 1.35	2.64 / 2.88	6.09 / 4.76
	99 %	1.21 / 1.16	2.37 / 2.53	5.22 / 3.67

Note – The numerator (or the left value) shows data determined from observation period; the denominator (or the right value) shows data determined from representative period.

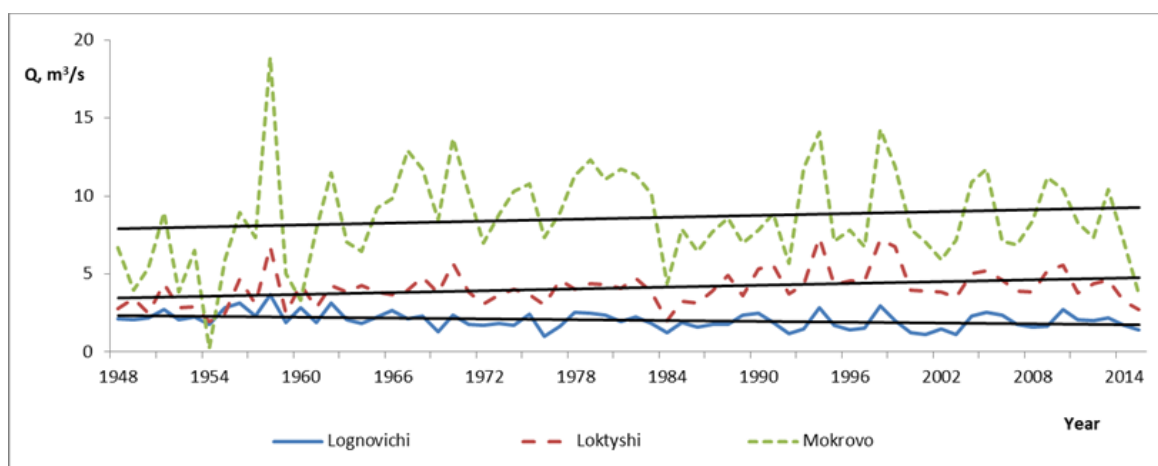


Figure 3 – The long-term courses of annual runoff of the Lan River and trends showed by straight lines for each gauging station

To assess the influence of anthropogenic impacts and natural factors on runoff, the original time series of runoff were analyzed for various averaging intervals: from 1948 to 2015 (the entire observation period, 68 years); from 1948 to 1977 (period before the commissioning of the Loktyshi reservoir, 30 years); from 1978 to 2015 (period of operation of the Loktyshi reservoir and the Loktyshi fish farm, 38 years). Table 2 presents sample estimates of the main statistical parameters of the considered runoff time series for various averaging periods.

Empirical supply curves for all averaging periods correspond to a three-parameter gamma distribution, and the ratio of the asymmetry coefficient (Cs) to the coefficient of variation (Cv), as a rule, does not exceed $Cs = 3Cv$. Since the runoff probability distribution function, the use of parametric criteria for testing statistical hypotheses can be considered acceptable. Histograms constructed for the water flow rates under consideration indicate that the distribution is close to normal. Then the stability of sample statistics (averages and coefficients of variation) for the averaging periods 1948–1977 and 1978–2015 (assessment of the influence of the reservoir) in relation was analyzed. Table 3 shows the matrix of the Student and Fisher statistical tests for the considered types of the Lan River runoff.

Joint analysis of the Tables 2 and 3 allowed considering runoff changes of the Lan River caused by the construction of the Loktyshi reservoir by comparing the changes that occurred with runoff for the periods 1948–1977 and 1978–2015. Over the periods under review, the runoff at the Lognovichi gauging station decreased by 0.23 m³/s, at the Loktyshi gauging station it increased by 0.74 m³/s, and at the Mokrovo gauging station there occurred no statistically significant changes. The analysis of variances has shown changes in the structure of fluctuations in the aver-

age annual runoff of the river as the F-criteria values did not exceed critical values. The maximum runoff decreased significantly by 10.0, 30.6, and 32.7 m³/s respectively, while the nature of the oscillations also changed, and the amplitude of the oscillations significantly decreased. That was mostly caused by the filling of the reservoir during this period and frequent winter thaws [19]. The minimum summer-autumn river runoff increased only at the Loktyshi station (0.81 m³/s), which is statistically significant and caused by the influence of the reservoir; at the other stations some statistically insignificant increase in runoff was observed.

The nature of fluctuations in the minimum summer-autumn runoff judging by the F-criteria has not undergone significant changes, except at the Lognovichi gauging station. The minimum winter runoff increased everywhere, respectively by 0.47, 0.61 and 1.26 m³/s; and in all cases statistically significant. That was as a result of winter thaws above the reservoir and below an anthropogenic factor was added in the form of water releases from the reservoir. In addition, the nature of fluctuations in the minimum winter runoff has also changed, except at the Loktyshi gauging station. Thus, testing the hypothesis about the homogeneity of the considered parameters of annual, maximum, minimum summer-autumn and minimum winter runoff for periods with different averaging intervals was based on the use of the Student and Fisher criteria; and as the analysis showed the differences in the parameters are significant for some segments and can be recognized statistically reliable.

Runoff changes of the Lan River for 3 gauging stations under consideration were assessed using linear gradients numerically equal to the product of the regression coefficient of linear trends (a) by 10 years. The gradient characterizes the change in water flow in m³/s by 10 years. The values of runoff gradients and their significance using correlation coefficients are given in Table 4.

Table 2 – Statistical parameters of the Lan River runoff for different averaging periods

Runoff type	Annual			Maximum			Minimum summer-autumn			Minimum winter		
Gauging station	Lognovichi	Loktyshi	Mokrovo	Lognovichi	Loktyshi	Mokrovo	Lognovichi	Loktyshi	Mokrovo	Lognovichi	Loktyshi	Mokrovo
1948–2015												
Q_{av} , m ³ /s	2.04	4.12	8.59	2.90	60.8	45.7	0.534	1.52	2.50	0.741	1.47	3.96
C_v	0.27	0.28	0.36	0.67	0.83	0.95	0.22	0.38	0.64	0.693	0.457	0.597
C_s	0.60	0.80	0.40	0.67	0.83	0.95	0.22	0.39	0.65	3.25	1.07	0.981
$Q_{p=1\%}$, m ³ /s	3.41	6.79	15.8	139	225	231						
$Q_{p=5\%}$, m ³ /s	2.91	5.76	13.3	90.9	159	137						
$Q_{p=25\%}$, m ³ /s	2.32	4.65	10.2	45.5	85.4	56.1						
$Q_{p=50\%}$, m ³ /s	1.98	4.00	8.32	33.2	48.6	35.3	0.513	1.50	2.20	0.628	1.36	3.45
$Q_{p=75\%}$, m ³ /s	1.70	3.48	6.69				0.446	1.13	1.37	0.432	1.03	2.32
$Q_{p=95\%}$, m ³ /s	1.35	2.88	4.76				0.373	0.658	0.612	0.268	0.693	1.29
$Q_{p=99\%}$, m ³ /s	1.16	2.53	3.67				0.334	0.403	0.305	0.197	0.529	0.838
1948–1977												
Q_{av} , m ³ /s	2.22	3.71	8.36	45.3	81.3	67.0	0.523	1.05	2.74	0.518	1.17	3.21
C_v	0.27	0.29	0.46	0.76	0.71	0.94	0.29	0.43	0.66	0.37	0.63	0.78
C_s	1.06	1.58	1.38	3.42	1.76	3.29	1.71	1.06	1.66	1.10	3.76	4.31
$Q_{p=5\%}$, m ³ /s	3.15	5.26	14.8	103	191	178						
$Q_{p=10\%}$, m ³ /s	2.88	4.79	12.8	81.2	155	135						
$Q_{p=90\%}$, m ³ /s	1.64	2.81	4.66				0.340	0.554	0.998	0.277	0.558	1.31
$Q_{p=95\%}$, m ³ /s	1.52	2.64	4.02				0.310	0.467	0.760	0.237	0.488	1.10
1978–2015												
Q_{av} , m ³ /s	1.99	4.45	8.88	35.3	49.7	34.3	0.553	1.86	2.39	0.984	1.78	4.47
C_v	0.27	0.26	0.30	0.57	0.95	0.72	0.16	0.21	0.68	0.74	0.34	0.46
C_s	0.68	1.29	0.75	2.28	2.85	4.00	0.96	0.43	1.69	4.05	1.34	0.91
$Q_{p=5\%}$, m ³ /s	2.83	6.16	12.2	68.7	134	76.9						
$Q_{p=10\%}$, m ³ /s	2.61	5.67	11.3	57.3	102	60.4						
$Q_{p=90\%}$, m ³ /s	1.43	3.37	6.61				0.427	1.39	0.858	0.396	1.17	2.33
$Q_{p=95\%}$, m ³ /s	1.31	3.19	6.11				0.404	1.28	0.651	0.331	1.06	1.94

Table 3 – Statistical criteria for various averaging intervals and types of the Lan River runoff

Gauging station	Lognovichi		Loktyshi		Mokrovo	
Runoff type	t	F	t	F	t	F
Annual	2.19	1.29	2.68	1.22	1.20	1.94
Maximum	2.07	2.55	2.47	1.63	2.85	5.69
Minimum summer-autumn	1.25	2.62	7.77	1.24	1.42	1.23
Minimum winter	3.93	11.7	4.50	1.14	1.94	2.44

Note – Bold values are statistically significant

Table 4 – Statistical parameters of linear trends in the Lan River runoff changes for different averaging periods

Runoff type	Annual			Maximum			Minimum summer-autumn			Minimum winter		
Gauging station	Lognovichi	Loktyshi	Mokrovo	Lognovichi	Loktyshi	Mokrovo	Lognovichi	Loktyshi	Mokrovo	Lognovichi	Loktyshi	Mokrovo
1948–2015												
$\alpha \cdot 10$, m ³ /s	-0.09	0.19	0.18	-2.76	-8.13	-7.76	0.003	0.218	-0.117	0.113	0.182	0.513
r	-0.34	0.34	0.12	-0.23	-0.34	-0.39	0.00	0.76	-0.15	0.44	0.53	0.40
1948–1977												
$\alpha \cdot 10$, m ³ /s	-0.27	0.34	1.62	0.11	-8.59	-2.61	-0.006	0.413	0.388	0.026	0.395	0.749
r	-0.42	0.30	0.42	0.00	-0.15	-0.04	-0.00	0.84	0.21	0.13	0.57	0.26
1978–2015												
$\alpha \cdot 10$, m ³ /s	-0.05	0.06	-0.50	-6.10	-6.80	-7.96	-0.028	0.065	-0.501	0.123	0.015	0.416
r	-0.11	0.06	-0.22	-0.37	-0.19	-0.41	-0.36	0.18	-0.37	0.22	0.03	0.23

Note – Bold values are statistically significant

For the entire period under consideration (1948–2015), a statistically significant linear gradients occurred for average annual runoff at the Lognovichi gauging station – negative ($-0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ by 10 years), and at the Loktyshi gauging station – positive ($0.19 \text{ m}^3/\text{s}$ by 10 years). At all gauging stations the gradients of maximum runoff are negative and statistically significant and amount to -2.76 , -8.13 , and $-7.76 \text{ m}^3/\text{s}$ by 10 years, respectively. It caused by the effect of anthropogenic factor (the filling of the reservoir) and natural factor (modern climate warming). For the minimum runoff a statistically significant positive gradient was observed in the summer-autumn period at the Loktyshi gauging station and amounted to $0.218 \text{ m}^3/\text{s}$ by 10 years; in the winter a runoff increase was observed at all gauging stations and amounted to 0.113 , 0.182 ; $0.0513 \text{ m}^3/\text{s}$ by 10 years, respectively, and it is typical for the entire territory of Belarus [18]. For the period 1948–1977 a decrease in runoff was observed at the Lognovichi gauging station and at the Mokrovo gauging station; there was some increase in the average annual runoff (-0.27 and $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$ by 10 years, respectively). No significant changes have been established in the maximum runoff at all gauging stations, although there was some tendency towards a decrease in runoff. The minimum runoff, both summer-autumn and winter, increased statistically significantly only at the Loktyshi gauging station and amounted to 0.413 and $0.395 \text{ m}^3/\text{s}$ by 10 years, respectively. Between 1978 and 2015 (the operating time of the reservoir) the prevailing trend was a decrease in runoff. The maximum and minimum summer-autumn runoff at the Logno-

vichi and Mokrovo gauging stations decreased statistically significantly -6.10 ; -7.96 ; -0.028 ; $-0.501 \text{ m}^3/\text{s}$ by 10 years, respectively. Thus, statistical heterogeneity was established, i. e. in the Lan River basin there was intensive economic activity that significantly disrupts the natural hydrological regime.

Trends in climate fluctuations at the global and regional levels are confirmed by: an increase in global air temperature at the earth's surface, a decrease in the area of sea ice in the Arctic basin and snow cover on land, and an increase in the average sea level. According to research by leading climatologists, the change in global temperature in the 20th – early 21st centuries is characterized by general warming, which on average on Earth amounted to $0.75 \text{ }^{\circ}\text{C}$. During this time, the intra-annual structure of atmospheric precipitation has changed significantly. Monthly precipitation values in April-May and, especially, in August decreased by approximately 20 %. Trends in long-term fluctuations in air temperature extremeness indices are consistent with the fact of global warming, when annual minimums and maximums increase, and the range between them decreases (the minimums increase faster than the maximums), and the number of days with frost decreases. Table 5 presents modeling of changes in meteorological characteristics in the territory of Belarusian Polesie until 2035, which was carried out on the basis of an archive of meteorological data using the CMIP5 multi-model ensemble of four scenarios (RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5, RCP2.6) [21, 22].

Table 5 – Forecast estimates of changes in meteorological parameters in the territory of Belarusian Polesie until 2035

Time interval												
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)												
2.4	2.2	1.9	1.6	1.4	1.6	2.0	1.9	1.7	1.6	1.7	2.0	1.8
Precipitation (%)												
9.0	5.0	2.0	-6.0	-7.0	-8.0	-12.0	-10.0	-6.0	-4.0	3.0	4.0	-2.5
Deficiency of air humidity (%)												
0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	-0.3	-0.4	-0.3	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

Using the considered methodology, we made forecast estimates for the Lan River at the Mokrovo gauging station for the future until 2035. Due to the significant anthropogenic impact on the Lan River runoff, model adjustment was carried out along the river analogue of the Tsna river at the Detlovichi gauging station. The rivers are located in close proximity to each other and have very similar geomorphological charac-

teristics and climatic conditions. Figure 4 presents current and forecast values of river runoff for ensemble of four climate scenarios (RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5, RCP2.6).

Table 6 shows the results of modeling forecast estimates of changes in the average long-term runoff of the Lan River for 2035 year.

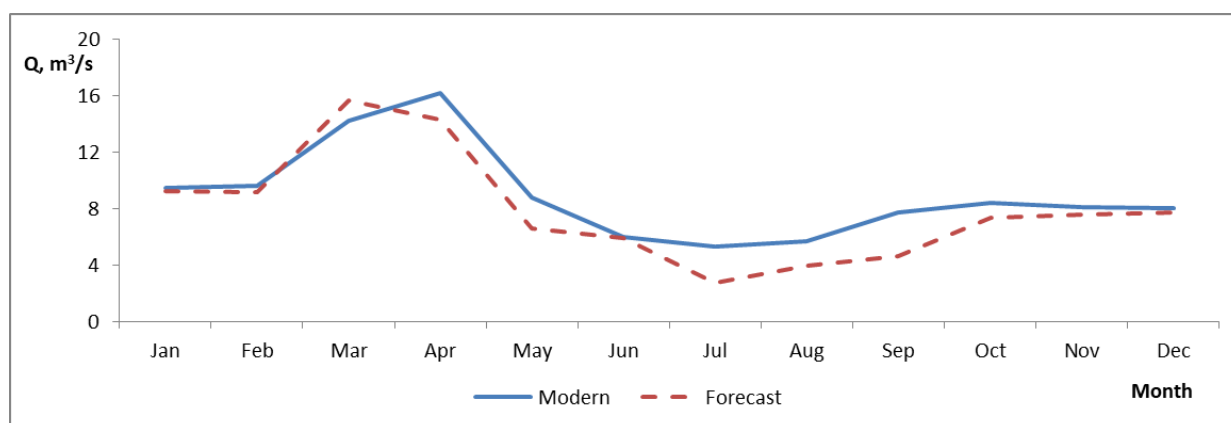


Figure 4 – Modern and forecast hydrographs of the Lan River runoff at the Mokrovo gauging station

Table 6 – Forecast estimates of changes in average long-term runoff of the Lan River for 2035

Time interval												
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
Modern runoff rates, m^3/s												
9.46	9.60	14.2	16.2	8.78	5.99	5.32	5.69	7.74	8.38	8.10	8.01	8.89
Forecast runoff rates, %												
97.3	95.4	109.9	88.3	74.8	98.8	51.7	68.9	59.6	87.1	93.5	96.1	90.0
Forecast runoff rates, m^3/s												
9.20	9.15	15.6	14.3	6.57	5.92	2.75	3.92	4.61	7.30	7.57	7.70	8.00

As can be seen from Table 6, significant changes in runoff will not occur, since the forecast climate parameters have not changed significantly. A slight decrease in runoff is predicted, caused by additional evaporation from the water surface of the reservoir, due to an increase in air temperatures, and there will be a slight shift in the peak of the spring flood to the month of March [21].

Conclusion

A comprehensive analysis of hydrometric information on the of the Lan River runoff at the Lognovichi, Loktyshi and Mokrovo gauging stations for the period from 1948 to 2015 was carried out. A decrease in the average annual runoff at the Lognovichi station was established, at the same time there was runoff increase at the Loktyshi station. In terms of maximum runoff, a decrease was observed at all considered gauging stations. An increase in the minimum summer-autumn runoff was observed at the Loktyshi gauging station; a minimal winter runoff increase was observed in all areas.

Based on the runoff time series analysis, a hydrological-climatic hypothesis, and the CMIP5 multi-model ensemble of four scenarios (RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5, RCP2.6) the modeling of changes in the Lan River runoff until 2035 was carried out. The obtained results contain a slight decrease in runoff and shift in the maximum spring runoff to earlier dates.

It is established that the Loktyshi Reservoir has the great influence on the volume and regime of the Lan River runoff, which requires strict adherence to scientifically based regimes for managing the water regime of the reservoir.

References

- Czaja, S. Floods in the upper part of Vistula and Odra River Basins in the 19th and 20th centuries / S. Czaja, R. Machowski, M. Rzetala // Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology. – 2014. – Vol. 19. – P. 127–134.
- IPCC Climate Change 2021: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Technical report.
- Stagl, J. Impacts of climate change on the hydrological regime of the Danube River and its tributaries using an ensemble of climate scenarios / J. Stagl, F. Hattermann // Water. – 2015. – Vol. 7. – P. 6139–6172.
- Tomaszewski, E. Impact of Lake Gopło on low-flow regime of the upper Noteć River / E. Tomaszewski // Limnol. Rev. – 2016. – Vol. 16. – P. 95–103.
- Influence of warming and atmospheric circulation changes on multidecadal European flood variability / S. Brönnimann, P. Stucki, J. Franke [et al.] // Climate of the Past. – 2022. – Vol. 18. – P. 919–933.
- On the links between sub-seasonal clustering of extreme precipitation and high discharge in Switzerland and Europe / A. Tuel, B. Schaeffli, J. Zscheischler, O. Martius // Hydrology and Earth System Sciences. – 2022. – Vol. 26. – P. 2649–2669.
- Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change / L. Gudmundsson, J. Boulange, H. X. Do [et al.] // Science. – 2021. – Vol. 371. – P. 1159–1162.
- Tomaszewski, E. River Minimum Flow Changes under Dammed Reservoir Conditions / E. Tomaszewski // Limnol. Rev. – 2021. – Vol. 21. – P. 63–71.
- A comparative technical study for estimating seeped water from irrigation canals in the Middle Egypt (Case study: El-Sont branch canal network) / A. Ashour, E. Tawab, S. Abu-Zaid, A. AbdAllah // Ain Shams Eng. J. – 2023. – Vol. 14. – P. 101875.
- Human impacts on runoff regime of middle and lower Yellow River / Y. F. Sang, D. Wang, J. C. Wu [et al.] // Water Sci. Eng. – 2011. – Vol. 4. – P. 36–45.
- Sobczyński, T. The influence of urban agglomeration on a small natural water reservoir / T. Sobczyński, P. Niedzielski // Limnol. Rev. – 2018. – Vol. 18. – P. 39–44.
- Environmental risks of water resources in the Belarusian Polesie / I. Kirvel, A. Volchak, S. Parfomuk, P. Kirvel // Limnol. Rev. – 2023. – Vol. 23. – P. 21–32.
- Блакiтны скарб Беларусi: рэкi, азёры, вадасховiшчы, турысцкi патэнцыял водных аб'ектаў : энцыклапедыя / маст.: Ю. А. Тарэеў, У. І. Цярэньцёў. – Мiнск : БелЭн, 2007. – 478 с. [Blakitny skarb Belarusi: reki, azory, vadaskhovichchy, turytski patencyyal vodnyh ab'ektaŭ : encyklopedyya / mast.: YU. A. Tareeŭ, U. I. Cyarenčyeŭ. – Minsk : BelEn, 2007. – 478 s.]
- Беларуская энцыклапедыя : У 18 т. / рэдкал.: Г. П. Пашкоў [i інш.]. – Мiнск : БелЭн, 2002. – Т. 15: Следавікi – Трыю. – 552 с. [Belaruskaya encyklopedyya : U 18 t. / redkal.: G. P. Pashkoŭ [i insh.]. – Minsk : BelEn, 2002. – T. 15: Sledaviki – Tryu. – 552 s.]
- Волчек, А. А. Пакет прикладных программ для определения расчетных характеристик речного стока / А. А. Волчек, С. И. Парфомук // Веснік Палескага дзярж. ун-та. Сер. Прыродазнаўчыя навук. – 2009. – № 1. – С. 22–30. [Volchek, A. A. Paket prikladnyh programm dlya opredeleniya raschetnyh harakteristik rechnogo stoka / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk / Vesnik Paleskaga dzyarzh. un-ta. Ser. Pryrodaznaychyh navuk. – 2009. – № 1. – S. 22–30.]
- Гидрологические расчеты в мелиоративных целях / В. С. Мезенцев, Г. В. Белоненко, И. В. Карнацевич, В. В. Лоскутов. – Омск, 1980. – 84 с. [Gidrologicheskie raschety v meliorativnyh celyah / V. S. Mezencev, G. V. Belonenko, I. V. Karnacevich, V. V. Loskutov. – Omsk, 1980. – 84 s.]
- Волчек, А. А. Оценка трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья под воздействием природных и антропогенных факторов (на примере р. Ясельда) / А. А. Волчек, С. И. Парфомук // Водное хозяйство России. – 2007. – № 1. – С. 50–62. [Volchek, A. A. Ocenka transformacii vodnogo rezhima malyh rek Belorusskogo Poles'ya pod vozdeystviem prirodnyh i antropogennyh faktorov (na primere r. Yasel'da) / A. A. Volchek, S. I. Parfomuk // Vodnoe hozyajstvo Rossii. – 2007. – № 1. – S. 50–62.]
- Korneev, V. The Strategic Framework for Adaptation to Climate Change in the Neman River Basin / V. Korneev, A. Volchak, L. Hertman // United Nations Development Programme in Belarus and United Nations Economic Commission for Europe. – Brest, 2015. – 64 p.
- Логинов, В. Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек ; НАН Беларуси, Ин-т проблем использ. природ. ресурсов и экол., Полесский аграрно-экол. ин-т. – Минск : Тонпик, 2006. – 160 с. [Loginov, V. F. Vodnyj balans rechnyh vodosborov Belarusi / V. F. Loginov, A. A. Volchek ; NAN Belarusi, In-t problem ispol'z. prirod. resursov i ekol., Polesskij agrarno-ekol. in-t. – Minsk : Tonpik, 2006. – 160 s.]
- Волчек, А. А. Половодья на реках Беларуси: закономерности формирования и прогноз : монография / А. Волчек, Ан. Волчек. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 216 с. [Volchek, A. A. Polovod'ya na rekah Belarusi: zakononomosti formirovaniya i prognoz : monografiya / A. Volchek, An. Volchek. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 216 s.]
- Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата = Water resources of Belarus and their forecast with account of climate change : [монография] / А. А. Волчек [и др.] ; под общей ред. А. А. Волчека, В. Н. Корнеева ; Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов, Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет. – Брест : Альтернатива, 2017. – 239 с. [Vodnye resursy Belarusi i ih prognoz s uchetom izmeneniya klimata = Water resources of Belarus and their forecast with account of climate change : [monografiya] / A. A. Volchek [i dr.]; pod obshchej red. A. A. Volcheka, V. N. Korneeva ; Ministerstvo prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus', Central'nyj nauchno-issledovatel'skij institut kompleksnogo ispol'zovaniya vodnyh resursov, Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. – Brest : Al'ternativa, 2017. – 239 s.]
- Projected seasonal changes in large-scale global precipitation and temperature extremes based on the CMIP5 ensemble / W. Zhan, X. He, J. Sheffield, E. F. Wood // Journal of Climate. – 2020. – Vol. 33(13). – P. 5651–5671.

Материал поступил 26.02.2025, одобрен 28.02.2025, принят к публикации 28.02.2025

УДК 504.05

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СОСТАВА ДЛЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПЫЛЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Т. В. Атевиновская¹, И. И. Злотников², А. Б. Невзорова³¹ Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры нефтегазоразработки и гидропневмоавтоматики УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», Гомель, Беларусь, e-mail: t_atvinovskaya@gstu.by² К. т. н., доцент, доцент кафедры физики и электротехники УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», Гомель, Беларусь, e-mail: zlotnikov@gstu.by³ Д. т. н., профессор, заведующий кафедрой нефтегазоразработки и гидропневмоавтоматики УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», Гомель, Беларусь, e-mail: anevzorova@gstu.by

Реферат

Загрязнение окружающей среды выбросами пыли с поверхности отработанных техногенных источников являются актуальной экологической проблемой современности. Наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха и окружающей среды в целом выбросами пыли наносят золоотвалы, хвостохранилища, шламохранилища и прочие свалки отходов горно-обогатительной отрасли. В настоящее время существует целый ряд способов закрепления пылящих поверхностей для снижения их негативного воздействия. Наиболее распространенным методом является обработка пылящей поверхности различными реагентами, растворами и составами, которые создают на ней прочный и водонепроницаемый защитный слой.

В статье рассмотрены перспективы использования бинарного силикатполимерного раствора на основе жидкого стекла и продуктов щелочного гидролиза отходов полиакрилонитрильного волокна для изготовления пылеподавляющих слоев. Определены оптимальные концентрации рабочего раствора и технологические приемы его получения. Проведены эксперименты по определению эксплуатационных свойств получаемых защитных покрытий. Приведены основные физико-механические характеристики покрытий. Обсуждаются преимущества и недостатки рассматриваемого состава по сравнению с известными. Исследуемый состав прост в изготовлении, не требует сложного оборудования, имеет длительный (до трёх месяцев) срок хранения, что расширяет области его применения. Готовый состав наносят на обрабатываемую поверхность с помощью поливочных автомобилей. Сравнительно небольшие участки поверхностей, требующие высокого качества пылеподавления, например сыпучие породы, хранящиеся на открытых складах, обрабатывают вручную с помощью пневмораспылителей. Рекомендуемый расход готового состава для успешного закрепления пылящих поверхностей 1,5–2,5 л/м² в зависимости от гранулометрического состава обрабатываемой породы, ее влажности и выбранной концентрации применяемого состава.

Ключевые слова: окружающая среда, отходы горно-обогатительной промышленности, выбросы пыли, пылеподавление, защитный слой, механическая прочность, водостойкость.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF THE COMPOSITION FOR FIXING DUSTY SURFACES

T. V. Atvinovskaya, I. I. Zlotnikov, A. B. Nevzorova

Abstract

Environmental pollution by dust emissions from the surface of spent man-made sources is an urgent environmental problem of our time. Ash dumps, tailings dumps, sludge storage facilities and other landfills of mining and processing industry waste make the greatest contribution to the pollution of atmospheric air and the environment as a whole by dust emissions. Currently, there are a number of ways to fix dusty surfaces to reduce their negative impact. The most common method is to treat the dusting surface with various reagents, solutions and compounds that create a strong protective layer on it. The article discusses the prospects of using a binary solution based on liquid glass and hydrolysis products of polyacrylonitrile fiber waste for the manufacture of dust-suppressing layers. The optimal concentrations of the working solution have been determined. Experiments have been conducted to determine the operational properties of the resulting protective coatings. The basic physical and mechanical properties of the obtained coatings are given. The main advantages and disadvantages of the considered composition are discussed.

The developed composition is easy to manufacture and does not require complex equipment. The composition is applied to the treated surface using watering trucks. Small areas of dusty surfaces, such as loose rocks stored in open warehouses, are treated manually with pneumatic sprayers. The consumption of the finished composition for successful fixing of dusty surfaces is 1.5–2.5 liters/m², depending on the granulometric composition of the treated rock and its humidity.

Keywords: environment, waste from mining and processing industry, dust emissions, dust suppression, protective layer, mechanical strength, water resistance.

Введение

Добыча, хранение, переработка и использование полезных ископаемых часто сопровождаются образованием обширных по площади нарушенных и даже полностью деградированных земельных территорий, которые являются источниками пылевых загрязнений. Такая ситуация складывается практически на всех месторождениях полезных ископаемых, которые разрабатываются карьерным и шахтным способами и требующих последующего обогащения. Наибольший вклад в загрязнение как атмосферного воздуха, так и окружающей среды в целом выбросами пыли вносят рудные и породные отвалы, хвостохранилища, золоотвалы, шламохранилища и прочие свалки отходов в первую очередь горно-обогатительной отрасли. Вносят свой негативный вклад также откосы дамб и плотин и подвижные пески пересыхающих и осу-

шенных водоемов. Все эти объекты наносят вред окружающей среде, нарушают экологическое равновесие и мешают устойчивому развитию регионов.

Так, например, по данным на 2019 г. за время работы Гомельского химического завода в отвалах скопилось более 14 млн тонн отходов, в основном фосфогипса, и их количество продолжает постоянно увеличиваться. В настоящее время под отвалы занята территория площадью более 0,95 км². Хотя частицы фосфогипса обладают большой склонностью к агломерации и при природной влажности грунта 38–50 % происходит образование плотных комков, но в результате стока и испарения воды, особенно в жаркий и сухой период, сцепление между частицами резко снижается и уже при скорости ветра 2–3 м/с может наблюдаться пыление свежих горизонтов отвалов [1, 2].

Из общего объема накопленных в Республике Беларусь промышленных отходов наибольшее количество приходится на солеотвалы галитовых отходов (86 %) и глинисто-солевые шламы (10,3 %) ОАО «ПО «Беларуськалий». Количество отходов, накопленных на земной поверхности Солигорского района в солеотвалах и шламохранилищах в настоящее время превышает 700 млн тонн. Солеотвалы достигают высоты в 90–100 м, а в отдельных случаях превышают 120 м и занимают площадь около 1,5 тыс. га [2, 3]. Вследствие частичного разрушения поверхности солеотвалов посредством ветровой эрозии происходит снос пыли с открытых участков, что причиняет окружающей среде значительный ущерб.

Большую проблему с точки зрения загрязнения окружающей среды представляют собой места захоронения буровых шламов. По приблизительным оценкам в настоящее время на территории Российской Федерации накоплено свыше 3 млн. тонн нефтяных шламов, причем большая их часть имеет возраст, доходящий до нескольких десятков лет [4]. Хотя в настоящее время разработано много методов переработки и обезвреживания бурового шлама перед захоронением, однако из-за высоких материальных, энергетических и финансовых затрат этих методов чаще всего проблему их утилизации решают просто: из амбара, где находятся буровые шламы, выкачивают свободную жидкость, после чего остатки бурового шлама присыпают цементом и после отверждения засыпают грунтом [5]. Такое захоронение с необезвреженным буровым шламом со временем под воздействием атмосферных факторов разрушается и в сухую погоду начинается пыление с открывшихся участков.

Негативное воздействие на окружающую среду оказывают и обезвоженные осадки сточных вод, образующиеся на очистных сооружениях, которые хранятся на иловых площадках. При несвоевременной утилизации таких отходов, особенно в условиях изменения климата (увеличения количества жарких и сухих дней) возникает угроза выброса мелкодисперсных загрязняющих веществ в атмосферный воздух [6, 13].

Существует целый ряд способов обеспыливания и закрепления пылящих поверхностей, которые заключаются в их обработке различными реагентами, растворами и составами, которые создают на поверхности прочный защитный слой [14, 15]. Наиболее экологичным способом постоянного закрепления пылящей поверхности является биологическое зарастание ее растительностью, для чего поверхность отвалов обрабатывают грунтовыми смесями, состоящими из воды, удобрений, семян трав и мульчирующих добавок (глина, опилки, торф и др.) [16]. Однако этот способ достаточно дорогой и часто затруднен или вообще невозможен технически. Поэтому обычно идут по пути обработки (пропитки) поверхностного пылящего слоя составами, имеющими выраженные клеящие свойства [17, 18], что приводит к агломерации и слипанию частиц пыли и образованию после высыхания на поверхности стекловидного прочного и водостойкого покрытия (корки). Для этих целей применяют цемент, известь, жидкое стекло, битумы, смолы, растворы различных полимеров (в первую очередь акриловых) и другие вещества [7–10]. Однако применение многих реагентов (соли, битумы, смолы и т. д.) может приводить к загрязнению грунтовых вод вредными компонентами [19, 20]. В этой связи разработка новых и усовершенствование существующих способов снижения пыления является актуальной задачей.

Цель работы – разработка состава, позволяющего получать на пылящих поверхностях прочного и водостойкого покрытия, обеспечивающего полное подавление сноса пыли с поверхности сыпучих пород, не содержащего дорогих и дефицитных компонентов и определение основных эксплуатационных свойств получаемых защитных покрытий.

Материалы и методы исследования

Среди водорастворимых полимеров, пригодных в качестве основы пылеподавляющих составов, особый интерес представляют различные акриловые полимеры, которые могут быть получены из полиакрилонитрила – крупнотоннажного и сравнительно недорогого полимера, а также из отходов его переработки. Поэтому в качестве исходных продуктов использовали отходы синтетического полиакрилонитрильного волокна «Нитрон Д» (производитель ОАО «Полимир», г. Полоцк), которые образуются при производстве искусственного меха на ОАО «Белфа» (г. Жлобин).

Для получения водорастворимого акрилового полимера указанные волокна гидролизуют 5 %-ным водным раствором гидроксида натрия из расчета 100 г NaOH на 126 г волокна в закрытой емкости при температуре 80–90 °C в течение 4 ч. Получали вязкий раствор продуктов гидролиза с водородным показателем pH = 11,5 – 12,0, который отстаивали в течение 24 ч и фильтровали через холст для удаления остатков неразложившихся волокон и случайных примесей. Содержание сухого вещества в очищенном растворе составляло 10–12 мас. % (в зависимости от исходного количества волокна и наличия нерастворимых продуктов). По результатам ранее проведенных исследований [11, 12] в макромолекулах полученного сополимера не содержалось нитрильных и карбоксильных функциональных групп, но присутствует акриламидные и карбоксилатные группы. Молекулярная масса сополимера составляет 10^4 – 10^5 . Вторым компонентом разрабатываемого состава было выбрано натриевое жидкое стекло по ГОСТ 13078-81 с силикатным модулем (молярное отношение SiO_2 к Na_2O) в пределах 2,6–3,0.

Раствор продуктов гидролиза полиакрилонитрильного волокна хорошо разбавляется водой и совмещается с натриевым жидким стеклом в любых пропорциях с образованием устойчивого бинарного силикатполимерного раствора, так как они оба являются щелочными полиэлектролитами. Признаков коагуляционных процессов в таком растворе не наблюдалось после трех месяцев хранения. Наличие в исследуемом составе вяжущих веществ силикатной и полимерной природы предполагает его высокую адгезию к обрабатываемым поверхностям различной химической природы. Рабочий состав для закрепления пылящих поверхностей изготавливали путем последовательного растворения компонентов (продуктов гидролиза и жидкого стекла) в воде. Краевой угол смачивания исследуемых растворов оценивали методом лежащей капли, для чего на поверхность стеклянной пластинки помещали каплю жидкости и после ее растекания и формирования равновесной формы проводили фотографирование профили капли веб-камерой.

Оценку свойств разработанного состава проводили на лабораторных моделях наиболее распространенных сыпучих отходов различных производств.

Модель 1. Отходы от сжигания каменного угля в котельных в виде золы влажностью 12 ± 2 %. Золу сушили, насыпали в стальной поддон размером 40×20×10 см, разравнивали и подвергали уплотнению на вибростоле. Испытуемый состав для закрепления пылящих поверхностей с помощью ручного пульверизатора равномерно наносили на поверхность золы в количестве 2 л/м². Обработанную модель выдерживали в течение 24 ч при температуре 20 ± 5 °C и подвергали испытанию.

Модель 2. Фосфогипс Гомельского химического завода влажностью 12 ± 3 %. Испытания проводили аналогично модели 1.

Модель 3. Песок формовочный по ГОСТ 2138-91. Испытания проводили аналогично предыдущим моделям.

Для оценки эффективности разработанного состава определяли усилие продавливания полученного на поверхности породы твердого покрытия. Усилие продавливания определяли с помощью грунтового пенетromетра ПБ-1Ф с конусным индентором с углом конуса конусника 30°. Величину усилия продавливания определяли как отношение стандартной нагрузки к площади образующегося в покрытии следа от конуса. Для определения водостойкости покрытие обрабатывали водой с помощью пульверизатора из расчета 1 л/м². Затем модели выдерживали 1 ч при температуре 20 ± 5 °C для пропитки покрытия водой и определяли усилие продавливания.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для определения эффективности смачивающей способности разрабатываемого состава, которая проявляется в растекании по обрабатываемой поверхности, проникновении жидкости вглубь сыпучих пород и образовании прочного наружного слоя были проведены исследования по определению краевого угла смачивания состава от соотношения применяемых компонентов (рисунок 1). Установлено, что величина краевого угла смачивания θ каплей жидкого стекла поверхности стеклянной пластины зависит от содержания в нем продуктов гидролиза. Как следует из рисунка 1 стандартный раствор (50 %) жидкого стекла обладает сравнительно невысокой смачива-

ющей способностью (угол смачивания $\theta = 40^\circ$). При введении в него 5–20 мас.% продуктов гидролиза значение краевого угла смачивания уменьшается с 40° до 20° и поэтому дальнейшее повышение их содержания нецелесообразно.

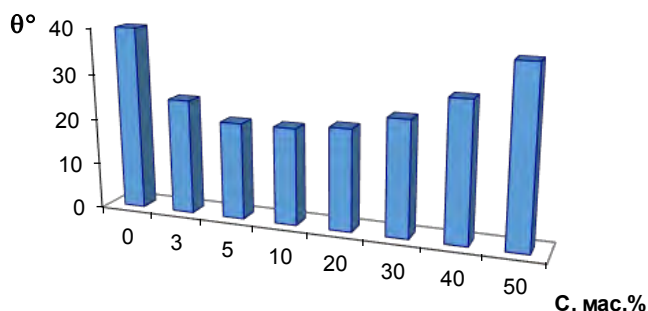


Рисунок 1 – Зависимость величины краевого угла смачивания θ жидкими стеклом поверхности стеклянной пластины от содержания в нем продуктов гидролиза C, мас.%



а

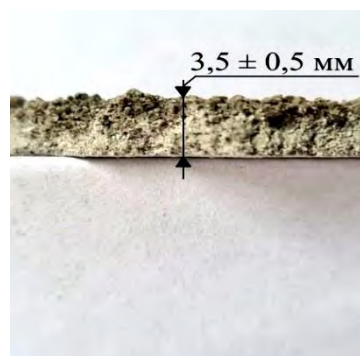


б

Рисунок 2 – Вид поверхности слоя фосфогипса исходного необработанного (а) и обработанного пылеподавляющим составом (б)



а



б

Рисунок 3 – Вид сверху фрагментов разрушения покрытия после механического воздействия (а) и вид сбоку границы разрушения фрагмента покрытия (корки), образованного на поверхности фосфогипса (б)

В таблице 1 приведены составы для закрепления пылящих поверхностей конкретного выполнения.

На рисунке 4 представлены результаты сравнительных испытаний покрытий, полученных при обработке пород разработанными составами в сравнении с широко известным составом-пылеподавителем FLOSET S 44 (Франция), который представляет собой водную дисперсию акрилового сополимера (состав номер 4).

Таблица 1 – Составы для закрепления пылящих поверхностей, мас.%

Компонент	Номер составов		
	1	2	3
Жидкое стекло	2,0	5,0	8
Раствор продуктов гидролиза (по сухому остатку)	0,5	1,5	2,5
Вода	97,5	93,5	89,5

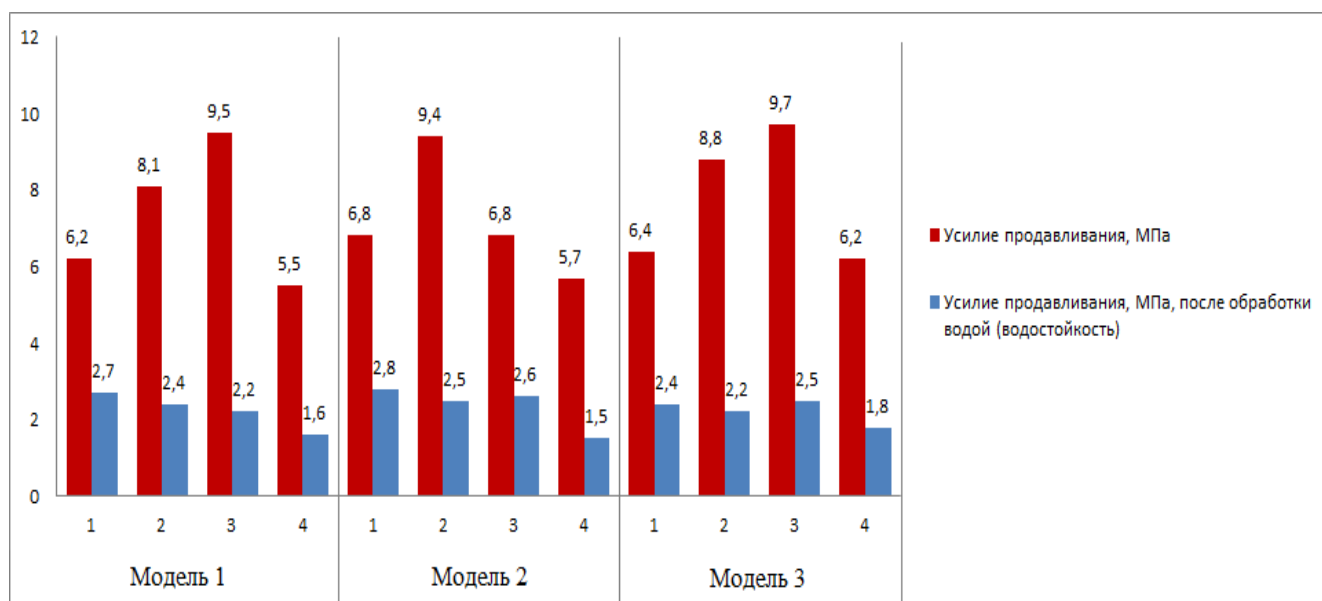


Рисунок 4 – Изменения усилий продавливания покрытий различных составов (1–4) моделей 1, 2, 3 до и после обработки водой

Как следует из сравнения полученных данных, покрытия, сформированные из разработанного состава, обладают более высокой механической прочностью и хорошей устойчивостью к воздействию влаги (дождя) по сравнению с известным составом. Исследуемый состав прост в изготовлении, не требует сложного оборудования, имеет длительный (до 3 месяцев) срок хранения, что расширяет области его применения. Готовый состав наносят на обрабатываемую поверхность с помощью поливочных автомобилей. Сравнительно небольшие участки пылящих поверхностей, требующие высокого качества пылеподавления, например сыпучие породы, хранящиеся на открытых складах, обрабатывают вручную с помощью пневмораспылителей. Рекомендуемый расход готового состава для успешного закрепления пылящих поверхностей 1,5–2,5 л/м² в зависимости от гранулометрического состава обрабатываемой породы, ее влажности и выбранной концентрации применяемого состава.

Заключение

Таким образом, разработанный состав на основе жидкого стекла и продуктов гидролиза отходов полиакрилонитрильного волокна может быть успешно использован для закрепления пылящих поверхностей путем формирования на их поверхностях прочных пылеподавляющих слоев. Разработанный состав не содержит дорогих или дефицитных компонентов, прост в изготовлении, не требует сложного оборудования и имеет длительный (до 3 месяцев) срок хранения. Состав можно применять как для обработки больших площадей породных отвалов, хвостохранилищ, золоотвалов, шламохранилищ, так и для небольших участков пылящих поверхностей, например сыпучих продуктов, хранящихся на открытых площадках, а также подъездных дорог и др. Применение разработанного состава позволит успешно решать экологические проблемы, связанные с пылью, а кроме того является хорошим способом утилизации отходов синтетического полиакрилонитрильного волокна.

Список цитированных источников

1. Утилизация отходов Гомельского химического завода с получением товарной продукции / А. Г. Губская, Т. В. Воловик, А. П. Гапотченко, И. Н. Горбач // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 89–107. – DOI: 10.35579/2076-6033-2019-11-07.
2. Шершнева, О. В. Оценка воздействия отходов фосфогипса на компоненты окружающей среды / О.В. Шершнева // Экологический вестник. – 2016. – № 2. – С. 97–103.
3. Семашко, А. В. Экологические проблемы Солигорского горнопромышленного района / А. В. Семашко, С. А. Федотова // Сборник материалов 72-й студенческой научно-технической конференции, 20–28 апреля 2016 г. / Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2016. – С. 264–267.
4. Лаверов, Н. П. Фундаментальные аспекты освоения ресурсов нефти и газа и шельфа России: стратегия, перспективы и проблемы / Н. П. Лаверов, В. И. Богоявленский, И. В. Богоявленский // Арктика: экология и экономика. – 2016. – № 2. – С. 4–13.
5. Максимов, А. Д. Буровые отходы: проблемы и решения / А. Д. Максимов // Промышленность и экология Севера. – 2011. – № 1. – С. 48–49.
6. Невзорова, А. Б. Влияние изменения климата на сферу обращения с активным илом сточных вод / А. Б. Невзорова. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2022. – 109 с.
7. Немировский, А. В. Применение различных способов пылеподавления на поверхности хвостохранилища / А. В. Немировский, Е. Н. Сторожев // Горный журнал. – 2021. – № 6. – С. 103–105.
8. Ляшенко, В. И. Обоснование природоохранных технологий и средств для пылеподавления поверхностей хвостохранилищ гидрометаллургического производства / В. И. Ляшенко, А. А. Гуринов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 9. – С. 58–72.
9. Study on preparation and properties of antifreeze compound road dust suppressant / Shiyang Xia, Ziliang Song, Xiaoliang Zhao [et al.] // Scientific Reports. – 2024. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-67683-6> (date of access: 22.02.2025).
10. Композиции водорастворимых полимеров для закрепления засоленных песков Арала / Б. А. Жумабаев, А. С. Алламураева, К. Ш. Зарипбаев, Л. Г. Аймурзаева // Universum: химия и биология: электрон. научн. журн. – 2023 – № 2 (104). – URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/14944> (дата обращения: 14.02.2025).
11. Влияние природы сополимеров акрилонитрила на химический состав продуктов их щелочного гидролиза / Л. П. Круль, Л. Б. Якимцова, Ю. И. Матусевич, Д. В. Кракодеев // Весті НАН Беларусі. Сер. хім. навук. – 2000. – № 1. – С. 103–105.
12. Злотников, И. И. СОЖ для механической обработки стекла на основе растворов полимеров / И. И. Злотников, П. А. Хило, М. И. Зубрицкий // Трение и износ. – 2007. – Т. 28, № 3. – С. 301–304.

13. Невзорова, А. Б. Накопление отходов производства и их влияние на состояние подземных вод в Республике Беларусь / А. Б. Невзорова, О. В. Шершнёв // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2024. – № 2 (283). – С. 194–200. – DOI: 10.52065/2520-2669-2024-283-22.
14. Song, Q. Research on intelligent green mining technology of open-pit mine / Q. Song // Min. Technol. – 2020. – Vol. 20. – P. 7–9.
15. Исследование органических составов для снижения аэротехногенной нагрузки от автомобильных дорог угольных разрезов / А. В. Кацубин, С. В. Ковшов, И. С. Ильяшенко, В. М. Маринина // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 1. – С. 63–67. – DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-63-67.
16. Подображин, С. Н. Исследование составов для предотвращения пыления открытых поверхностей при добыче угля / С. Н. Подображин // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2022. – № 1. – С. 67–74.
17. Рыбичев, А. А. Оценка эффективности пылеподавления с использованием смачивающих растворов / А. А. Рыбичев, Б. П. Пернебек // Уголь. – 2023. – № 12. – С. 60–63. – DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-60-63.
18. Abnormal concentration and origin of heavy hydrocarbon in upper permian coal seams from Enhong syncline, Yunnan, China / Fengjuan Lan, Yong Qin, Ming Li [et al.] // Journal of Earth Science. – 2012. – No 23. – P. 842–853. – DOI: 10.1007/s12583-012-0294-x.
19. Эффективность укрепления техногенного грунта минеральными модификаторами / Т. В. Дмитриева, Р. П. Куцына, А. А. Безродных [и др.] // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2019. – № 7. – С. 14–23.
20. Исмаилов, Б. Т. Экономико-математическая модель оценки эколого-экономической эффективности мер по снижению пылегазового загрязнения окружающей среды при открытой добыче доломитов / Б. Т. Исмаилов // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2012. – № 2. – С. 49–55.
7. Nemirovskij, A. V. Primenenie razlichnyh sposobov pylepodavleniya na poverhnosti hvostohranilishcha / A. V. Nemirovskij, E. N. Storozhev // Gornyj zhurnal. – 2021. – № 6. – С. 103–105.
8. Lyashenko, V. I. Obosnovanie prirodohrannyh tekhnologij i sredstv dlya pylepodavleniya poverhnostej hvostohranilishch gidrometallurgicheskogo proizvodstva / V. I. Lyashenko, A. A. Gurin // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. – 2018. – № 9. – С. 58–72.
9. Study on preparation and properties of antifreeze compound road dust suppressant / Shiyang Xia, Ziliang Song, Xiaoliang Zhao [et al.] // Scientific Reports. – 2024. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-67683-6> (date of access: 22.02.2025).
10. Kompozicii vodorastvorimyh polimerov dlya zakrepleniya zasolennyh peskov Arala / B. A. ZHumabaev, A. S. Allamuratova, K. SH. Zariptbaev, L. G. Ajmurzaeva // Universum: himiya i biologiya: elektron. nauchn. zhurn. – 2023. – № 2 (104). – URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/14944> (data obrashcheniya: 14.02.2025).
11. Vliyaniye prirody sopolimerov akrilonitrila na himicheskij sostav produktov ih shchelochnoy gidroliza / L. P. Krul', L. B. YAkimcova, YU. I. Matushevich, D. V. Krakodeev // Vesci NAN Belarusi. Ser. him. nauk. – 2000. – № 1. – С. 103–105.
12. Zlotnikov, I. I. SOZH dlya mekhanicheskoy obrabotki stekla na osnove rastvorov polimerov / I. I. Zlotnikov, P. A. Hilo, M. I. Zubrickij // Trenie i iznos. – 2007. – T. 28, № 3. – С. 301–304.
13. Nevzorova, A. B. Nakopleniye othodov proizvodstva i ih vliyaniye na sostoyaniye podzemnyh vod v Respublike Belarus' / A. B. Nevzorova, O. V. SHershnyov // Trudy BGTU. Ser. 2, Himicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geoekologiya. – 2024. – № 2 (283). – С. 194–200. – DOI: 10.52065/2520-2669-2024-283-22.
14. Song, Q. Research on intelligent green mining technology of open-pit mine / Q. Song // Min. Technol. – 2020. – Vol. 20. – P. 7–9.
15. Issledovaniye organicheskikh sostavov dlya snizheniya aerotekhnogennoj nagruzki ot avtomobil'nyh dorog ugo'lynyh razrezov / A. V. Kacubin, S. V. Kovshov, I. S. Il'yashenko, V. M. Marinina // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. – 2020. – № 1. – С. 63–67. – DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-63-67.
16. Podobrazhin, S. N. Issledovaniye sostavov dlya predotvrashcheniya pyleniya otkrytyh poverhnostej pri dobyche uglya / S. N. Podobrazhin // Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugo'lynoy promyshlennosti. – 2022. – № 1. – С. 67–74.
17. Rybichev, A. A. Ocenka effektivnosti pylepodavleniya s ispol'zovaniem smachivayushchih rastvorov / A. A. Rybichev, B. P. Pernebek // Ugol'. – 2023. – № 12. – С. 60–63. – DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-60-63.
18. Abnormal concentration and origin of heavy hydrocarbon in upper permian coal seams from Enhong syncline, Yunnan, China / Fengjuan Lan, Yong Qin, Ming Li [et al.] // Journal of Earth Science. – 2012. – No 23. – P. 842–853. – DOI: 10.1007/s12583-012-0294-x.
19. Effektivnost' ukrepleniya tekhnogennoy grunta mineral'nym modifikatorami / T. V. Dmitrieva, R. P. Kucyna, A. A. Bezrodnyh [i dr.] // Vestnik BGTU im. V. G. SHuhova. – 2019. – № 7. – С. 14–23.
20. Ismailov, B. T. Ekonomiko-matematicheskaya model' ocenki ekologo-ekonomicheskoy effektivnosti mer po snizheniyu pylegazovogo zagryazneniya okruzhayushchej sredy pri otkrytoj dobyche dolomitov / B. T. Ismailov // Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta. – 2012. – № 2. – С. 49–55.

References

1. Utilizatsiya othodov Gomel'skogo himicheskogo zavoda s polucheniem tovarnoj produkcii / A. G. Gubskaya, T. V. Volovik, A. P. Gapotchenko, I. N. Gorbach // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona: sb. nauch. tr. / In-t BelNIISt; redkol.: O. N. Leshkevich [i dr.]. – Minsk, 2019. – Vyp. 11. – С. 89–107. – DOI: 10.35579/2076-6033-2019-11-07.
2. SHershnev, O. V. Ocenka vozdeystviya othodov fosfogipsa na komponenty okruzhayushchej sredy / O. V. SHershnev // Ekologicheskij vestnik. – 2016. – № 2. – С. 97–103.
3. Semashko, A. V. Ekologicheskie problemy Soligorskogo gornopromyshlennogo rajona / A. V. Semashko, S. A. Fedotova // Sbornik materialov 72-j studencheskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, 20–28 aprelya 2016 g. / Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet. – Minsk, 2016. – С. 264–267.
4. Laverov, N. P. Fundamental'nye aspekty osvoeniya resursov nefiti i gaza i shel'fa Rossii: strategiya, perspektivy i problemy / N. P. Laverov, V. I. Bogoyavlenskij, I. V. Bogoyavlenskij // Arktika: ekologiya i ekonomika. – 2016. – № 2. – С. 4–13.
5. Maksimov, A. D. Burovye othody: problemy i resheniya / A. D. Maksimov // Promyshlennost' i ekologiya Severa. – 2011. – № 1. – С. 48–49.
6. Nevzorova, A. B. Vliyaniye izmeneniya klimata na sferu obrashcheniya s aktivnym ilom stochnykh vod / A. B. Nevzorova. – Gomel' : GGTU im. P. O. Suhogo, 2022. – 109 s.

Материал поступил 06.03.2025, одобрен 10.03.2025, принят к публикации 13.03.2025

УДК 551.525(476.1)

ОЦЕНКА КОЛЕБАНИЙ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ И СТРАНАХ ЕВРОПЫ

А. А. Волчек¹, Т. Е. Зубрицкая²

¹ Д. г. н. РФ и РБ, профессор, профессор кафедры природообустройства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

² Старший преподаватель кафедры природообустройства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: zte0607@yandex.ru

Реферат

Вода – жизненно важный ресурс, который играет ключевую роль в обеспечении устойчивого развития общества и экономики. В условиях глобальных изменений климата, численности населения и увеличения потребления ресурсов управление водными ресурсами становится одной из самых актуальных задач для стран всего мира. Республика Беларусь, обладая значительными водными ресурсами, сталкивается с необходимостью оптимизации водопотребления в различных секторах экономики, таких как сельское хозяйство, промышленность и коммунально-бытовое хозяйство.

В последние годы наблюдаются значительные колебания в объемах водопотребления, что обусловлено как внутренними факторами, так и внешними вызовами. Изменения климата приводят к изменению режимов осадков и температур, что, в свою очередь, влияет на доступность водных ресурсов. Изменение численности населения и рост урбанизации создают дополнительные нагрузки на системы водоснабжения и водоотведения. Эффективность использования водных ресурсов в Беларуси не только влияет на экономическую стабильность, но и на экологическое состояние страны в целом.

Сравнение водопотребления в Беларуси с другими европейскими странами позволяет выявить общие тенденции и специфические различия в технологиях и системах управления водными ресурсами. Это также дает возможность обозначить ключевые проблемы, и в дальнейшем разработать стратегии эффективного использования водных ресурсов в различных секторах экономики и содействовать сохранению экологического баланса на рассматриваемой территории. Исследование данной темы имеет огромное значение не только для обеспечения водной безопасности, но и для достижения целей устойчивого развития на национальном и международном уровнях.

Ключевые слова: динамика водопотребления, водные ресурсы, отрасль экономики, промышленность, Беларусь, европейские страны.

ASSESSMENT OF FLUCTUATIONS IN WATER CONSUMPTION IN THE REPUBLIC OF BELARUS AND EUROPEAN COUNTRIES

A. A. Volchek, T. E. Zubrytskaya

Abstract

Water is a vital resource that plays a key role in ensuring the sustainable development of society and the economy. In the context of global climate change, population size and increased resource consumption water resources management is becoming one of the most urgent tasks for countries around the world. The Republic of Belarus, having significant water resources, is faced with the need to optimize water consumption in various sectors of the economy, such as agriculture, industry and public utilities.

In recent years, there have been significant fluctuations in the volume of water consumption, due to both internal factors and external challenges. Climate change leads to changes in precipitation and temperature regimes, which, in turn, affects the availability of water resources. Population change and increasing urbanization create additional pressures on water supply and sanitation systems. The efficiency of using water resources in Belarus not only affects economic stability, but also the ecological state of the country as a whole.

A comparison of water consumption in Belarus with other European countries reveals common trends and specific differences in technologies and water management systems. It also provides an opportunity to identify key issues and further develop strategies for the efficient use of water resources in various sectors of the economy and promote the preservation of the ecological balance in the territory under consideration. The study of this topic is of great importance not only for ensuring water security, but also for achieving sustainable development goals at the national and international levels.

Keywords: dynamics of water consumption, water resources, economic sector, industry, Belarus, European countries.

Введение

В настоящее время в мире одной из главных задач эффективно-го управления природными ресурсами является сохранение водных ресурсов. Ключевым условием для рационального водопотребления является наличие точной, полной и актуальной информации о состоянии водных ресурсов. Эта информация позволяет не только оценить фактическое потребление и использование воды, а также прогнозировать ее доступность в будущем.

Динамика водопотребления может существенно различаться для разных стран, так как она зависит от множества факторов, включая население, климатические условия, уровень развития и структуру экономики, доступность и эффективность систем водоснабжения и водоотведения, а также осведомленность населения о вопросах экономии воды.

В странах с недостаточной инфраструктурой и ограниченными ресурсами воды обычно наблюдается низкое водопотребление на душу населения. В таких регионах люди часто вынуждены собирать воду из источников на значительном удалении от своих домов и использовать ее с осторожностью.

В более развитых странах с развитой инфраструктурой и более высоким уровнем жизни обычно наблюдается более высокое водопотребление на душу населения. Это связано с более широким доступом к водоснабжению, большим количеством бытовых приборов, использующих воду, а также с более высоким уровнем потребления в целом.

Важным аспектом динамики водопотребления является экологическая устойчивость и сохранение водных ресурсов. Вода является ценным ресурсом, и ее неэффективное использование может привести к истощению подземных водоносных слоев, загрязнению водоемов и угрозе для экосистем.

Многие страны ведут работы по совершенствованию систем водоснабжения и водоотведения, внедрению технологий очистки воды. Активно принимают меры по сокращению потребления воды через образовательные программы и информационные кампании, тарифные политики или применение технологий эффективного использования воды. Это может включать в себя установку водосберегающих устройств, использование переработанной воды для полива или промышленных нужд, а также принятие законодательства, регулирующего использование водных ресурсов.

Применение современных технологий в управлении водоснабжением, а именно умных систем мониторинга позволяет в реальном времени отслеживать уровень водозаборов, качество воды и ее расход, что не только повышает эффективность управления водными ресурсами, но и способствует быстрому реагированию на возможные проблемы, такие как утечки или загрязнения.

Внедрение систем автоматического полива в сельском хозяйстве, использующих данные о влажности почвы и погодных условиях, позволяет значительно сократить потребление воды и оптимизировать использование водных ресурсов, что особенно важно в условиях изменения климата.

На международном уровне сотрудничество между странами становится все более актуальным. Многие реки и озера пересекают границы государств, и совместное управление трансграничными водными ресурсами является необходимым условием для их устойчивого использования. В условиях глобальных изменений климата и растущего давления на водные ресурсы, международное сотрудничество становится ключевым фактором в обеспечении правильного распределения воды и защиты экосистем.

Однако многие страны сталкиваются с вызовами, связанными с политическими и экономическими интересами. Конфликты из-за водных ресурсов могут возникать в условиях нехватки воды, особенно в регионах, где ресурсы ограничены. Поэтому важно развивать не только правовые, но и культурные аспекты сотрудничества, включая обмен знаниями и технологиями. Это может включать создание совместных исследовательских программ, обмен опытом в области технологий очистки и распределения воды, а также совместные проекты по восстановлению экосистем водоемов.

Не менее важным является и развитие правовой базы, регулирующей использование водных ресурсов. Эффективные законы и нор-

мы, направленные на защиту водоемов и рациональное использование воды, должны быть адаптированы к местным условиям и потребностям. Это включает разработку механизмов контроля за соблюдением законодательства, а также создание систем мониторинга и оценки состояния водных ресурсов. Важно, чтобы правовая база учитывала интересы всех заинтересованных сторон, включая местные сообщества, государственные органы. Только комплексный подход, объединяющий технологии, образование и правовые инициативы, сможет обеспечить устойчивое управление водными ресурсами. Это позволит не только сохранить водные запасы, но и обеспечить их рациональное использование в условиях глобальных изменений.

Таким образом, изменение водопотребления является сложным и разнообразным процессом, который зависит от множества факторов и требует комплексного подхода для обеспечения устойчивого использования водных ресурсов.

Целью настоящей работы является – оценка динамики водопотребления в Беларуси и странах Европы, а также выявление различий в эффективности использования водных ресурсов.

Результаты исследования и их обсуждение

По материалам статистической отчетности данные водопотребления были структурированы, проанализированы с представлением в виде иллюстраций для различных стран Европы [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8].

Для выявления тенденций и изменений в использовании природных вод в качестве основного показателя водопотребления рассматривается общее водопотребление за 2022 год десяти стран Европы (Беларусь, Украина, Литва, Латвия, Польша, Германия, Словакия, Чехия, Франция, Бельгия) с подразделением на отдельные отрасли (промышленное, сельскохозяйственное и коммунально-бытовое) (рисунок 1).

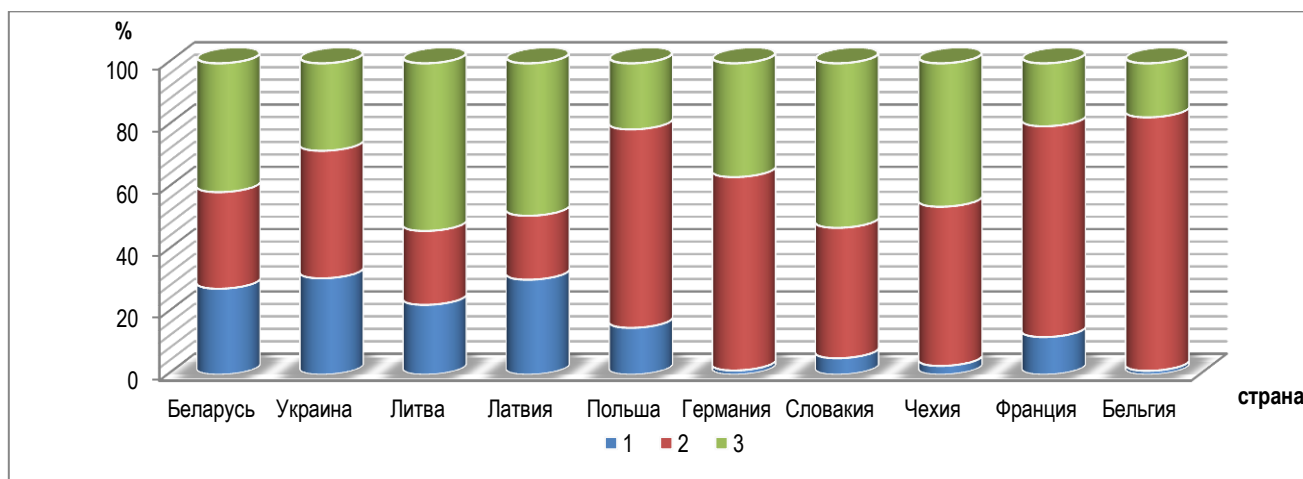


Рисунок 1 – Водопотребление в различных странах Европы, в % от общего водозабора

1 – сельскохозяйственное; 2 – промышленное; 3 – коммунально-бытовое

Каждая из этих отраслей имеет свои особенности и потребности в водных ресурсах.

В коммунально-бытовом хозяйстве основное внимание уделяется обеспечению населения питьевой водой. Фактический расход воды зависит от различных факторов: степени санитарно-технического оборудования зданий, привычек людей, вида застройки, структуры местной промышленности и промысла, графика работы крупных предприятий, вида производства, количества смен, климатических условий, качества поставляемой воды, способа и размера взимания платы за воду. Потери воды происходят в основном из-за утечек и испарения. Наибольшее потребление пресной воды, в процентах от общего водозабора по стране, в коммунально-бытовом секторе наблюдается в Литве (53,8 %) и Словакии (52,8 %).

Промышленный сектор является одним из основных потребителей воды. Модернизация производств и переход на замкнутые циклы водоснабжения позволяет значительно сократить общий объем водозабора в этой сфере. Вода используется повторно, и лишь не-

большая часть теряется безвозвратно. Это помогает снизить нагрузку на водные ресурсы и повысить эффективность использования воды. Наибольшее количество пресной воды, используемой в промышленном секторе, наблюдается в Бельгии и Франции, где этот показатель составляет соответственно 81,4 % и 67,7 % от общего водозабора по стране.

В сельском хозяйстве водопотребление часто превышает водозабор из-за высоких потерь, связанных с испарением и фильтрацией. Это делает данную отрасль для ряда стран одну из самых крупных потребителей воды, что подчеркивает необходимость внедрения более эффективных методов орошения и управления водными ресурсами.

В частности, в Украине и Латвии наблюдается наибольшее количество пресной воды, используемой в сельском хозяйстве, составляющее 31 % от общего водозабора по стране. Это свидетельствует о значительном влиянии аграрного сектора на водные ресурсы и подчеркивает важность разработки и внедрения инновационных технологий, направленных на снижение потерь воды.

Эффективные методы орошения, такие как капельное орошение и системы автоматизированного контроля, могут существенно снизить потребление воды и повысить урожайность. Кроме того, оптимизация управления водными ресурсами, включая сбор дождевой воды и использование сточных вод, может помочь в обеспечении устойчивого водоснабжения для сельского хозяйства.

Таким образом, для достижения устойчивого развития аграрного сектора необходимо улучшать водопользование, что в свою очередь позволит не только сохранить водные ресурсы, но и повысить продуктивность сельского хозяйства. Для достижения этих целей необходимо также учитывать влияние климатических изменений на доступность водных ресурсов. Изменения в температурных режимах и распределении осадков могут значительно повлиять на эффективность орошения и доступность пресной воды.

Качество воды также играет важную роль в каждом из этих секторов. Для питьевой воды и продукции пищевой отрасли предъявляются самые строгие требования к качеству. В то время как для промышленного использования допустимы менее жесткие стандарты, но все равно необходимо следить за тем, чтобы вода соответствовала необходимым нормам.

Таким образом, эффективное управление водными ресурсами требует комплексного подхода, учитывающего специфику каждого сектора и направленного на снижение потерь и повышение качества используемой воды.

На рисунке 2 представлена доля населения, для различных стран Европы, имеющий доступ к безопасным и надежным услугам водоснабжения [5]. Она включает в себя различные аспекты, такие как:

- качество воды должно соответствовать стандартам безопасности и не содержать вредных загрязняющих веществ;
- доступность услуг водоснабжения должны быть для всех слоев населения, включая уязвимые группы;
- надежность системы водоснабжения должна обеспечивать постоянный доступ к воде.

Этот показатель важен для оценки уровня развития инфраструктуры и качества жизни в регионе, а также для планирования мероприятий по улучшению доступа к чистой воде. Доля населения Беларуси, пользующаяся безопасной питьевой водой, составляет в 2022 году – 93,1 %, в Польше – 89 %, в Украине – 88 %. Максимальный показатель 100 % приходится на Францию, Бельгию и Германию из рассмотренных стран.

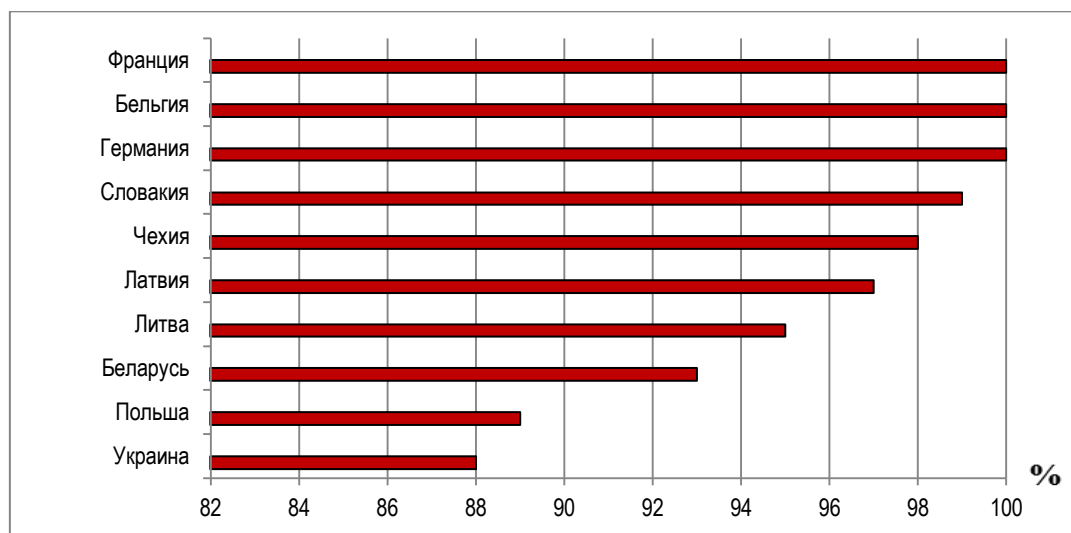


Рисунок 2 – Доля населения, пользующегося услугами водоснабжения, организованными с соблюдением требований безопасности (2022)

Потребности в воде для хозяйственно-питьевых целей включают в себя расходы в жилых зданиях (внутреннее водопотребление), расходы в общественных зданиях, на внешнее благоустройство зоны жилой застройки (коммунальное водопотребление). Фактический расход воды зависит от различных факторов: степени санитарно-технического оборудования зданий, привычек людей, вида застройки, структуры местной промышленности и промысла, графика работы крупных предприятий, количества смен, климатических условий, качества поставляемой воды, способа и размера взимания платы за воду. Последнее наиболее прослеживается для Республики Беларусь. После введения приборов учета воды в 1995 г. удельное водопотребление на хозяйственно-питьевые нужды начало падать и в 2022 году составило по Республике Беларусь 149 л/сут/чел. Если рассматривать в сравнении одну из европейских стран (Германия), то этот показатель за 2000–2022 гг. ниже и варьируется в пределах 121–131, что можно проследить на рисунке 3.

Можно предположить, что столь высокое удельное водопотребление в 2001 году, существенно превышающее нормативы многих стран, связано не с повышением комфортности быта основной массы белорусов и их расточительным потреблением пресной воды, а с утечками из разводящих водопроводных сетей, которые не учитывались отдельной статьей в отчетных документах, а списывались на бытовое потребление. Что же касается показателей удельного водопотребления в 2022 году, то оно близко к нормам, которые актуальны в европейских странах.

Использование современных сантехнических устройств, индивидуальных приборов учета воды, безусловно, приводит к значительной экономии воды. Однако немаловажный фактор в удельном водопотреблении играет численность населения. Так, в странах Прибалтики наблюдается демографический спад за период 1990–2022 гг., а соответственно и снижение в удельном водопотреблении. Динамику изменения численности населения в странах Европы можно проследить на рисунке 4 [9, 10, 11, 12].

Промышленное водопотребление в Беларуси также имеет свои особенности. Основные отрасли, такие как пищевая промышленность, энергетика и химическая промышленность, требуют значительных объемов воды для производства и охлаждения.

В период с 1990 по 2022 годы наблюдается тенденция к снижению водопотребления в промышленном секторе, что обусловлено переходом на современные водоемкие технологии, созданием систем оборотного и повторного водоснабжения, а также изменением государственной политики в области рационального использования водных ресурсов. По состоянию на 2022 год, доля оборотной воды в общем водопотреблении для промышленных нужд в Беларуси составляет 96,5 %. Внедрение технологий повторного использования и очистки сточных вод становится значимым направлением для сокращения общего водопотребления в стране [13,14,15,16].

Европейские страны активно развивают технологии очистки сточных вод и повторного использования воды в производственных процессах, что способствует значительному снижению общего водопотребления и уменьшению загрязнения окружающей среды.

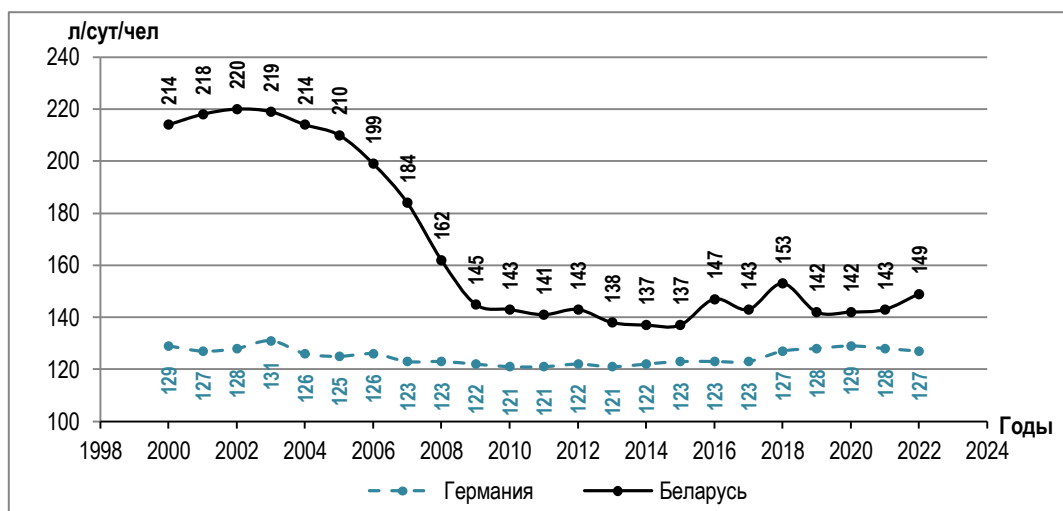


Рисунок 3 – Удельное водопотребление в Беларуси и Германии, л/сут/чел

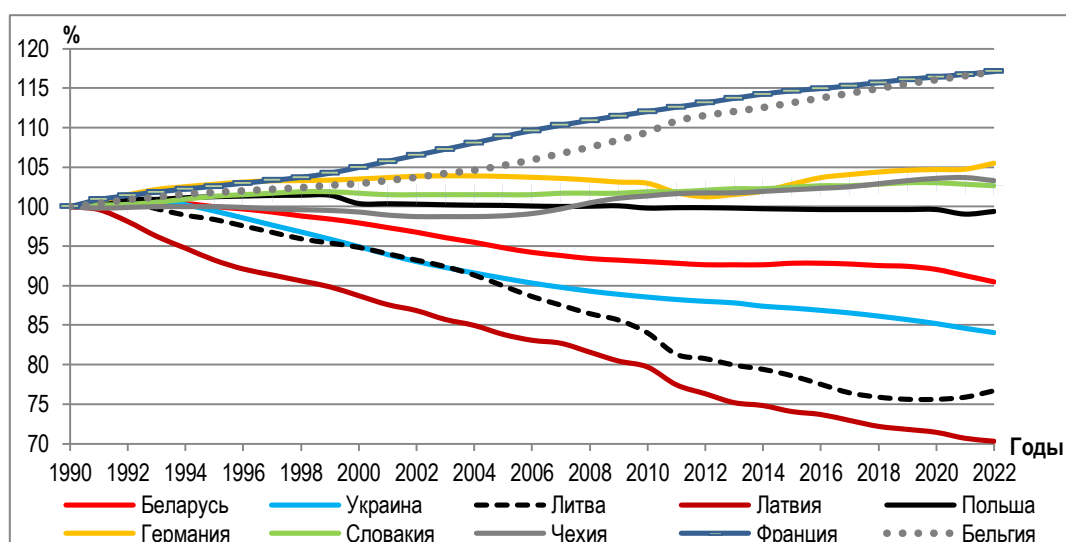


Рисунок 4 – Динамика численности населения в странах Европы, в %

Заключение

При оценке колебаний водопотребления в Республике Беларусь и странах Европы было определено нескольких ключевых факторов:

- в последние десятилетия в большинстве европейских стран наблюдается тенденция к снижению водопотребления на душу населения благодаря внедрению технологий водосбережения и повышению осведомленности людей о важности рационального использования водных ресурсов;

- водопотребление в странах Европы варьируется в зависимости от климатических условий, уровня урбанизации, экономического развития;

- в последние годы акцент на устойчивое развитие и охрану окружающей среды приводит к изменению подходов в водопользовании, а именно активно реализуются программы по улучшению качества водных ресурсов и снижению их загрязнения;

- изменение климата, рост населения и увеличение потребления воды могут стать серьезными проблемами для управления водными ресурсами. Необходимость адаптации к этим изменениям требует комплексного подхода к планированию и управлению водопотреблением.

В целом оценка колебаний водопотребления в Беларуси и странах Европы показывает необходимость дальнейшего развития эффективных стратегий управления водными ресурсами, направленных на устойчивое использование и защиту водных ресурсов.

Геоэкология

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-136-1-128-132>

Список цитированных источников

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь : [сайт]. – URL: <https://www.belstat.gov.by> (дата обращения: 24.02.2025).
2. Окружающая среда и природные ресурсы Республики Беларусь: Статистический сб. Минстат Республики Беларусь, НИИ статистики. – Минск, 2000 – 2022.
3. Статистические данные демографического потребления воды в разбивке по странам мира. – URL: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/water-consumption-by-country> (дата обращения: 24.02.2025).
4. Официальный веб-сайт Европейского союза. Статистика водных ресурсов. – URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Water_statistics#Water_as_a_resource (дата обращения: 24.02.2025).
5. Веб-сайт ООН-Водные ресурсы. – URL: <https://www.unwater.org/our-work/integrated-monitoring-initiative-sdg-6/indicator-611-proportion-population-using-safely> (дата обращения: 24.02.2025).
6. Статистика стран мира. Ресурсы пресной воды в странах мира. – URL: <https://svspb.net/danmark/voda.php> (дата обращения: 24.02.2025).
7. Портал watermagazine.ru. Состояние водных ресурсов Европы. – URL: <https://watermagazine.ru/novosti/za-rubezhom/24340-sostoyanie-vodnykh-resursov-evropy-chast-pervaya.html> (дата обращения: 24.02.2025).

8. Статистика водных ресурсов. – URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waterstatistics&action=statep-seat&lang=ru> (дата обращения: 24.02.2025).
9. Станайтис, А. К. Население Литвы во второй половине XX – начале XXI вв. / А. К. Станайтис, С. А. Станайтис // Псковский региональный журнал. – 2012. – № 14. – С. 74–84.
10. Статистические данные о численности населения стран мира. – URL: <https://countrymeters.info/ru> (дата обращения: 24.02.2025).
11. Статистические данные о численности населения Европы. – URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/demography-2024?ettrans=ru> (дата обращения: 24.02.2025).
12. Статистические данные о численности населения Бельгии. – URL: <https://database.earth/population/belgium> (дата обращения: 24.02.2025).
13. Волчек, А. А. Использование водных ресурсов в Республике Беларусь / А. А. Волчек, Т. Е. Зубрицкая // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2014. – № 2 (86). – С. 29–33.
14. Волчек, А. А. Проблемы водопотребления Беларуси / А. А. Волчек, Т. Е. Зубрицкая // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2016. – № 2 (98). – С. 7–10.
15. Волчек, А. А. Использование водных ресурсов Беларуси и их дифференциация по основным водосборам / А. А. Волчек, Т. Е. Зубрицкая // Водное хозяйство России. – 2017. – № 5. – С. 16–33.
16. Волчек, А. А. Водопотребление в областных центрах Республики Беларусь / А. А. Волчек, Т. Е. Зубрицкая, Н. Н. Шешко // Вода Magazine. – 2018. – № 4. – С. 46–52.
17. Волчек, А. А. Динамика распределения водных ресурсов Беларуси между секторами экономики / А. А. Волчек, Т. Е. Зубрицкая // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2019. – № 2 (115). – С. 6–9.
18. Волчек, А. А. Дифференцированная оценка колебаний водопотребления в Республике Беларусь / А. А. Волчек, Т. Е. Зубрицкая // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания. ICEP – 2022 : сб. тр. V Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 50-летию кафедры природообустройства, Брест, 26–28 октября 2022 г. : в 2 частях / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет ; редкол.: А. А. Волчек [и др.] ; науч. ред. А. А. Волчек, О. П. Мешик. – Часть 2. – С. 61–66.
19. Волчек, А. А. Влияние различных отраслей экономики на динамику водопотребления в Беларуси / А. А. Волчек, Т. Е. Зубрицкая // Вестник БГТУ. Технические науки (строительство, машиностроение, геоэкология); экономические науки. – 2024. – № 1 (133). – С. 156–159.
20. Волчек, А. А. Оценка колебаний водопотребления в Белорусском Полесье / А. А. Волчек, Т. Е. Зубрицкая // Материалы I Белорусского географического конгресса: к 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 70-летию Белорусского географического общества, Минск, 8–13 апр. 2024 г. : в 7 ч. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: Е. Г. Кольмакова (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2024. – Ч. 1. Современные проблемы гидрометеорологии. – С. 65–70.
4. Oficial'nyj veb-sajt Evropejskogo soyuza. Statistika vodnyh resursov. – URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Water_statistics#Water_as_a_resource (дата обращения: 24.02.2025).
5. Veb-sajt OON-Vodnye resursy. – URL: <https://www.unwater.org/our-work/integrated-monitoring-initiative-sdg-6/indicator-611-proportion-population-using-safely> (дата обращения: 24.02.2025).
6. Statistika stran mira. Resursy presnoj vody v stranah mira. – URL: <https://svspsb.net/danmark/voda.php> (дата обращения: 24.02.2025).
7. Portal watermagazine.ru. Sostoyanie vodnyh resursov Evropy. – URL: <https://watermagazine.ru/novosti/za-rubezhom/24340-sostoyanie-vodnykh-resursov-evropy-chast-pervaya.html> (дата обращения: 24.02.2025).
8. Statistika vodnyh resursov. – URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Water_statistics&action=statep-seat&lang=ru (дата обращения: 24.02.2025).
9. Stanajitis, A. K. Naselenie Litvy vo vtoroj polovine HKH – nachale XXI vv. / A. K. Stanajitis, S. A. Stanajitis // Pskovskij regionologicheskij zhurnal. – 2012. – № 14. – С. 74–84.
10. Statisticheskie dannye o chislennosti naseleniya stran mira. – URL: <https://countrymeters.info/ru> (дата обращения: 24.02.2025).
11. Statisticheskie dannye o chislennosti naseleniya Evropy. – URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/demography-2024?ettrans=ru> (дата обращения: 24.02.2025).
12. Statisticheskie dannye o chislennosti naseleniya Bel'gii. [Elektronnyj resurs] – URL: <https://database.earth/population/belgium> (дата обращения: 24.02.2025).
13. Volchek, A. A. Ispolzovanie vodnyh resursov v Respublike Belarus' / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya // Vestnik BGTU. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya. – 2014. – № 2 (86). – С. 29–33.
14. Volchek, A. A. Problemy vodopotrebleniya Belarusi / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya // Vestnik BGTU. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya. – 2016. – № 2 (98). – С. 7–10.
15. Volchek, A. A. Ispolzovanie vodnyh resursov Belarusi i ih differenciatsiya po osnovnym vodosboram / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya // Vodnoe hozyajstvo Rossii. – 2017. – № 5. – С. 16–33.
16. Volchek, A. A. Vodopotreblenie v oblastnyh centrakh Respubliki Belarus' / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya, N. N. SHeshko // Voda Magazine. – 2018. – № 4. – С. 46–52.
17. Volchek, A. A. Dinamika raspredeleniya vodnyh resursov Belarusi mezhdru sektorami ekonomiki / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya // Vestnik BGTU. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya. – 2019. – № 2 (115). – С. 6–9.
18. Volchek, A. A. Differencirovannaya ocenka kolebanij vodopotrebleniya v Respublike Belarus' / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya // Aktual'nye nauchno-tehnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya. ICEP – 2022 : sb. tr. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoj 50-letiyu kafedry prirodobustrojstva, Brest, 26–28 oktyabrya 2022 g. : v 2 chastyah / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet ; redkol.: A. A. Volchek [i dr.] ; nauch. red. A. A. Volchek, O. P. Meshik. – CHast' 2. – С. 61–66.
19. Volchek, A. A. Vliyanie razlichnyh otraslej ekonomiki na dinamiku vodopotrebleniya v Belarusi / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya // Vestnik BGTU. Tekhnicheskie nauki (stroitel'stvo, mashinostroyeniye, geoekologiya); ekonomicheskie nauki. – 2024. – № 1 (133). – С. 156–159.
20. Volchek, A. A. Ocenka kolebanij vodopotrebleniya v Belorusskom Poles'e / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya // Materialy I Belorusskogo geograficheskogo kongressa: k 90-letiyu fakul'teta geografii i geoinformatiki Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta i 70-letiyu Belorusskogo geograficheskogo obshchestva, Minsk, 8–13 apr. 2024 g. : v 7 ch. / Belorus. gos. un-t ; redkol.: E. G. Kol'makova (gl. red.) [i dr.]. – Minsk : BGU, 2024. – CH. 1. Sovremennyye problemy gidrometeorologii. – С. 65–70.

References

1. Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus' : [sajt]. – URL: <https://www.belstat.gov.by> (дата обращения: 24.02.2025).
2. Okruzhayushchaya sreda i prirodnye resursy Respubliki Belarus': Statisticheskij sb. Minstat Respubliki Belarus', NII statistiki. – Minsk, 2000 – 2022.
3. Statisticheskie dannye demograficheskogo potrebleniya vody v razvivke po stranam mira. – URL: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/water-consumption-by-country> (дата обращения: 24.02.2025).

Материал поступил 15.03.2025, одобрен 24.03.2025, принят к публикации 25.03.2025

УДК 544.723

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИОНОВ Cu(II) ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ КОМПОЗИЦИОННЫМ СОРБЕНТОМ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯВ. А. Горбунова¹, Л. М. Слепнева², А. О. Черная³¹ К. х. н., доцент кафедры «Инженерная экология», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: ecology@bntu.by² К. х. н., доцент кафедры «Инженерная экология», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь³ Аспирант кафедры «Инженерная экология», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Реферат

Синтезированы образцы термически модифицированного при разных температурах композиционного сорбента на основе крупнотоннажных карбонат- и силикатсодержащих техногенных отходов. Определены значения статической сорбционной емкости этих материалов по ионам Cu(II) , при этом получены кинетические зависимости сорбции катионов меди из модельных водных растворов CuSO_4 . В исследованном диапазоне температуры обработки и дисперсности образцов сорбционная емкость по ионам Cu(II) составила 4,0–12,5 мг/г. Максимальная скорость сорбции, по оценочным данным, достигается в первые 30 минут процесса взаимодействия с раствором. Максимальную статическую сорбционную емкость по ионам меди показал образец сорбента с дисперсность частиц менее 1 мм, прокаленный при 973 К, и с предварительной щелочной активацией силикатной составляющей использованного сорбционного материала.

Ключевые слова: отходы, карбонат кальция, силикат кальция, сорбент, сорбционная емкость, катионы меди.

REMOVAL OF Cu(II) IONS FROM WATER SOLUTIONS BY COMPOSITIONAL SORBENTS FROM TECHNOGENIC MATERIALS

V. A. Gorbunova, L. M. Slepneva, A. O. Chernaya

Abstract

The samples of composite sorbent thermally modified at different temperatures, obtained on the basis of large-tonnage carbonate- and silicate-containing technogenic waste, were synthesized. The values of static sorption capacity of these materials for Cu(II) ions were determined, and the kinetic dependences for copper cations' sorption from model aqueous solutions of CuSO_4 were obtained. For the studied interval of processing temperature and sample particle sizes, the sorption capacity for Cu(II) ions was in the 4.6–12.6 mg/g range. The maximum sorption rate, according to estimated data, was achieved in the first 30 minutes of the interaction with the solution. The maximal static sorption capacity for copper ions was shown by a sorbent sample with a particle size of less than 1 mm, calcined at 973 K, and with preliminary alkaline activation of the silicate component of the used sorption material.

Keywords: waste, calcium carbonate, calcium silicate, sorbent, sorption capacity, copper cations.

Введение

В результате хозяйственной деятельности промышленных предприятий (горнодобывающих, машиностроительных, приборостроительных) образуются содержащие ионы тяжелых металлов (ТМ) технологические сточные воды, которые обязательно подвергаются обработке с целью исключить попадание токсичных металлов в окружающую среду. Для извлечения ТМ из сточных вод применяются различные методы и подходы. При выборе способа очистки учитываются такие факторы, как тип производства, объемы стоков, концентрация и вид катионов ТМ, затраты на реализацию. Чаще всего используются реагентные, электрохимические, ионообменные, сорбционные методы очистки, обладающие как своими преимуществами, так и недостатками. Для более глубокой очистки промстоков от ТМ часто используют комбинированные способы очистки (реагентный + сорбционный, электрокоагуляция + нанофильтрация и др.). Эффективность сорбционной очистки от ионов ТМ в значительной степени определяется выбором подходящего сорбционного материала, его происхождением (природный, синтетический, техногенный отход), стоимостью, эксплуатационными характеристиками, условиями регенерации и/или утилизации. Использование недорогих доступных природных материалов, а также различных отходов и вторичных продуктов производства минерального, органического и органоминерального происхождения является экономически более выгодным и целесообразным. Адсорбционный массоперенос – это процесс, при котором ионы ТМ переходят из жидкой фазы на поверхность твердого сорбента и связываются либо вандерваальсовыми силами (физическая адсорбция) или за счет химического взаимодействия образуют с различными функциональными группами сорбента труднорастворимые и/или координационные соединения (хемосорбция). Наибольшей сорбционной способностью среди природных материалов обладают различные глинистые

алюмосиликатные породы, оксиды алюминия, железа, марганца, карбонатные минералы также могут участвовать в поглощении ионов ТМ, образуя труднорастворимые соли и гидроксиды. Эффективные сорбенты, изготовленные на основе побочных промышленных продуктов и отходов, помимо решения проблем очистки воды, способствуют утилизации многочисленных и часто крупнотоннажных отходов, снижая тем самым экологическую нагрузку на окружающую среду.

Композиционный силикатно-карбонатный сорбент, получение, сорбция ионов меди

Минеральные отходы промышленности (строительной, энергетической, горнодобывающей, металлургической) делятся на карбонатные, силикатные, известковые, железистые, гипсовые, щелоче-содержащие, часто они по своему составу близки к природному карбонат- и силикатсодержащему сырью. Возможности использования различных кальций- и кремнийсодержащих отходов в качестве вторичных ресурсов для получения разнообразных полезных продуктов, в том числе и сорбентов ионов ТМ, отражены в работе [1]. Среди минеральных сорбентов (природных и синтетических) с кристаллическим строением максимальной сорбцией по отношению к катионам ТМ обладают цеолиты, затем идут основные соли ТМ и потом разнообразные глинистые материалы. Кроме этого установлено, что сорбционная способность природных минералов (кварца, глины), содержащих соединения железа, выше, чем без них [2].

Научные публикации по сорбционной очистке промышленных сточных вод от ТМ, в том числе и от Cu(II) , обширны и разнообразны [3–9]. Так, в работе [10] представлены результаты изучения кинетики сорбции ионов меди и эффективности очистки глинистыми материалами на основе монтмориллонита, максимальная сорбционная емкость по ионам Cu(II) составила 0,8–1 мг/г, сорбция катионов

меди диатомитом в зависимости от температуры варьировалась 0,77 – 1 мг/г. Анализ научно-технической информации по данной теме показал [11–13], что в качестве сорбентов ионов ТМ изучаются и уже успешно применяются сорбенты на карбонат- и силикатсодержащих природных минералах (известняк, доломит, мрамор и др.), а также подобных отходах, в кристаллических решетках которых катионы ТМ замещают ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} . Минеральные строительные отходы, содержащие CaO , MgO , SiO_2 , Ca(Mg)SiO_3 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaSO_4 , могут активно связывать ионы ТМ в труднорастворимые соли и основания. Максимальная сорбционная емкость материала на основе бетонной крошки [14] по ионам меди составила 20,43 мг/г, механизм связывания меди – хемосорбция, на поверхности бетонных частиц образуется слой труднорастворимых основных солей меди. Многочисленные исследования минеральных сорбентов природного и синтетического происхождения показывают, что, несмотря на термостабильность и радиационную стойкость, селективность к ионам ТМ, эти материалы часто имеют неудовлетворительные эксплуатационные характеристики (механические, гидродинамические, кинетические). Современные научно-практические исследования в области очистки воды от тяжелых металлов указывают на возросший интерес к композиционным (модифицированным) сорбентам неорганической, органической или смешанной природы. В многочисленных работах [15] показано, что именно сложные композиции различных веществ позволяют получать сорбционные материалы, сочетающие в себе высокую сорбционную емкость, селективность к ионам ТМ и удовлетворительные эксплуатационные характеристики. Среди таких сложных материалов стоит отметить композиции на основе модифицированных глинистых материалов, фосфат-, карбонатсодержащие сорбенты на минеральной основе с органическими модификаторами, серосодержащие органоминеральные сорбенты, модифицированные силикаты, а также сорбенты с активной нанодисперсной оксидной и гидроксидной фазой и др. [16]. Благодаря достижениям хемоинформатики все чаще используется моделирование процессов сорбционной очистки и целенаправленный дизайн композиционных (модифицированных) сорбентов. Модифицирован-

ные нанокмпозитные углеродные нанотрубки с высокой удельной поверхностью имеют емкость по Cu(II) – 40–47 мг/г [17]. Композиционный сорбент на основе шлама содового производства (CaCO_3 , Ca(OH)_2) [18] обладает значительной сорбционной емкостью по Cu(II) – 35 мг/г. В данной работе на основе отходного карбонатсодержащего шлама разработан гранулированный сорбент с высокой прочностью на истирание за счет использования в качестве вяжущего жидкого стекла. Композиционный органоминеральный магнитный сорбционный материал на основе ферритизированного гальваншлама, терморасширенного графена и хитозана показал максимальную сорбционную емкость по Cu(II) – 6,9 ммоль/г. [19].

Цель работы: оценить возможность получения композиционного силикатного сорбента из крупнотоннажных отходов: карбонатного шлама водоподготовки ТЭЦ и мелкодисперсного (менее 20 мкм) гранитного отсева; получить твердофазным взаимодействием в трех режимах образцы композиционного карбонат-силикатного сорбента и изучить способность этого материала к сорбции ионов меди из модельных водных растворов сульфата меди.

Мелкодисперсный шлам водоподготовки (ТЭЦ 4, г. Минск) содержит в основном Ca(Mg)CO_3 – 80–82 мас. % и Fe_2O_3 – 10–15 мас. %. Гранитный мелкий отсев (гранитная пыль) образуется в больших объемах при добыче и переработке гранита, его состав зависит от месторождения, нами использовался отсев РУП «Гранит» (г. Микашевичи), основные компоненты: SiO_2 – 60–62 %, Al_2O_3 – 10–15 %, Fe_2O_3 – 10–15 %, кроме этого небольшие количества FeO , K_2O , MnO_2 , TiO_2 .

Был выполнен предварительный термодинамический анализ на базе программы моделирования термодинамики многокомпонентных систем ТЕРРА (разработки МГТУ им. Баумана) [20] для смеси карбонатный шлам / гранитный отсев 1:1 по массе в температурном диапазоне 300–1300 К (рисунок 1). Оценочный состав композита в молях на кг композита при разных температурах представлен в таблице 1.

В мелкодисперсной твердофазной системе начиная с 550 К возможно образование силикатов магния и кальция по реакции $\text{Ca(Mg)CO}_3 + \text{SiO}_2 = \text{Ca(Mg)SiO}_3 + \text{CO}_2$.

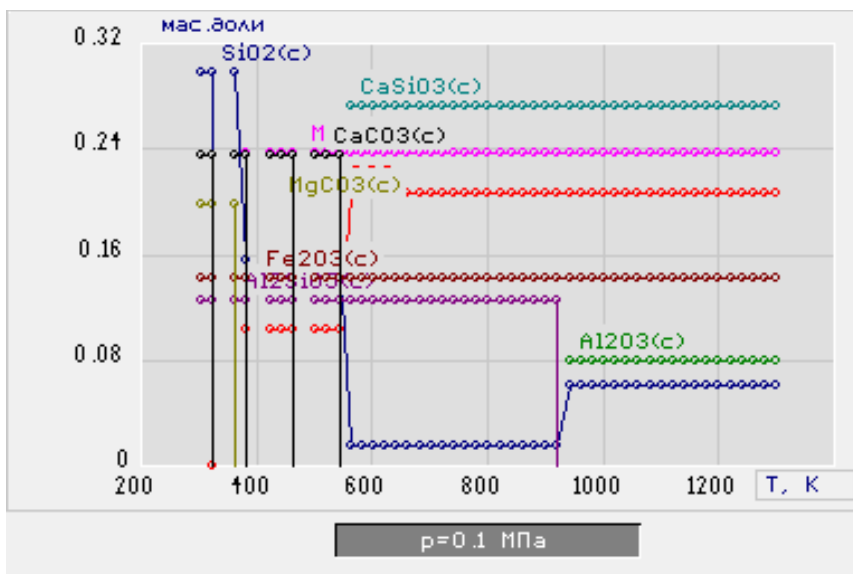


Рисунок 1 – Расчетная зависимость термодинамически равновесного компонентного состава от температуры (диапазоне 300–1300 К) для смеси карбонатный шлам + гранитный отсев при соотношении 1:1 по массе

Таблица 1 – Расчетный термодинамически равновесный состав карбонат-силикатной смеси

Основные фазы в расчетной термодинамической системе, моль/кг реакционной смеси									
Температура	CO_2	SiO_2	Al_2O_3	Al_2SiO_5	Fe_2O_3	MgSiO_3	CaSiO_3	CaCO_3	MgCO_3
550 К	2,35	2,59	–	0,778	0,894	2,30	–	2,35	–
600 К	4,7	0,24	–	0,778	0,894	2,30	2,35	–	–
800 К	4,7	0,24	–	0,778	0,894	2,30	2,35	–	–
1000 К	4,7	1,018	0,778	–	0,894	2,30	2,35	–	–

Термодинамические расчеты показали, что при термообработке исходной смеси можно получить композиционный силикатный материал, содержащие силикаты кальция и магния до 70 %, а также некоторое количество Fe_2O_3 , Al_2O_3 , алюмосиликата, некоторое количество карбонатной фазы. С 500 К в системе возможно выделение CO_2 , что при выборе оптимального массового соотношения по исходным компонентам и режима термообработки будет способствовать поризации сорбционной композиции и увеличению удельной поверхности материала, доступной для связывания катионов меди.

Технология получения композиционного силикатного сорбента: карбонатный шлам и гранитный отсев смешивали по массе 1:1 в ступке, механически смесь активировали тщательным перетиранием с добавлением в качестве связующего 3–4 мас. % жидкого стекла. Один образец сорбента получали из гранитного отсева, прошедшего предварительную активацию в растворе NaOH при температуре 60 °C в течение 30 минут. Щелочная активация приводит к подтравливанию и поверхностной аморфизации минеральных гранитных частиц за счет выщелачивания из кристаллической решетки оксида алюминия и оксида кремния, которые, накапливаясь в растворе, могут образовывать в дальнейшем на поверхности частиц гранита гидросиликаты натрия. Гранулирование проводили либо окатыванием смеси в ступке, либо перетертую пластичную массу пропускали через мелкочаечистое сито. Гранулы сорбента сушили на воздухе в течение суток, затем образцы сорбента термообработывали при температурах 300 °C, 500 °C, 700 °C в течение 1 часа. После прокаливания образцы сортировали на две фракции по дисперсности гранул – до 1 мм и 1–5 мм. Остаточное содержание в сорбенте карбонатов оценивали по выделению CO₂ при взаимодействии материала с раствором HCl. Все образцы сорбента содержали остаточное количество карбонатной фазы, минимальное ее содержание 7–8 % присутствовало в образце, термообработанном при 700 °C. Таким образом, можно предположить, что синтезированный сорбент, по-видимому, представляет силикатно-карбонатный композит, содержащий некоторое количество Fe₂O₃, Al₂O₃, алюмосиликата.

Сорбцию ионов Cu(II) изучали на модельном растворе CuSO_4 с концентрацией меди 300 мг/л и $\text{pH} = 4,5\text{--}5$ в статических условиях. Образцы сорбента заливали модельным раствором сульфата меди в соотношении 1:100, пробы на анализ отбирали каждые 30 минут до момента достижения равновесия, концентрацию катионов меди определяли йодометрическим методом. Рассчитывали адсорбцию в мг/г сорбента (таблица 2), кинетические зависимости представлены на рисунке 2.

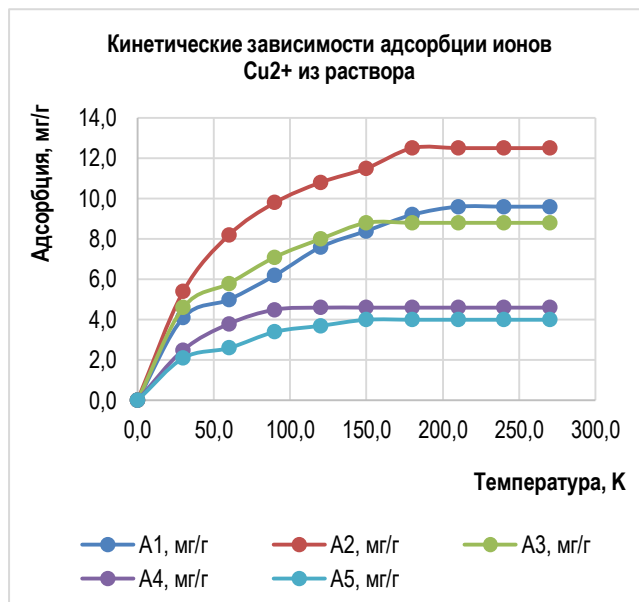


Рисунок 2 – Кинетические зависимости скорости адсорбции ионов Cu^{2+} (в мг меди/г сорбента) из раствора от времени (в минутах)

Таблица 2 – Результаты сорбции ионов Cu (II) из модельного раствора образцами композитного сорбента

Образец сорбента (режим получения)	Среднее остаточное содержание CO_3^{2-} (масс. %)	Время достижения сорбционного равновесия, часов	CCE, мг/г
300 °C (менее 1 мм) A4	25,4	1,5	4,6
500 °C (менее 1 мм) A3	12,5	2,5–3	8,8
700 °C (менее 1 мм) A1	10,3	3	9,6
Щелочная активация, 700 °C (менее 1 мм) A2	8,7	2,5–3	12,5
700 °C (1–5 мм) A5	9,3	2	4,0

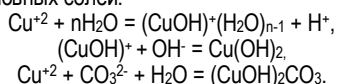


а – исходный сорбент; б – сорбент после сорбции Cu^{2+} из водного раствора

Рисунок 3 – Гранулы композиционного сорбента

Анализ кинетических кривых (рисунок 2) позволяет отметить, что в среднем сорбционное равновесие для всех образцов материалов достигается за 2–3 часа. Максимальная статическая сорбционная емкость (CCE) по ионам меди составила 12,5 мг/г для образца сорбента дисперсностью менее 1 мм, прокаленного при 700 °C с предварительной щелочной активацией гранитного отсева. Минимальную CCE по меди показал сорбент крупнокристаллический (1–5 мм, температура обработки 700 °C) – 4 мг/г, сорбционное равновесие было достигнуто за 2 часа. Связывание катионов меди из раствора наиболее интенсивно для всех образцов сорбентов протекает первые 30 минут процесса. Через час для композита наблюдалось снижение скорости сорбции меди, что, по-видимому, связано с диффузионными ограничениями, скоростью заполнения пор сорбента раствором. На рисунке 3 представлены фотографии образцов сорбента до и после сорбции ионов меди из раствора. Поверхность гранул сорбента практически полностью покрыта плотным зеленовато-голубым слоем труднорастворимых соединений меди (растворимость в воде $\text{Cu}(\text{OH})_2$ – $5 \cdot 10^{-7}$ моль/л, $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$ – $1,2 \cdot 10^{-8}$ моль/л), слой хорошо сцеплен с поверхностью сорбента, что говорит о преимущественно химическом связывании ионов меди данным композиционным карбонат-силикатным материалом.

Преобладающим механизмом поглощения ионов меди – это гидролиз катионов металла, а затем осаждение гидратированных гидроксоионов меди на поверхности сорбента в виде гидроксида меди или ее основных солей.



Известно, что на поверхности силикатов, алюмосиликатов может формироваться отрицательный заряд за счет присутствия на ребрах кристаллов функциональных анионов, которые и отвечают за способность связывать катионы ТМ в труднорастворимые или координационные соединения, чем больше отрицательно заряженных участков на поверхности сорбента, тем выше его поглощающая способность по ионам металлов.

Заключение

Синтезированный силикатно-карбонатный композиционный термически модифицированный сорбент из крупнотоннажных доступных и недорогих отходов показал максимальную CCE по ионам $\text{Cu}(\text{II})$ из модельных растворов – 12,5 мг/г; максимальная скорость сорбции для всех образцов сорбентов установлена в первые 30 минут процесса; сорбционное равновесие достигается в среднем за 2–3 часа. Извлечение ионов меди сорбентом из водного раствора протекает в результате сложного гетерогенно-диффузионного процесса, на поверхности гранул образуются хорошо связанные с материалом осадки основных солей меди или гидроксида. Карбонатные шламы, образующиеся при водоподготовке на ТЭС, мелкодисперсные гранитные отсева (гранитная пыль) можно рассматривать в качестве сырья для синтеза сорбционных материалов. Используя возможности хемоинформатики можно разрабатывать на базе этих отходов технологии изготовления и модификации (термической, химической) различных по составу и назначению дешевых сорбентов.

Список цитированных источников

- Акатьева, Л. Н. Развитие химико-технологических основ процессов переработки сырья для получения силикатов кальция и композиционных материалов: дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.11 / Акатьева Лидия Викторовна ; Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова, Российская академия наук. – Москва, 2014. – 328 л.
- Путилина, В. С. Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции: аналит. обзор / В. С. Путилина, И. В. Галицкая, Т. И. Юганова // Серия «Экология». Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2009. – Вып. 90. – 155 с.
- Шадрунова, И. В. Технология извлечения меди из стоков горнорудных предприятий окомкованными пиритными концентратами / И. В. Шадрунова, Е. А. Емельяненко, М. М. Емельяненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 1. – С. 276–281.
- Никифорова, Т. Е. Сорбция ионов меди (II) в гетерофазной системе «водный раствор – модифицированная целлюлоза» / Т. Е. Никифорова, В. А. Козлов, Д. А. Вокрува // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2023. – Т. 66, № 12. – С. 91–100. – DOI: 10.6060/ivkkt.20236612.6814.
- Пашкевич, М. А., Харько П. А. Применение композитной смеси для очистки кислых дренажных вод хвостового хозяйства от металлов / М. А. Пашкевич, П. А. Харько // Обогащение руд. – 2022. – № 4. – С. 40–47.
- Removal of Trace Cu^{2+} from Water by Thermo-Modified Micron Bamboo Charcoal and the Effects of Dosage / X. Li, W. Gui, U. Batzorig [et al.] // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – P. 7835.
- Sorption Extraction of Heavy Metal Ions from Wastewater by Natural and Synthetic Sorbents / R. Aubakirova, G. Daumova, N. Seraya, I. Afanasenkova // Chemical Engineering Transactions. – 2020. – Vol. 81. – P. 343–348. – DOI: 10.3303/CET2081058.
- Simultaneous adsorption of $\text{Cu}(\text{II})$, $\text{Zn}(\text{II})$, $\text{Cd}(\text{II})$ and $\text{Pb}(\text{II})$ from synthetic wastewater using NaP and LTA zeolites prepared from biomass fly ash / Mehmet Emin Küçük, İryna Makarava, Teemu Kinnarinen, Antti Häkkinen // Heliyon. – 2023. – Vol. 9(15): e20253. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20253.
- Młynarczykowska, A. Biosorption of Copper (II) Ions Using Coffee Grounds – A Case Study / A. Młynarczykowska, M. Orlof-Naturalna // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – P. 7693. – DOI: 10.3390/su16177693.
- Пимнева, Л. А. Очистка природных и промышленных вод от катионов меди диатомитом / Л. А. Пимнева // Успех современного естествознания. – 2022. – № 12. – С. 181–185.
- Годымчук, А. Ю. Исследование сорбционных процессов на природных минералах и их термомодифицированных формах / А. Ю. Годымчук, А. П. Ильин // Химия и технология воды. – 2003. – № 6. – С. 621–632.
- Меркулова, Е. Н. Эффективность использования природных карбонатов кальция в качестве коллекторов тяжелых цветных металлов / Е. Н. Меркулова, А. М. Жижаев, М. А. Чугуевская // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – № 15. – С. 486–491.
- Николаева, Л. А. Исследование утилизации шлама водоподготовки ТЭС в качестве сорбента при биологической очистке сточных вод промышленных предприятий / Л. А. Николаева // Вода: химия и экология. – 2012. – № 8. – С. 80–84.
- Юрк, В. М. Механизм сорбции ионов меди на поверхности бетонной крошки / В. М. Юрк, Е. С. Коковина, Ж. В. Шалыгина // Журнал физической химии. – 2022. Т. 96, № 6. – С. 888–894.
- Иканина, Е. В. Композиционные сорбенты для извлечения тяжелых металлов – итоги последних лет / Е. В. Иканина, В. Ф. Марков, М. И. Каляева // Бултеровские сообщения. – 2016. – Т. 48, № 11. – С. 101–113. – ROI: jbc-01/16-48-11-101.
- Марченко, Л. А. Влияние совместно-осажденных гидроксидов на сорбцию ионов тяжелых металлов / Л. А. Марченко, А. А. Марченко // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2009. – Т. 9, № 6. – С. 868–876.
- Removal of Copper(II) and Zinc(II) Ions in Water on a Newly Synthesized Polyhydroquinone/Graphene Nanocomposite Material: Kinetics, Thermodynamics and Mechanism / I. Ali, A. E. Burakov, A. V. Melezhih [et al.] // Materials Science inc. Nanomaterials & Polymers. – 2019. – Vol. 4. – P. 12708. – DOI: 10.1002/slct.201902657.
- Глушанкова, И. С. Модифицированные сорбенты на основе шлама содового производства для извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов и сточных вод / И. С. Глушанкова, Е. В. Калинина, Е. Н. Демина // Теоретическая и прикладная экология. – 2018. – № 3. – С. 100–108.
- Извлечение ионов меди и цинка из сточных вод сорбентом на основе хитозана / Е. А. Татаринцова, О. А. Арефьева, Л. Н. Ольшанская [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. – 2023. – № 1. – С. 148–153.
- Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory / M. Gorokhovskii, E. I. Karpenko, F. C. Lockwood [et al.] // Journal of the Energy Institute. – 2005. – № 4. – P. 157–171. – DOI: 10.1179/174602205x68261.

References

1. Aka'eva, L. N. Razvitie himiko-tehnologicheskikh osnov processov pererabotki syr'ya dlya polucheniya silikatov kal'ciya i kompozicionnykh materialov: dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.17.11 / Aka'eva Lidiya Viktorovna ; Institut metallurgii i materialovedeniya im. A. A. Bajkova, Rossijskaya akademiya nauk. – Moskva, 2014. – 328 l.
2. Putilina, V. S. Adsorbciya tyazhelykh metallov pochvami i gornymi porodami. Harakteristiki sorbenta, usloviya, parametry i mekhanizmy adsorbicii: analit. obzor / V. S. Putilina, I. V. Galickaya, T. I. YUganova // Seriya «Ekologiya». Novosibirsk : GPNTB SO RAN, 2009. – Vyp. 90. – 155 s.
3. SHadrunova, I. V. Tekhnologiya izvlecheniya medi iz stokov gornorudnykh predpriyatij okomkovannymi piritnymi koncentratami / I. V. SHadrunova, E. A. Emel'yanenko, M. M. Emel'yanenko // Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten'. – 2006. – № 1. – S. 276–281.
4. Nikiforova, T. E. Sorbciya ionov medi (II) v geterofaznoj sisteme «vodnyj rastvor – modifitsirovannaya cellyuloza» / T. E. Nikiforova, V. A. Kozlov, D. A. Vokurova // Izv. vuzov. Himiya i him. tekhnologiya. – 2023. – T. 66, № 12. – S. 91–100. – DOI: 10.6060/ivkkt.20236612.6814.
5. Pashkevich, M. A., Har'ko P. A. Primenenie kompozitnoj smesi dlya oчитki kislykh drenaznykh vod hvostovogo hozyajstva ot metallov / M. A. Pashkevich, P. A. Har'ko // Obogashchenie rud. – 2022. – № 4. – S. 40–47.
6. Removal of Trace Cu²⁺ from Water by Thermo-Modified Micron Bamboo Charcoal and the Effects of Dosage / X. Li, W. Gui, U. Batzorig [et al.] // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – P. 7835.
7. Sorption Extraction of Heavy Metal Ions from Wastewater by Natural and Synthetic Sorbents / R. Aubakirova, G. Daumova, N. Seraya, I. Afanasenkova // Chemical Engineering Transactions. – 2020. – Vol. 81. – P. 343–348. – DOI: 10.3303/CET2081058.
8. Simultaneous adsorption of Cu(II), Zn(II), Cd(II) and Pb(II) from synthetic wastewater using NaP and LTA zeolites prepared from biomass fly ash / Mehmet Emin Küçük, Iryna Makarava, Teemu Kinnarinen, Antti Häkkinen // Heliyon. – 2023. – Vol. 9(15): e20253. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20253.
9. Mlynarczykowska, A. Biosorption of Copper (II) Ions Using Coffee Grounds – A Case Study / A. Mlynarczykowska, M. Orlof-Naturalna // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – P. 7693. – DOI: 10.3390/su16177693.
10. Pimneva, L. A. Oчитka prirodnykh i promyshlennykh vod ot kationov medi diatomitom / L. A. Pimneva // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. – 2022. – № 12. – S. 181–185.
11. Godymchuk, A. YU. Issledovanie sorbtsionnykh processov na prirodnykh mineralakh i ih termomodifitsirovannykh formakh / A. YU. Godymchuk, A. P. Il'in // Himiya i tekhnologiya vody. – 2003. – № 6. – S. 621–632.
12. Merkuloва, E. N. Effektivnost' ispol'zovaniya prirodnykh karbonatov kal'ciya v kachestve kollektorov tyazhyolykh cvetnykh metallov / E. N. Merkuloва, A. M. ZHizhaev, M. A. CHuguevskaya // Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). – 2009. – № 15. – S. 486–491.
13. Nikolaeva, L. A. Issledovanie utilizatsii shlama vodopodgotovki TES v kachestve sorbenta pri biologicheskoy oчитke stochnykh vod promyshlennykh predpriyatij / L. A. Nikolaeva // Voda: himiya i ekologiya. – 2012. – № 8. – S. 80–84.
14. YUr, V. M. Mekhanizm sorbtsii ionov medi na poverhnosti betonnoj kroshki / V. M. YUr, E. S. Kokovina, ZH. V. SHalygina // ZHurnal fizicheskoy himii. – 2022. T. 96, № 6. – S. 888–894.
15. Ikanina, E. V. Kompozitsionnye sorbenty dlya izvlecheniya tyazhelykh metallov – itogi poslednykh let / E. V. Ikanina, V. F. Markov, M. I. Kalyaeva // Butlerovskie soobshcheniya. – 2016. – T. 48, № 11. – S.101–113. – DOI: jbc-01/16-48-11-101.
16. Marchenko, L. A. Vliyaniye sovmestno-osazhdennykh gidroksidov na sorbtsiyu ionov tyazhelykh metallov / L. A. Marchenko, A. A. Marchenko // Sorbtsionnye i hromatograficheskie processy. – 2009. – T. 9, № 6. – S. 868–876.
17. Removal of Copper(II) and Zinc(II) Ions in Water on a Newly Synthesized Polyhydroquinone/Graphene Nanocomposite Material: Kinetics, Thermodynamics and Mechanism / I. Ali, A. E. Burakov, A. V. Melezhih [et al.] // Materials Science inc. Nanomaterials & Polymers. – 2019. – Vol. 4. – P. 12708. – DOI: 10.1002/slct.201902657.
18. Glushankova, I. S. Modifitsirovannyye sorbenty na osnove shlama sodovogo proizvodstva dlya izvlecheniya ionov tyazhelykh metallov iz vodnykh rastvorov i stochnykh vod / I. S. Glushankova, E. V. Kalinina, E. N. Demina // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. – 2018. – № 3. – S. 100–108.
19. Izvlechenie ionov medi i cinka iz stochnykh vod sorbentom na osnove hitozana / E. A. Tatarincova, O. A. Arefeva, L. N. Ol'shanskaya [i dr.] // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. – 2023. – № 1. – S. 148–153.
20. Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory / M. Gorokhovskiy, E. I. Karpenko, F. C. Lockwood [et al.] // Journal of the Energy Institute. – 2005. – № 4. – P. 157–171. – DOI: 10.1179/174602205x68261.

Материал поступил 15.12.2024, одобрен 30.12.2024,
принят к публикации 30.12.2024

УДК 551.525(476.1)

ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ КЛИМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМЫХ ЗЕРНОВЫХ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

Ю. П. Городнюк¹, А. А. Волчек², С. В. Сидак³

¹ Магистр, аспирант кафедры природообустройства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: juliagirodniuk99@gmail.com

² Д. г. н. РФ и РБ, профессор, профессор кафедры природообустройства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

³ Магистр физ.-мат. н., старший преподаватель кафедры математики и информатики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: harchik-sveta@mail.ru

Реферат

На основании анализа многолетних данных за период 1981–2020 гг. установлена статистически значимая связь между урожайностью озимых зерновых и метеорологическими параметрами Брестского района. Сельское хозяйство во многом определяется погодными и климатическими условиями. Для достижения максимальной урожайности сельскохозяйственных культур требуются оптимальное сочетание тепла и влаги при рациональном пищевом режиме. При выращивании зерновых культур важно принимать во внимание их особенности и минимизировать негативные воздействия на растения. В статье представлены основные факторы, влияющие на урожайность озимых зерновых культур. Климат Брестского района, расположенного в западной части Восточно-Европейской равнины, является умеренно-континентальным. Современное климатическое потепление привело к значительному повышению температуры воздуха, частым оттепелям в зимний период, что может неблагоприятно влиять на урожайность озимых культур.

Разработана нами двухкомпонентная модель, позволяющая с высокой точностью (средняя абсолютная ошибка составила 1,8 ц/га в абсолютных и 7,2 % в относительных показателях) предсказывать урожайность озимых зерновых Брестского района. Модель представляет собой эффективный инструмент управления сельскохозяйственным производством, позволяющий учитывать климатические параметры при прогнозировании урожайности озимых зерновых. В ходе исследования были выявлены ключевые метеорологические факторы, оказывающие наибольшее влияние на урожайность. Результаты полученных исследований могут быть использованы управлениями по сельскому хозяйству и продовольствию для оценки планируемого валового сбора озимых зерновых, при разработке аграрной политики, планирования бюджета на поддержку сельского хозяйства, оптимизации структуры посевных площадей и мониторинга продовольственной безопасности.

Ключевые слова: изменение климата, температура воздуха, осадки, урожайность, регрессия, озимые зерновые, модель.

TWO-COMPONENT CLIMATE MODEL OF WINTER GRAIN YIELD AT THE REGIONAL LEVEL

Y. P. Haradniuk, A. A. Volchak, S. V. Sidak

Abstract

Based on the analysis of multi-year data for the period 1981–2020 a statistically significant relationship has been established between the yield of winter grain and the meteorological parameters of the Brest region. Agriculture is largely determined by weather and climate conditions. To achieve the maximum yield of agricultural crops, an optimal combination of heat and moisture is required with a rational food regime. When growing crops, it is important to take into account their features and minimize the negative effects on plants. The article presents the main factors affecting the yield of winter crops. The climate of the Brest district, located in the western part of the East European Plain, is moderately continental. Modern climate warming has led to a significant increase in air temperature, frequent warming in the winter, which can adversely affect the yield of winter crops.

We developed a two-component model that allows with high accuracy (the average absolute error was 1.8 c/ha in absolute and 7.2 % in relative terms) to predict the yield of winter grain Brest district. The model is an effective tool for managing agricultural production, allowing you to take into account climate parameters when predicting the yield of winter grains. During the study, key meteorological factors were identified that have the greatest impact on yield. The results of the obtained studies can be used by the agriculture and food departments to assess the planned gross harvest of winter grains, in the development of agricultural policy, planning the budget for supporting agriculture, optimizing the structure of sowing areas and monitoring food security.

Keywords: climate change, air temperature, precipitation, yield, regression, winter grains, model.

Введение

Озимые зерновые являются ведущей сельскохозяйственной культурой для условий Беларуси. Беларусь занимает 5-е место среди стран СНГ по среднему годовому производству зерна [1]. Урожайность озимых зерновых является ключевым фактором, способствующим устойчивому развитию государства, влияя на экономику, продовольственную безопасность, социальные аспекты и экологическую стабильность. Информация об ожидаемых оценках урожайности озимых зерновых культур играет важную роль в принятии решений на различных уровнях: от индивидуальных фермеров до государственных структур. Так, прогнозные оценки урожайности озимых зерновых культур используются для планирования посевов, выбора сортов и оптимизации агротехнических мероприятий, разработки государственной аграрной политики, устойчивых практик ведения хозяйства.

Урожайность озимых зерновых формируется под воздействием множества факторов. Показатели урожайности определяются наследственными свойствами растений и влиянием энергетического,

водного и пищевого режимов почвы и атмосферы, которые определяются климатическими факторами и уровнем агротехники. Потребности сельскохозяйственной культуры в тепле, влаге и питании в каждый период вегетационного цикла обусловлены эволюцией и проявляются в виде собственных оптимумов элементов среды [2].

Актуальность исследования влияния климатических условий на продуктивность сельскохозяйственного производства несомненна. Как отмечал К. А. Тимирязев, «климатические данные представляют интерес для сельского хозяйства тогда, когда известны требования, предъявляемые растениями». По мнению Н. И. Вавилова, «климатические факторы в стране, взятой в целом, являются определяющими в проблеме урожайности. Они сильнее экономики, сильнее техники». Исследование климатических ресурсов применительно к разным аспектам сельскохозяйственного производства представляет сложную задачу, так как все компоненты, входящие в нее (живые объекты и климат), характеризуются большой изменчивостью. Поэтому, чтобы дать климату сельскохозяйственную оценку, требуется устано-

вить количественные характеристики потребности культур в тепле, влаге и других необходимых факторах.

Ведущую роль в определении климатических особенностей региона играет именно циркуляция воздушных масс в атмосфере. Исследования показывают, что тенденция изменений климата в ближайшие десятилетия сохранятся. Существенное изменение условий произрастания сельскохозяйственных культур в результате глобального потепления климата требует корректировок в практике ведения сельского хозяйства, а также учитывать при разработке стратегии развития сельскохозяйственного производства и его адаптации к изменениям климата. Для этого необходимо иметь прогнозные показатели изменения климата на ближайшие десятилетия по отношению к базовому периоду. На территории Беларуси работа о взаимосвязи урожайности сельскохозяйственных культур и природно-климатических факторов проводится в Республиканском гидрометеорологическом центре, Научно-исследовательском институте почвоведения и агрохимии, Институте природопользования, Белорусском государственном университете. Этой проблемой занимаются Т. Н. Кулаковская, И. М. Богдевич, В. В. Лапа, А. Н. Витченко, В. Ф. Логинов, В. И. Мельник, Г. И. Сачок, П. А. Ковриго и др.

В связи с глобальными изменениями климата за последний тридцатилетний период отклик изменения урожайности озимых зерновых культур на погодные условия стал более выраженным [3]. Быстрое увеличение температуры воздуха при практически постоянной годовой сумме осадков способствует увеличению частоты и длительности атмосферных и почвенных засух, которые наносят серьезный ущерб сельскому хозяйству. Зависимость урожайности от климатических параметров становится все более сложной, и понимание этой связи необходимо для разработки стратегий адаптации к изменению климата и обеспечения продовольственной безопасности.

Согласно проведенным исследованиям, воздействие климатических изменений будут испытывать все сельскохозяйственные культуры по всему миру [4]. Неблагоприятные изменения в урожайности и объемах фактически собранной сельскохозяйственной продукции, обусловленные глобальным изменением климата, ожидаются в перспективе до 2050 г. в засушливых странах [5]. В странах же с умеренно континентальным климатом, наоборот, возможен рост продуктивности сельскохозяйственных культур за счет повышения теплообеспеченности в вегетационный период.

Для получения высоких и устойчивых урожаев озимых зерновых культур в условиях изменения климата необходимо комплексно учитывать все агроэкологические факторы, способствующие нормальному росту и развитию растений. Лишь при таком подходе можно добиться устойчивого и эффективного производства. Многочисленные исследования показывают, что климатические условия всё чаще выступают ограничивающим фактором, который не позволяет полностью раскрыть адаптивный потенциал растений и в полной мере реализовать достижения селекционеров.

Поэтому для планирования и принятия инвестиционных решений в аграрном производстве важной предпосылкой является моделирование процессов с целью надежного прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур с учетом природно-климатических факторов [6, 7].

В настоящее время исследованиям влияния климата на изменчивость урожайности сельскохозяйственных культур посвящен ряд отечественных и зарубежных работ [8–11 и др.]. В работе [12] представлены обобщенные оценки влияния наблюдаемых в последние десятилетия изменений климата на продуктивность и устойчивость сельского хозяйства России. Количественная оценка откликов урожайности и валовых сборов зерновых и зернобобовых культур, как в целом в Российской Федерации, так и в разрезе Федеральных округов и регионов, на возможные климатические изменения в долгосрочном периоде (до 2100 года) представлена в работе [13]. Рассчитанные статистические характеристики общей климатической и технологической изменчивости урожайности зерновых культур показывают, что в целом для территории Беларуси вклад климата в общую дисперсию урожайности составляет от 22 до 81 % [14]. Согласно системе Болина «климат – сельское хозяйство», различают два основных вектора в исследовании взаимосвязи этих двух составляющих: первый вектор направлен на оценку влияния на урожайность

осредненных за какой-либо период климатических параметров; второй – на оценку влияния на урожайность повторяемости экстремальных климатических явлений, представляющих наибольшие риски для сельского хозяйства [15, 16]. Исследования приходят к противоречивым выводам, что связано с разнообразием факторов, таких как региональные особенности, типы культур, методы ведения сельского хозяйства. Эти разногласия подчеркивают сложность взаимодействия между климатическими изменениями и агрономическими показателями, требуя дальнейших исследований для более глубокого понимания этого важного вопроса. С одной стороны, потепление климата влечет за собой такое положительное влияние, как продление вегетационного периода (позволяет растениям лучше развиваться и накапливать больше питательных веществ), улучшение фотосинтетических процессов, снижение риска зимних повреждений (уменьшает вероятность вымерзания озимых зерновых), разработка и адаптация новых сортов и др. [14]. С другой стороны, рост повторяемости теплых зим повышает опасность развития процессов вымокания, выпирания всходов, образования ледяной корки, а также способствует увеличению количества вредителей и зимующих сорняков, что негативно сказывается на показателях урожайности. Частые оттепели вызывают сход снега, в результате чего растения становятся уязвимыми к последующим заморозкам.

Учитывая актуальность исследуемой темы, целью данных исследований является разработка перспективной модели для получения прогнозных оценок урожайности озимых зерновых на примере Брестского района на основе ретранализа урожайности и климатических характеристик.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- выявление климатических параметров, в наибольшей степени влияющих на урожайность озимых зерновых культур в Брестском районе;
- оценка вклада выделенных климатических параметров в изменчивость урожайности озимых зерновых в Брестском районе;
- разработка модели, описывающей зависимость урожайности озимых зерновых на основе трендовой составляющей и климатических параметров.

Исходные данные и методы исследования

Основу исследований составили многолетние ряды наблюдений за урожайностью озимых зерновых в Брестском районе за период с 1981 по 2020 гг. Использованы данные Министерства статистики и анализа Республики Беларусь об урожайности озимых зерновых культур и материалы Республиканского гидрометеорологического центра о температурах воздуха, количестве осадков по метеостанции Брест. В работе реализованы методы статистической обработки данных наблюдений, в частности, методы корреляционного и регрессионного анализа, аналитических расчетов, анализ временных рядов [17, 18].

Исходной базой исследования послужили следующими данные за период 1981–2020 гг.:

- среднегодовая урожайность озимых зерновых $Y(t)$, ц/га, t – номер года;
- среднемесячные температуры воздуха $\bar{T}_i(t)$, °C, i – номер месяца;
- средняя максимальная температура воздуха $\bar{T}_{max_i}(t)$, °C, i – номер месяца;
- средняя минимальная температура воздуха $\bar{T}_{min_i}(t)$, °C, i – номер месяца;
- абсолютная максимальная температура воздуха $T_{max_i}(t)$, °C, i – номер месяца;
- абсолютная минимальная температура воздуха $T_{min_i}(t)$, °C, i – номер месяца;
- число дней с морозом в соответствующем месяце, $m_i(t)$, i – номер месяца;
- месячная сумма осадков, $P_i(t)$, мм, i – номер месяца.

Результаты и их обсуждение

Временные ряды урожайности как правило рассматривают как сумму двух компонентов: детерминированной временной функции

(тренда) и случайных отклонений от неё [19]. Трендовая составляющая ($Y_{\text{тр}}(t)$) представляет собой отклик изменения урожайности на улучшение технологий выращивания сельскохозяйственных культур при условии относительно стабильных во временном аспекте агроклиматических характеристик. Случайная компонента ($Y_{\text{кл}}(t)$) обусловлена преимущественно погодными условиями на всех этапах возделывания сельскохозяйственных культур. В этом случае обобщенную двухкомпонентную модель урожайности можно представить в виде:

$$Y(t) = Y_{\text{тр}}(t) + Y_{\text{кл}}(t). \quad (1)$$

Выполненные в работе [20] исследования по изучению закономерностей формирования урожайности основных сельскохозяйственных культур за период 2007–2019 гг. по совокупности хозяйств юго-запада Беларуси показали, что урожайность основных культур описывается полиномом второго порядка. Однако увеличение рядов наблюдений за исследуемой характеристикой требует пересмотра полученных тенденций.

Поэтому на первом этапе выполнен анализ временного ряда урожайности озимых зерновых Брестского района за период 1981–2020 гг., демонстрирующий значительные колебания данного показателя по годам (рисунок 1). В качестве предиктора в модель введен номер года по тренду (n). Номер года по тренду за 1981 г. принят за единицу. Выявлено, что наиболее точно динамику урожайности за исследуемый период описывает полином 3-й степени. Величина R^2 показывает, что

вклад полиномиального тренда в общую изменчивость урожайности озимых зерновых значительный и составляет 0,76.

На втором этапе из исходного временного ряда урожайности удалена трендовая компонента, что позволило выделить остаточные значения (рисунок 2).

Наличие множества факторов, влияющих на формирование озимых зерновых культур, делает необходимым отбор тех из них, влияние которых на урожайность наиболее значимо. Поэтому на третьем этапе выполнен корреляционный анализ климатических факторов и ряда отклонений урожайности озимых зерновых от трендовой составляющей. В результате анализа получено, что значимое влияние на урожайность озимых культур Брестского района в t -м году оказывают следующие показатели: среднемесячная температура апреля $\bar{T}_4(t)$, средняя минимальная температура января $\bar{T}_{\min,1}(t)$, абсолютная максимальная температура февраля $T_{\max,2}(t)$, абсолютная минимальная температура ноября в предшествующем календарном году $T_{\min,11}(t-1)$, средняя температура декабря в предшествующем календарном году $\bar{T}_{12}(t-1)$, средняя минимальная температура декабря в предшествующем календарном году $\bar{T}_{\min,12}(t-1)$, число дней с морозом в сентябре предшествующего года $m_9(t-1)$, суммарное количество осадков в ноябре, декабре и январе ($P_{11}(t-1) + P_{12}(t-1) + P_1(t)$). Обобщив полученные связи урожайности с климатическими факторами и временной составляющей, получена итоговая двухкомпонентная модель урожайности озимых зерновых Y в t -м году:

$$Y(t) = (0,0049n^3 - 0,267n^2 + 3,811n - 14,8) + (1,052\bar{T}_4(t) - 0,355\bar{T}_{\min,1}(t) + 0,299T_{\max,2}(t) + 0,718T_{\min,11}(t-1) + 6,198\bar{T}_{12}(t-1) - 5,463\bar{T}_{\min,12}(t-1) - 0,207m_9(t-1) - 0,590T_{\max,9}(t) - 0,022(P_{11}(t-1) + P_{12}(t-1) + P_1(t)) - 0,240). \quad (2)$$

Полученные смоделированные значения отклонений от тренда представлены на рисунке 3. Итоговая смоделированная урожай-

ность зерновых по двухкомпонентной модели (2) представлена на рисунке 4.

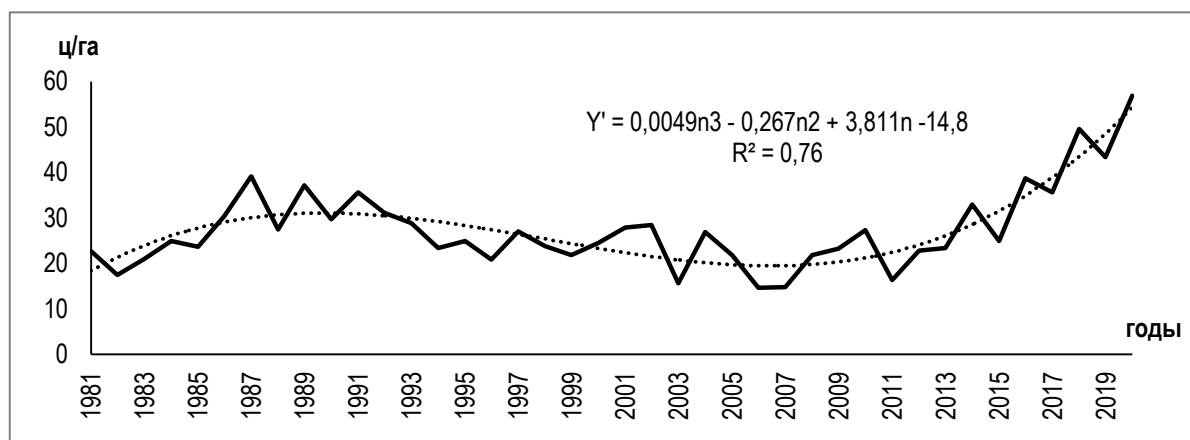


Рисунок 1 – Урожайность озимых зерновых в Брестском районе за период 1981–2020 гг.

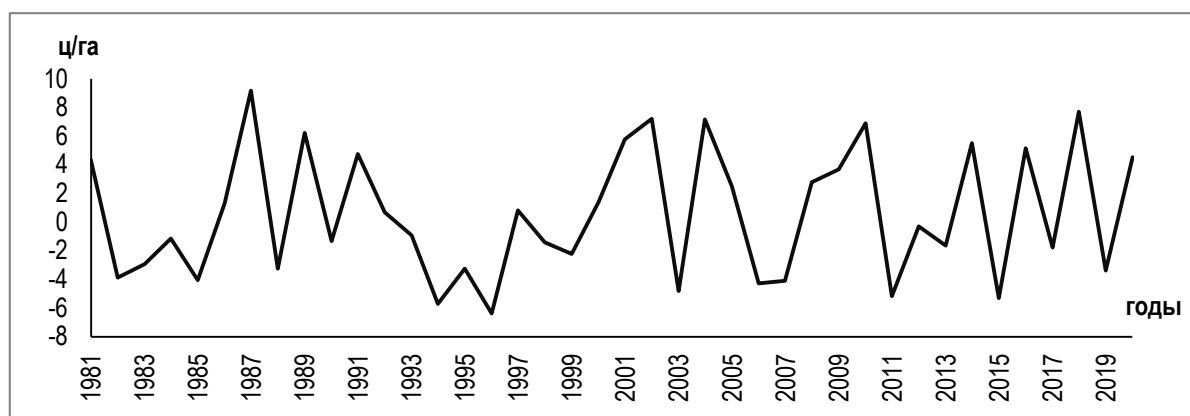


Рисунок 2 – Динамика отклонения урожайности озимых зерновых от трендовой составляющей



Рисунок 3 – Моделирование отклонений ряда урожайности от тренда

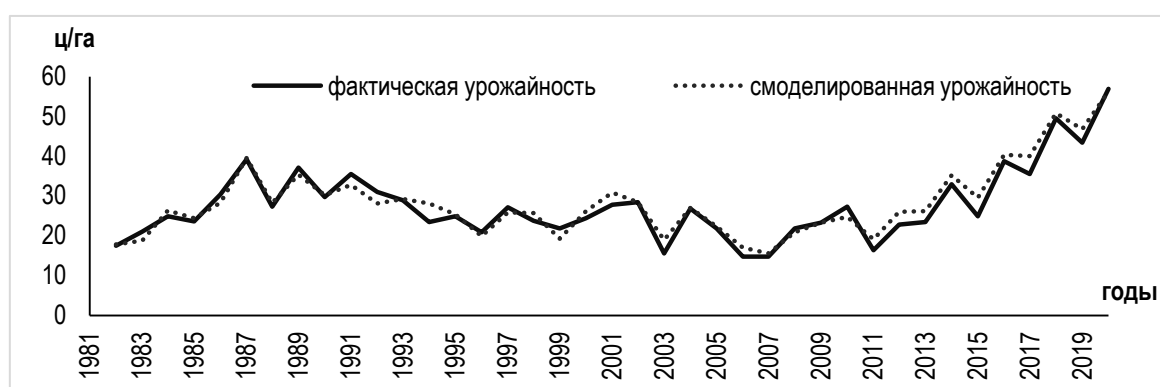


Рисунок 4 – Фактическая и смоделированная урожайность озимых зерновых в Брестском районе за период 1981–2020 гг.

Средняя абсолютная ошибка модели для Брестского района составила 1,8 ц/га, а средняя абсолютная ошибка в процентах – 7,2 %. Таким образом, при исследовании влияния большого числа факторов на урожайность применение двухкомпонентной модели и аппарата корреляционного и регрессионного анализа показало высокую эффективность.

Заключение

В ходе исследования была установлена корреляционная связь между метеорологическими параметрами и урожайностью озимых зерновых Брестского района на основании многолетних данных за период 1981–2020 гг. Разработана двухкомпонентная модель, которая способна с высокой степенью точности предсказывать урожайность озимых зерновых в Брестском районе. Исходя из полученных данных, выявили, что средняя абсолютная ошибка составила 1,8 ц/га в абсолютных и 7,2 % в относительных показателях.

Полученные результаты могут быть использованы управлениями по сельскому хозяйству и продовольствию для оценки планируемого валового сбора озимых зерновых, при разработке аграрной политики, планировании бюджета на поддержку сельского хозяйства, оптимизации структуры посевных площадей и мониторинга продовольственной безопасности.

Список цитированных источников

1. Продовольственная безопасность Беларуси-2022 // Белта. – URL: <https://www.belta.by/infographica/view/prodovolstvennaja-bezopasnost-belarusi-26589> (дата обращения: 19.02.2025).
2. Волчек, А. А. Влияние изменения температур холодного периода на урожайность озимых зерновых в Беларуси / А. А. Волчек, Ю. П. Городнюк // Междунар. научн.практ. конф., Хазарский университет, г. Баку, 5–6 декабря 2022 года. – Баку, Азербайджан, 2023. – С. 209–212.
3. Городнюк, Ю. П. Различия формирования урожайности озимых зерновых культур Брестской области / Ю. П. Городнюк // Сборник научных работ студентов Республики Беларусь «НИРС 2023» / редкол.: А. Г. Баханович (пред.) [и др.]. – Минск : Изд. центр БГУ, 2024. – С. 75.
4. Городнюк, Ю. П. Особенности изменения зимнего температурного режима Белорусского Полесья / Ю. П. Городнюк // Инженерно-экологические аспекты и перспективы развития систем водоснабжения и водоотведения : сборник научных статей Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных, приуроченной ко Всемирному дню водных ресурсов, Брест, 28 марта 2024 г. / Министерство образования Республики Беларусь, учреждение образования «Брестский государственный технический университет» ; редкол.: А. А. Волчек [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2024. – С. 112–116.
5. Ксенофонтов, М. Ю. К вопросу о влиянии климатических изменений на развитие сельского хозяйства России в долгосрочной перспективе / М. Ю. Ксенофонтов, Д. А. Ползиков // Проблемы прогнозирования. – 2020. – № 3 (180). – С. 82–92.
6. Соболев, О. С. Моделирование урожайности зерновых и зернобобовых культур в условиях долгосрочных климатических изменений / О. С. Соболев // Экономика сельского хозяйства России. – 2020. – № 6. – С. 99–104.
7. Бисчоков, Р. М. Анализ, моделирование и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур средствами искусственных нейронных сетей / Р. М. Бисчоков // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. – 2022. – Т. 17, № 2. – С. 146–157.
8. Рысин, И. И. Моделирование влияния климатических факторов на урожайность зерновых культур (на материалах Удмуртии) / И. И. Рысин, П. Б. Акмаров, О. П. Князева // Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 465–472.

9. Юсупов, М. Ч. Влияние изменения климата на урожайность сельскохозяйственных культур / М. Ч. Юсупов, Д. Т. Юсупов // Вестник Технологического университета Таджикистана. – 2020. – № 4 (43). – С. 110–114.
10. Сиптиц, С. О. Методы и модели оценки влияния климата на урожайность сельскохозяйственных культур – зарубежный опыт / С. О. Сиптиц, И. А. Романенко, Н. Е. Евдокимова // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. – 2020. – № 9 (66). – С. 14–19.
11. Червяков, А. В. К вопросу влияния климата на урожайность сельскохозяйственных культур как фактора устойчивого производства / А. В. Червяков // Epomen. Global. – 2019. – № 1. – С. 104–109.
12. Оценка агроклиматических ресурсов территории Беларуси за период с 1989 по 2015 г / В. И. Мельник, И. С. Данилович, И. Ю. Кулешова [и др.] // Природные ресурсы. – 2018. – № 2. – С. 88–101.
13. Сиптиц, С. О. Модельные оценки влияния климата на урожайность зерновых и зернобобовых культур в регионах России / С. О. Сиптиц, И. А. Романенко, Н. Е. Евдокимова // Проблемы прогнозирования. – 2021. – № 2 (185). – С. 75–86.
14. Клочков, А. В. Влияние погодных условий на урожайность сельскохозяйственных культур / А. В. Клочков, О. Б. Соломко, О. С. Клочкова // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 2. – С. 101–105.
15. Сиротенко, О. Д. Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства / О. Д. Сиротенко, В. Н. Павлова // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / под ред. С. М. Семенова. – М.: Росгидромет, 2012. – С. 165–189.
16. Парниковый эффект. Изменение климата и экосистемы / Б. Болин, Б. Р. Деес, Д. Ягер, Р. Уоррик. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 357 с.
17. Сычев, В. Г. Информационные технологии при обработке экспериментальных данных в растениеводстве для прогнозов / В. Г. Сычев, Л. Б. Винничек, О. Н. Суханова // Московский экономический журнал. – 2019. – № 12. – С. 477–484.
18. Деревенец, Д. К. Экономико-математическое моделирование урожайности сельскохозяйственных культур / Д. К. Деревенец, Г. Н. Барсукова // Journal of Agriculture and Environment. – 2024. – № 5 (45). – URL: <https://jae.cifra.science/archive/5-45-2024-may/10.60797/JAE.2024.45.1> (дата обращения: 08.02.2025). – DOI: 10.60797/JAE.2024.45.1.
19. Лебедева, В. М. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. II: Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Кн. 2: Оперативное агрометеорологическое прогнозирование / В. М. Лебедева, А. И. Страшная. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. – 216 с.
20. Конончук, В. В. Моделирование урожайности зерновых культур в условиях проявления агроэкологических рисков / В. В. Конончук // Вестник Брестского университета. – 2020. – № 1. – С. 90–95.
5. Ksenofontov, M. YU. K voprosu o vliyaniy klimaticheskikh izmeneniy na razvitie sel'skogo hozyajstva Rossii v dolgosrochnoj perspektive / M. YU. Ksenofontov, D. A. Polzikov // Problemy prognozirovaniya. – 2020. – № 3 (180). – С. 82–92.
6. Sobolev, O. S. Modelirovanie urozhajnosti zemnykh i zernobobovykh kul'tur v usloviyakh dolgosrochnykh klimaticheskikh izmeneniy / O. S. Sobolev // Ekonomika sel'skogo hozyajstva Rossii. – 2020. – № 6. – С. 99–104.
7. Bischokov, R. M. Analiz, modelirovanie i prognoz urozhajnosti sel'skohozyajstvennykh kul'tur sredstvami iskusstvennykh nejronnykh setej / R. M. Bischokov // Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo. – 2022. – Т. 17, № 2. – С. 146–157.
8. Rysin, I. I. Modelirovanie vliyaniya klimaticheskikh faktorov na urozhajnost' zemnykh kul'tur (na materialah Udmurtii) / I. I. Rysin, P. B. Akmarov, O. P. Knyazeva // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya: Biologiya. Nauki o Zemle. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 465–472.
9. YUusupov, M. CH. Vliyanie izmeneniya klimata na urozhajnost' sel'skohozyajstvennykh kul'tur / M. CH. YUusupov, D. T. YUusupov // Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta Tadzjikistana. – 2020. – № 4 (43). – С. 110–114.
10. Siptic, S. O. Metody i modeli ocenki vliyaniya klimata na urozhajnost' sel'skohozyajstvennykh kul'tur – zarubezhnyj opyt / S. O. Siptic, I. A. Romanenko, N. E. Evdokimova // Ekonomika, trud, upravlenie v sel'skom hozyajstve. – 2020. – № 9 (66). – С. 14–19.
11. CHervyakov, A. V. K voprosu vliyaniya klimata na urozhajnost' sel'skohozyajstvennykh kul'tur kak faktora ustojchivogo proizvodstva / A. V. CHervyakov // Epomen. Global. – 2019. – № 1. – С. 104–109.
12. Ocenka agroklimaticheskikh resursov territorii Belarusi za period s 1989 po 2015 g / V. I. Mel'nik, I. S. Danilovich, I. YU. Kuleshova [i dr.] // Prirodnye resursy. – 2018. – № 2. – С. 88–101.
13. Siptic, S. O. Model'nye ocenki vliyaniya klimata na urozhajnost' zemnykh i zernobobovykh kul'tur v regionah Rossii / S. O. Siptic, I. A. Romanenko, N. E. Evdokimova // Problemy prognozirovaniya. – 2021. – № 2 (185). – С. 75–86.
14. Klochkov, A. V. Vliyanie pogodnykh uslovij na urozhajnost' sel'skohozyajstvennykh kul'tur / A. V. Klochkov, O. B. Solomko, O. S. Klochkova // Vestnik Belorusskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii. – 2019. – № 2. – С. 101–105.
15. Sirotenko, O. D. Glava 5. Metody ocenki vliyaniya izmenenij klimata na produktivnost' sel'skogo hozyajstva / O. D. Sirotenko, V. N. Pavlova // Metody ocenki posledstvij izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem / pod red. S. M. Semenova. – М.: Rosgidromet, 2012. – С. 165–189.
16. Pamirovyj effekt. Izmenenie klimata i ekosistemy / B. Bolin, B. R. Dees, D. Yager, R. Uorrik. – L.: Gidrometeoizdat, 1989. – 357 s.
17. Sychev, V. G. Informacionnye tekhnologii pri obrabotke eksperimental'nykh dannykh v rastenievodstve dlya prognozov / V. G. Sychev, L. B. Vinnichek, O. N. Suhanova // Moskovskij ekonomicheskij zhurnal. – 2019. – № 12. – С. 477–484.
18. Derevenec, D. K. Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie urozhajnosti sel'skohozyajstvennykh kul'tur / D. K. Derevenec, G. N. Barsukova // Journal of Agriculture and Environment. – 2024. – № 5 (45). – URL: <https://jae.cifra.science/archive/5-45-2024-may/10.60797/JAE.2024.45.1> (дата обращения: 08.02.2025). – DOI: 10.60797/JAE.2024.45.1.
19. Lebedeva, V. M. Osnovy sel'skohozyajstvennoj meteorologii. T. II: Metody raschetov i prognozov v agrometeorologii. Kn. 2: Operativnoe agrometeorologicheskoe prognozirovanie / V. M. Lebedeva, A. I. Strashnaya. – Obninsk: FGBU «VNIIGMI-MCD», 2012. – 216 s.
20. Kononchuk, V. V. Modelirovanie urozhajnosti zemnykh kul'tur v usloviyakh proyavleniya agroekologicheskikh riskov / V. V. Kononchuk // Vestnik Brestskogo universiteta. – 2020. – № 1. – С. 90–95.

References

1. Prodovol'stvennaya bezopasnost' Belarusi-2022 // Belta. – URL: <https://www.belta.by/infographica/view/prodovol'stvennaya-bezopasnost-belarusi-26589> (data obrashcheniya: 19.02.2025).
2. Volchek, A. A. Vliyanie izmeneniya temperatur holodnogo perioda na urozhajnost' ozimnykh zemnykh v Belarusi / A. A. Volchek, YU. P. Gorodnyuk // Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Hazarskij universitet, g. Baku, 5–6 dekabrya 2022 goda. – Baku, Azerbajdzhan, 2023. – С. 209–212.
3. Gorodnyuk, YU. P. Razlichie formirovaniya urozhajnosti ozimnykh zemnykh kul'tur Brestskoj oblasti / YU. P. Gorodnyuk // Sbornik nauchnykh rabot studentov Respubliki Belarus' «NIRS 2023» / redkol.: A. G. Bahanovich (pred.) [i dr.]. – Minsk: Izd. centr BGU, 2024. – С. 75.
4. Gorodnyuk, YU. P. Osobennosti izmeneniya zimnego temperaturnogo rezhima Belorusskogo Poles'ya / YU. P. Gorodnyuk // Inzhenerno-ekologicheskie aspekty i perspektivy razvitiya sistem vodosnabzheniya i vodoootvedeniya: sbornik nauchnykh statej Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchyonnykh, priurochennoj ko Vsemirnomu dnyu vodnykh resursov, Brest, 28 marta 2024 g. / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', uchrezhdenie obrazovaniya «Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet»; redkol.: A. A. Volchek [i dr.]. – Brest: BrGTU, 2024. – С. 112–116.
5. Ksenofontov, M. YU. K voprosu o vliyaniy klimaticheskikh izmeneniy na razvitie sel'skogo hozyajstva Rossii v dolgosrochnoj perspektive / M. YU. Ksenofontov, D. A. Polzikov // Problemy prognozirovaniya. – 2020. – № 3 (180). – С. 82–92.
6. Sobolev, O. S. Modelirovanie urozhajnosti zemnykh i zernobobovykh kul'tur v usloviyakh dolgosrochnykh klimaticheskikh izmeneniy / O. S. Sobolev // Ekonomika sel'skogo hozyajstva Rossii. – 2020. – № 6. – С. 99–104.
7. Bischokov, R. M. Analiz, modelirovanie i prognoz urozhajnosti sel'skohozyajstvennykh kul'tur sredstvami iskusstvennykh nejronnykh setej / R. M. Bischokov // Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo. – 2022. – Т. 17, № 2. – С. 146–157.
8. Rysin, I. I. Modelirovanie vliyaniya klimaticheskikh faktorov na urozhajnost' zemnykh kul'tur (na materialah Udmurtii) / I. I. Rysin, P. B. Akmarov, O. P. Knyazeva // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya: Biologiya. Nauki o Zemle. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 465–472.
9. YUusupov, M. CH. Vliyanie izmeneniya klimata na urozhajnost' sel'skohozyajstvennykh kul'tur / M. CH. YUusupov, D. T. YUusupov // Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta Tadzjikistana. – 2020. – № 4 (43). – С. 110–114.
10. Siptic, S. O. Metody i modeli ocenki vliyaniya klimata na urozhajnost' sel'skohozyajstvennykh kul'tur – zarubezhnyj opyt / S. O. Siptic, I. A. Romanenko, N. E. Evdokimova // Ekonomika, trud, upravlenie v sel'skom hozyajstve. – 2020. – № 9 (66). – С. 14–19.
11. CHervyakov, A. V. K voprosu vliyaniya klimata na urozhajnost' sel'skohozyajstvennykh kul'tur kak faktora ustojchivogo proizvodstva / A. V. CHervyakov // Epomen. Global. – 2019. – № 1. – С. 104–109.
12. Ocenka agroklimaticheskikh resursov territorii Belarusi za period s 1989 po 2015 g / V. I. Mel'nik, I. S. Danilovich, I. YU. Kuleshova [i dr.] // Prirodnye resursy. – 2018. – № 2. – С. 88–101.
13. Siptic, S. O. Model'nye ocenki vliyaniya klimata na urozhajnost' zemnykh i zernobobovykh kul'tur v regionah Rossii / S. O. Siptic, I. A. Romanenko, N. E. Evdokimova // Problemy prognozirovaniya. – 2021. – № 2 (185). – С. 75–86.
14. Klochkov, A. V. Vliyanie pogodnykh uslovij na urozhajnost' sel'skohozyajstvennykh kul'tur / A. V. Klochkov, O. B. Solomko, O. S. Klochkova // Vestnik Belorusskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii. – 2019. – № 2. – С. 101–105.
15. Sirotenko, O. D. Glava 5. Metody ocenki vliyaniya izmenenij klimata na produktivnost' sel'skogo hozyajstva / O. D. Sirotenko, V. N. Pavlova // Metody ocenki posledstvij izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem / pod red. S. M. Semenova. – М.: Rosgidromet, 2012. – С. 165–189.
16. Pamirovyj effekt. Izmenenie klimata i ekosistemy / B. Bolin, B. R. Dees, D. Yager, R. Uorrik. – L.: Gidrometeoizdat, 1989. – 357 s.
17. Sychev, V. G. Informacionnye tekhnologii pri obrabotke eksperimental'nykh dannykh v rastenievodstve dlya prognozov / V. G. Sychev, L. B. Vinnichek, O. N. Suhanova // Moskovskij ekonomicheskij zhurnal. – 2019. – № 12. – С. 477–484.
18. Derevenec, D. K. Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie urozhajnosti sel'skohozyajstvennykh kul'tur / D. K. Derevenec, G. N. Barsukova // Journal of Agriculture and Environment. – 2024. – № 5 (45). – URL: <https://jae.cifra.science/archive/5-45-2024-may/10.60797/JAE.2024.45.1> (дата обращения: 08.02.2025). – DOI: 10.60797/JAE.2024.45.1.
19. Lebedeva, V. M. Osnovy sel'skohozyajstvennoj meteorologii. T. II: Metody raschetov i prognozov v agrometeorologii. Kn. 2: Operativnoe agrometeorologicheskoe prognozirovanie / V. M. Lebedeva, A. I. Strashnaya. – Obninsk: FGBU «VNIIGMI-MCD», 2012. – 216 s.
20. Kononchuk, V. V. Modelirovanie urozhajnosti zemnykh kul'tur v usloviyakh proyavleniya agroekologicheskikh riskov / V. V. Kononchuk // Vestnik Brestskogo universiteta. – 2020. – № 1. – С. 90–95.

Материал поступил 17.03.2025, одобрен 19.03.2025, принят к публикации 19.03.2025

УДК 628.162

ЭКОНОМИЧНАЯ СТАНЦИЯ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ВОДЫ ПО ТЕХНОЛОГИИ «СУХАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ»

Б. Н. Житенёв¹, Г. О. Наумчик², Е. С. Рыбак³

¹ К. т. н., доцент, профессор кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gitenov@tut.by

² К. т. н., доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gonaumchik@bstu.by

³ Старший преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: katsunny722@gmail.com

Реферат

В настоящее время наиболее распространенными методами обезжелезивания подземных вод являются упрощенная и глубокая аэрация. После аэрации, гидролиза и окисления образуется гидроксид железа (III), который задерживается на фильтрах с зернистой загрузкой. Периодически осуществляется их промывка. В результате образуются значительные объемы сильно загрязненной соединениями железа промывной воды. Рекомендуемые строительными нормами Республики Беларусь СН 4.01.01-2019, ВУ. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения [2] методы обработки промывных вод неэффективны, отвод их после отстаивания в голову сооружений значительно снижает фильтроцикл и ухудшает качество фильтрата. В результате эксплуатационные организации отказываются от повторного использования промывных вод и сбрасывают их в водотоки. Отмеченная проблема может быть решена двумя путями:

1. Разработкой новых высокоэффективных технологий обработки промывных вод.
2. Внедрение технологий обезжелезивания, при реализации которых образуется минимальный объем промывных вод.

Одним из перспективных способов обезжелезивания является метод «сухой фильтрации». Его достоинство – отсутствие или минимальные объемы промывных вод, поскольку продолжительность фильтроцикла составляет от нескольких месяцев до года. Используются физико-химические, технологические, математические методы.

В результате эксперимента, продолжавшегося непрерывно 18 месяцев, установлена высокая эффективность обезжелезивания подземной воды альб-сеноманского водоносного горизонта методом «сухой фильтрации». При фильтрующей загрузке из вспененного полистирола с параметрами: $d_{50} = 1,6$ мм коэффициентом неоднородности $K_n = d_{80}/d_{10} = 2,75$ и эквивалентном диаметре $d_{экв.} = 2,8$ мм, скорости фильтрования 8 м/ч достигался стабильный эффект обезжелезивания воды. При водовоздушном соотношении 1:3 остаточное содержание железа составляло не более 0,2 мг/л, а продолжительность фильтроцикла – 20 суток. На основании результатов, проведенных в производственных условиях, предлагается новая конструкция станции обезжелезивания подземной воды, в которой реализуется метод «сухой фильтрации», защищенной патентом на полезную модель.

Уменьшается территория станции обезжелезивания из-за компактного расположения сооружений. Увеличивается фильтроцикл до 8...12 месяцев, вследствие того что патрубок для отвода воздуха располагается в нижней части сухих фильтров, что создает условия для образования плотной дегидратированной пленки соединений железа и приводит к малому приросту потерь напора при работе сухих фильтров, а следовательно – к увеличению фильтроцикла. Отсутствуют промывные воды, так как загрузка в сухом фильтре после окончания фильтроцикла полностью заменяется. Упрощается эксплуатация станции, так как не требуется промывка фильтров и обработка промывных вод.

Ключевые слова: обезжелезивание воды, фильтрация, водовоздушное соотношение, станция обезжелезивания, сухая фильтрация.

ECONOMIC WATER IRON REMOVAL STATION USING THE TECHNOLOGY «DRY FILTRATION»

B. N. Zhitenev, G. O. Naumchik, E. S. Rybak

Abstract

Currently, the most common methods of iron removal from groundwater are simplified and deep aeration. After aeration, hydrolysis and oxidation, iron (III) hydroxide is formed, which is retained on filters with granular loading. They are periodically washed. As a result, significant volumes of wash water heavily contaminated with iron compounds are formed. The methods of treating wash water recommended by the building codes of the Republic of Belarus SN 4.01.01-2019, ВУ. Water supply. External networks and structures [2] are ineffective, their discharge after settling to the head of the structures significantly reduces the filtration cycle and worsens the quality of the filtrate. As a result, operating organizations refuse to reuse wash water and discharge it into watercourses. This problem can be solved in two ways:

1. Development of new highly efficient technologies for treating wash water.
2. Implementation of iron removal technologies, during the implementation of which a minimum volume of wash water is formed.

One of the promising methods of iron removal is the "dry filtration" method. Its advantage is the absence or minimum volumes of wash water, since the duration of the filtration cycle is from several months to a year. Physicochemical, technological, mathematical methods were used.

As a result of the experiment, which lasted continuously for 18 months, high efficiency of iron removal of groundwater of the Alb-Cenomanian aquifer by the "dry filtration" method was established. With a filter bed made of foamed polystyrene with the parameters: $d_{50} = 1.6$ mm, heterogeneity coefficient $K_n = d_{80} / d_{10} = 2.75$ and equivalent diameter $d_{eqv.} = 2.8$ mm, filtration speed of 8 m / h, a stable effect of iron removal of water was achieved. At a water-air ratio of 1:3, the residual iron content was no more than 0.2 mg/l, and the filtration cycle duration was 20 days. Based on the results obtained in production conditions, a new design of an underground water iron removal station is proposed, which implements the "dry filtration" method, protected by a patent for a utility model.

The area of the iron removal station is reduced due to the compact arrangement of the structures. The filtration cycle is increased to 8...12 months, due to the fact that the air outlet pipe is located at the bottom of the dry filters, which creates conditions for the formation of a dense dehydrated film of iron compounds and leads to a small increase in pressure losses during operation of dry filters, and, consequently, to an increase in the filtration cycle. There is no backwash water, since the load in the dry filter is completely replaced after the end of the filtration cycle. Operation of the station is simplified, since no need for filter backwashing and backwash water treatment.

Keywords: water iron removal, filtration, water-air ratio, iron removal station, dry filtration.

Введение

В соответствии с Государственной программой «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2021–2025 годы, принятой постановлением Совета Министров Республики Беларусь 28 января 2021 г. № 50 [1], задачами подпрограммы 5 «Чистая вода» являются:

- 1) обеспечение потребителей водоснабжением питьевого качества;
- 2) обеспечение населения централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации);
- 3) повышение качества очистки сточных вод и надежности систем водоснабжения, водоотведения (канализации).

Для решения задач и достижения целей настоящей подпрограммы необходимо осуществить строительство около 800 станций обезжелезивания воды. В настоящее время наиболее распространенными методами обезжелезивания подземных вод являются упрощенная и глубокая аэрация.

Как известно, железо в подземных водах присутствует чаще в двухвалентной форме, преимущественно в виде гидрокарбоната, который устойчив только при наличии большого количества углекислоты и при отсутствии растворенного кислорода. При уменьшении концентрации углекислоты и, следовательно, при повышении pH, и обогащении воды растворенным кислородом происходит процесс гидролиза железа с образованием его гидроксида: при этом образуется ряд промежуточных соединений и в воде одновременно присутствуют как недиссоциированные молекулы, так и ионы двухвалентного железа $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, Fe^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})^+$. Затем гидроксид двухвалентного железа окисляется в гидроксид трехвалентного железа. Образующийся гидроксид трехвалентного железа нерастворим в воде и удаляется в сооружениях водоподготовки. Упрощенная аэрация с последующим фильтрованием эффективна, если соблюдаются ограничения:

- содержание железа (общего) – до 10 мг/л, в том числе двухвалентного (Fe^{2+}) – не менее 70 %;
- pH – не менее 6,8;
- окислительно-восстановительный потенциал – более 100 мВ;
- щелочность – более 2 ммоль/л;
- содержание сероводорода – не более 0,5 мг/л;
- содержание аммония – до 1,5 мг/л;
- содержание метана – до 0,5 мг/л.

Станции обезжелезивания воды упрощенной и глубокой аэрации нашли повсеместное применение в условиях Республики Беларусь, однако им свойствен ряд недостатков. После аэрации, гидролиза и окисления образуется гидроксид железа (III), который задерживается на фильтрах с зернистой загрузкой. Периодически осуществляется их промывка. После промывки фильтров образуются промывные воды в количестве от 0,5 % до 5 % от объема исходной воды, которые необходимо обрабатывать. На станциях обезжелезивания воды фильтрованием следует производить осветление отстаиванием промывных вод фильтровальных сооружений с последующей равномерной их подачей на сооружения водоподготовки. Обработка воды после промывки фильтров включает отстаивание для выделения из нее хлопьев гидроксида железа (III), обезвоживание и подсушивание осадка на специальных площадках. Осветленная промывная вода перекачивается в «голову» сооружений для последующей обработки вместе с исходной водой, поступающей на фильтры обезжелезивания. Осадок, накапливающийся на дне отстойника промывных вод, направляется на иловые площадки либо сооружения по обезвоживанию. Рекомендуются строительными нормами Республики Беларусь СН 4.01.01-2019, ВУ. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения [2] методы обработки промывных вод неэффективны. Как показывает практика, по истечении рекомендуемого времени отстаивания в статических условиях концентрация железа в промывной воде велика. Безреагентное осветление промывных вод в основном завершается в течение 1,5...2,0 ч. Остаточное содержание железа при этом составляет 25,0...35,0 мг/л, дальнейшее снижение концентрации железа замедляется. Количество осадка влажностью 98...99 %, образующегося после двухчасового отстаивания, достигает 3,0–5,0 % объема промывных вод. Возврат осветленных вод на фильтры обезжелезивания с содержанием железа в воде 25,0...35,0 мг/л в виде гидроксида железа (III) может не только увеличить концентрацию его в фильтрате, но и будет изменяться соотношение двух- и трехвалентного железа в пользу последнего, что может нарушить процесс безреагентного обезжелезивания воды [3–12].

При этом уменьшится продолжительность фильтроцикла из-за повышенного содержания взвешенных веществ и снизится качество очистки подземных вод. В результате эксплуатационные организации отказываются от повторного использования промывных вод и сбрасывают их в водотоки. Отмеченная проблема может быть решена двумя путями:

1. Разработкой новых высокоэффективных технологий обработки промывных вод.
2. Внедрением технологий обезжелезивания, при реализации которых образуется минимальный объем промывных вод.

Одним из перспективных способов обезжелезивания является метод «сухой фильтрации». Его достоинство – отсутствие или минимальные объемы промывных вод, поскольку продолжительность фильтроцикла составляет от нескольких месяцев до года [13]. При «сухой фильтрации» образуется дегидратированный и плотный кристаллический осадок оксидов железа [14], в то время как при глубокой и упрощенной аэрации образуется рыхлый и влажный гидроксид железа (III) [15]. Вследствие этого прирост потерь напора в фильтрах, работающих по методу «сухой фильтрации», во много раз меньше, чем в фильтрах, работающих по методу упрощенной или глубокой аэрации [16–17]. Исследования показали, что при «сухой фильтрации» активно участвуют сорбционные процессы [13].

С повышением степени диспергирования воды в воздушном объеме над поверхностью фильтрующей загрузки глубина обезжелезивания воды увеличивается в несколько раз. Оптимальным следует считать разделение потока обрабатываемой воды до капельного состояния, в результате чего улучшаются контакт воды с воздухом и насыщение ее кислородом, кроме того, достигается наиболее полное удаление из нее углекислоты. При увеличении степени разбрызгивания интенсифицируется процесс динамической адсорбции ионов железа на зернах фильтрующей загрузки вследствие возрастания площади соприкосновения фаз. Следовательно, увеличение степени разбрызгивания улучшает процессы окисления, гидролиза и адсорбции, что способствует достижению более высокого эффекта обезжелезивания воды.

Качество обработки воды обратно пропорционально крупности зерен фильтрующего слоя и прямо пропорционально его высоте, так как с уменьшением размеров частиц фильтрующего материала возрастает суммарная поверхность адсорбции в единице объема загрузки фильтра. Вместе с тем первоначальные преимущества развитой поверхности, например, дробленого керамзита по сравнению с кварцевым песком с течением времени (по мере увеличения толщины адсорбционной пленки) утрачиваются. Грязеемкость загрузки фильтров, работающих по методу «сухой» фильтрации, в 15–18 раз выше по сравнению с загрузками, используемыми в других безреагентных методах обезжелезивания воды.

Высокий технико-экономический эффект метода «сухой» фильтрования, отсутствие промывных вод (в непромываемых фильтрах), конструктивная простота установки и высокая надежность делают этот метод весьма перспективным [13, 14, 16, 17].

В настоящее время метод обезжелезивания воды «сухой фильтрацией» остается недостаточно изученным, нет обобщающих исследований, поэтому он не нашел широкого применения. Приведенные в литературе сведения немногочисленны и относятся к частным случаям.

Материалы и методы исследований

Целью работы [18] являлось изучение эффективности обезжелезивания подземных вод альб-сеноманского водоносного горизонта методом «сухой фильтрации». Для достижения указанной цели на водозаборе № 5 (Южный) города Бреста была смонтирована экспериментальная установка (рисунки 1–3).

Альб-сеноманский водоносный горизонт [19] занимает обширную территорию Республики Беларусь (рисунок 4). По гидрохимическому типу воды относятся к гидрокарбонатно-кальциевым. Среди анионов преобладают гидрокарбонат-ионы (89...97 %), а катионов кальций и натрий соответственно (67...86 %) и (8...26 %). В небольших количествах присутствуют хлориды, сульфаты, силикаты, калий, магний. Общая минерализация колеблется от 250 до 430 мг/л. По всем показателям вода альб-сеноманский водоносного горизонта соответствует требованиям СанПиН 10-124 РБ 99 [20], за исключением содержания железа.

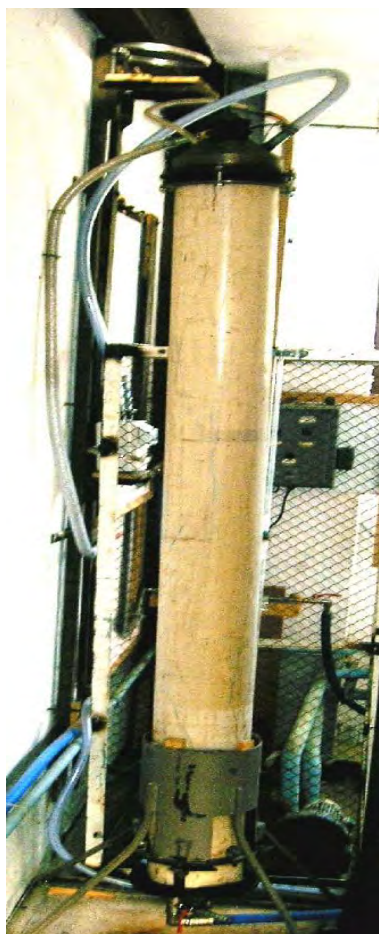


Рисунок 1 – Общий вид установки

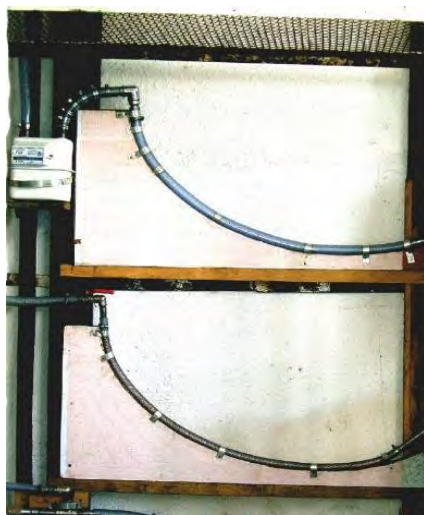


Рисунок 2 – Расходомеры воздуха и воды



Рисунок 3 – Воздуходувка



Рисунок 4 – Альб-сеноманский водоносный горизонт

Таблица 1 – Химический состав подземных вод альб-сеноманского горизонта

Компонент	Годы			
	1951–1966	1966–1967	1984–1986	1995
Сух. остаток при 110 °С, мг/л		170–270	260–310	270–280
Минерализация, мг/л		250–400	300–460	350–430
Гидрокарбонаты, мг/л	317–329	160–260	200–280	280–320
Сульфаты, мг/л	Нет	0–7	4–7	Нет
Хлориды, мг/л	4,9–6,0	3–9	6–15	5–7
Нитраты, мг/л	Нет	Нет	Следы	Нет
Нитриты, мг/л	Нет	Нет	Нет	Нет
Аммиак, мг/л	0,6–2,0	Нет	Нет – следы	1,0
Натрий, мг/л		10–20	8–20	8,4–10,8
Калий, мг/л		2–4	2–3	2,0–2,5
Кальций, мг/л		50–70	50–70	73–81
Магний, мг/л		3–6	4–6	2,7–4,0
Железо общее, мг/л	2,5–3,0	1,7–2,2	0,7–1,9	0,2–0,3
Жесткость общая, мг-экв/л	4,4–4,8	2,7–4,0	3,15–4,4	3,9–4,4
Водородный показатель, pH	7,2	7,2–7,3	7,0–7,5	6,8–7,0
Окисляемость, мг О ₂ /л	4,4–5,6	3–6	4–5	4,5–5
СО ₂ свободная, мг/л		0–4,4	4,4–8,8	8,8
Окись кремния, мг/л		5–10	11–15	10–12

Результаты исследования

В результате эксперимента, продолжавшегося непрерывно 18 месяцев, установлена высокая эффективность обезжелезивания подземной воды альб-сеноманского водоносного горизонта методом «сухой фильтрации». При фильтрующей загрузке из вспененного полистирола с параметрами: $d_{50} = 1,6$ мм коэффициентом неоднородности $K_n = d_{80}/d_{10} = 2,75$ и эквивалентном диаметре $d_{экв} = 2,8$ мм, скорости фильтрования 8 м/ч, достигался стабильный эффект обезжелезивания воды. При водовоздушном соотношении 1:3 остаточное содержание железа составляло не более 0,2 мг/л, а продолжительность фильтроцикла – 20 суток. Регламентирующим фактором, ограничивающим продолжительность фильтроцикла, являлись потери напора в фильтрующей загрузке, содержание железа в фильтрате при этом не превышало 0,3 мг/л. Для увеличения продолжительности фильтроцикла необходимо создать такие условия процесса, при которых в фильтре преобладали бы процессы каталитического окисления и сорбции, а не образование рыхлого и влажного гидроксида железа (III), с этой целью был разработан новый способ вспенивания полистирола в среде горячего зернистого материала. При термической обработке зерен полистирола в среде горячего зернистого материала (рисунки 5, 6) протекают два процесса – вспенивание полистирола и спекание зерен среды с гранулами. Регулируя температуру, продолжительность процесса, а также крупность и материал зернистой среды, можно получать вспененный полистирол с различными физическими свойствами.



Рисунок 5 – Зерна полистирола, вспененного горячей водой



Рисунок 6 – Зерна полистирола, вспененного в среде горячего зернистого материала

Полученный таким способом вспененный полистирол имеет высокую шероховатость. Адгезия оксидов железа значительно увеличилась, скорость зарядки загрузки увеличилась на порядок (рисунки 5, 6, 7).



Рисунок 7 – Зерна полистирола, вспененного в среде горячего зернистого материала и в горячей воде

На основании результатов, проведенных в производственных условиях, предлагается новая конструкция станции обезжелезивания подземной воды [21], в которой реализуется метод «сухой фильтрации», защищенной патентом на полезную модель. Задача, на решение которой направлена данная полезная модель, состоит в увеличении производительности станции обезжелезивания, уменьшении территории станции, уменьшении эксплуатационной и капитальных затрат, увеличение фильтроцикла фильтров обезжелезивания, достижение круглосуточной работы фильтров, упрощении эксплуатации станции.

Это достигается тем, что на станции обезжелезивания, состоящей из сухих фильтров, резервуаров чистой воды и насосной станции II-го подъема, сухие фильтры расположены на резервуарах чистой воды, а насосы второго подъема смонтированы в резервуарах чистой воды, и патрубок для отвода воздуха расположен ниже фильтрующего слоя (рисунок 8).

Технический результат при этом состоит в том, что:

1. Уменьшается территория станции обезжелезивания из-за компактного расположения сооружений.
2. Увеличивается фильтроцикл до 8...12 месяцев, вследствие того что патрубок для отвода воздуха располагается в нижней части сухих фильтров, что создает условия для образования плотной дегидратированной пленки соединений железа и приводит к малому приросту потерь напора при работе сухих фильтров, а следовательно – к увеличению фильтроцикла.
3. Отсутствуют промывные воды, так как загрузка в сухом фильтре после окончания фильтроцикла полностью заменяется.
4. Упрощается эксплуатация станции, так как не требуется промывка фильтров и обработка промывных вод.

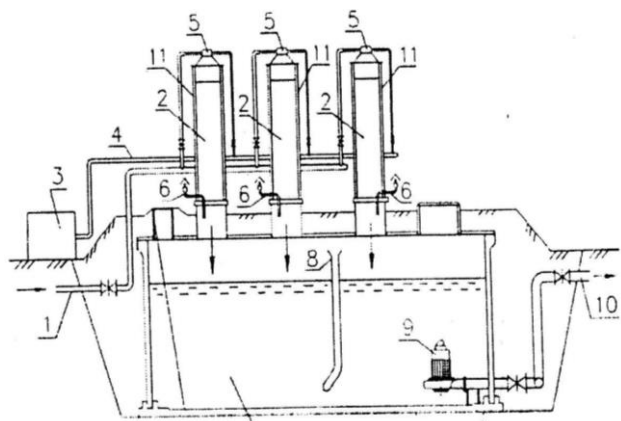


Рисунок 8 – Принципиальная схема станции обезжелезивания

Принципиальная схема станции обезжелезивания показана на рисунке 8, где обозначено: трубопровод подачи исходной воды – 1, сухие фильтры – 2, неотопляемое здание воздушной станции – 3, воздухопровод – 4, смесители – 5, патрубки для отвода воздуха – 6, резервуары чистой воды – 7, переливной трубопровод – 8, насосы II-го подъема – 9, напорные водоводы II-го подъема – 10, утеплитель – 11.

Станция обезжелезивания состоит из трубопровода подачи исходной воды 1, сухих фильтров 2, которые работают по методу «сухой» фильтрации и расположены на резервуарах чистой воды неотопляемого здания воздушной станции 3, построенного рядом с резервуарами чистой воды, воздухопроводов 4, смесителей 5, размещенных на сухих фильтрах, патрубков для отвода воздуха 6, которые расположены ниже фильтрующего слоя сухих фильтров, резервуаров чистой воды 7, переливных трубопроводов 8, находящихся в резервуарах чистой воды, насосов II-го подъема 9, смонтированных в резервуарах чистой воды, напорных водоводов II-го подъема 10, утеплителя 11.

Действует станция обезжелезивания следующим образом: по трубопроводу 1 исходная вода подается в смесители 5. От воздушной станции 3 воздух подается по воздуховодам 4 в смесители 5, в которых происходит смешивание воздуха с водой. Далее водовоздушная смесь поступает в верхнюю часть сухих фильтров 2 и филь-

труется через незатопленную загрузку, поэтому их называют «сухими фильтрами». Воздух отводится из нижней части фильтров через патрубок для отвода воздуха 6, а фильтрат поступает в резервуары чистой воды 7. Далее насосами II-го подъема 9 вода подается по водоводам II-го подъема 10 потребителю. В резервуарах чистой воды устроены переливные трубопроводы 8, а сухие фильтры обернуты утеплителем 11.

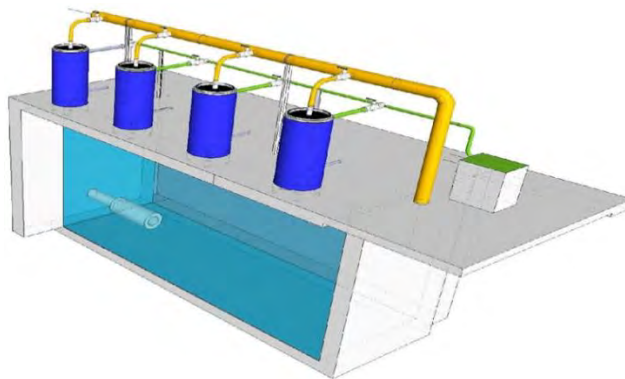


Рисунок 9 – Общий вид станции обезжелезивания

Технико-экономический эффект заключается в снижении капитальных и эксплуатационных затрат за счет отказа от строительства отапливаемых зданий фильтров и насосной станции II-го подъема, отказа от строительства сооружений для промывки фильтров и обработки промывных вод, а также за счет полной автоматизации станции обезжелезивания.

Заключение

1. В результате эксперимента, продолжавшегося непрерывно 18 месяцев, доказана высокая эффективность обезжелезивания подземной воды альб-сеноманского водоносного горизонта методом «сухой фильтрации».
2. При фильтрующей загрузке из вспененного полистирола с параметрами: $d_{50} = 1,6$ мм коэффициентом неоднородности $K_n = d_{80}/d_{10} = 2,75$ и эквивалентном диаметре $d_{экв.} = 2,8$ мм, скорости фильтрования 8 м/ч достигался стабильный эффект обезжелезивания воды.
3. При водовоздушном соотношении 1:3 остаточное содержание железа составляло не более 0,2 мг/л, а продолжительность фильтроцикла – 20 суток.
4. На основании результатов, экспериментов, проведенных в производственных условиях, предлагается новая, защищенная патентом на полезную модель, конструкция станции обезжелезивания подземной воды, в которой реализуется метод «сухой фильтрации».

Список цитированных источников

1. О Государственной программе «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2021–2025 годы : постановление Совета Министров Республики Беларусь от 28 января 2021 г. № 50 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100050> (дата обращения: 23.01.2025).
2. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения: строительные нормы Республики Беларусь : СН 4.01.01-2019, ВУ. – Взамен ТКП 45-4.01-320-2018 (33020) ; введ. 09.07.2020. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – IV, 68 с.
3. Станкявичюс, В. И. Обезжелезивание воды фильтрованием (основы теории и расчет установок) / В. И. Станкявичюс. – Вильнюс : Мокслас, 1978. – 120 с.
4. Технические записки по проблемам воды: в 2-х т. / К. Барак, Ж. Бебен, Ж. Бернар [и др.] ; под ред. Т. А. Карюхиной, И. Н. Чурбановой. – М. : Стройиздат, 1983. – 609 с.
5. Рапопорт, Я. Д. Применение водовоздушной промывки при обезжелезивании воды фильтрованием / Я. Д. Рапопорт, Ю. И. Татанов // Водоснабжение и санитарная техника. – № 8. – 1997. – С. 20–21.

6. Любарский, В. М. Осадки природных вод и методы их обработки / В. М. Любарский – М.: Стройиздат, 1980. – 128 с.
7. Мякишев, В. А. Сокращение потерь воды на сооружениях очистки поверхностных вод / В. А. Мякишев, Л. Д. Субботкин // Водоснабжение и санитарная техника. – № 8. – 2002. – С. 12–14.
8. Новиков, М. Г. Утилизация промывных вод фильтровальных сооружений на водоочистных станциях / М. Г. Новиков, Н. Г. Иванова, Л. П. Дмитриева // Вода и экология. – № 1. – 2000.
9. Румянцева, Л. П. Брызгальные установки для обезжелезивания воды / Л. П. Румянцева – М.: Стройиздат, 1973. – 104 с.
10. Шевченко, Л. Я. Утилизация осадков водопроводных станций / Л. Я. Шевченко // Водоснабжение и санитарная техника. – № 4. – 1985. – С. 21.
11. Белескова, Е. А. Об утилизации осадков, образующихся при обезжелезивании подземных вод / Е. А. Белескова, В. И. Айзенберг // Водные ресурсы. – 1979. – № 5. – С. 190.
12. Алферова, Л. И. Повторное использование промывных вод и утилизация осадка на станциях очистки подземных вод / Л. И. Алферова, Е. И. Курочкин, В. В. Дзюбо // Водоочистка. – № 6. – 2008. – С. 26–31.
13. Сукасян, Б. Д. Исследование процесса обезжелезивания подземных вод методом водовоздушного фильтрования: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Б. Д. Сукасян; инж. стороит. инст. им. В. В. Куйбышева – М., 1979. – 20 с.
14. Золотова, Е. Ф. Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода. / Е. Ф. Золотова, Г. Ю. Асс. – М.: Стройиздат, 1975. – 176 с.
15. Кульский, Л. А. Технология очистки природных вод / Л. А. Кульский, П. П. Строкач. – Киев: Вища школа, 1986. – 352 с.
16. Николадзе, Г. И. Обезжелезивание природных и оборотных вод / Г. И. Николадзе. – М.: Стройиздат, 1978. – 161 с.
17. Старинский, В. П. Водозаборные и очистные сооружения коммунальных водопроводов: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности 2908 "Водоснабжение, канализация, рациональное использование и охрана водных ресурсов" и 29.05 "Коммунальное строительство и хозяйство" / В. П. Старинский, Л. Г. Михайлик. – Минск: Вышэйшая школа, 1989. – 269 с.
18. Житенев, Б. Н. Повышение эффективности обезжелезивания подземных вод альб-сеноманского водоносного горизонта «сухой фильтрацией» / Б. Н. Житенев, Г. О. Наумчик // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – 2007. – № 2 (44). – С. 77–81.
19. Станкевич, Р. А. Артезианские воды Бреста и их использование: Природные условия, история освоения и пути прогресса / Р. А. Станкевич. – Мн.: Адукацыя і выхаванне, 2004. – 184 с.
20. Санитарные правила и нормы СанПиН 10-124 РБ 99. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества // Сборник санитарных правил и норм по питьевому водоснабжению / Министерство здравоохранения Республики Беларусь. – Минск, 2000. – С. 3–108. – Введ. 19.10.99.
21. Патент 2461 ВУ, МПК С 02F 3/10. Станция обезжелезивания: № u20050191 : заявлено 05.04.2005 : опубл. 17.10.2005 / Житенев Б. Н., Гуринович А. Д., Наумчик Г. О.; заявитель Брестский гос. техн. ун-т // Гос. реестр полезн. моделей.
22. Stankyavichyus, V. I. Obezhelezivanie vody fil'trovaniem (osnovy teorii i raschet ustanovok) / V. I. Stankyavichyus. – Vil'nyus : Moksias, 1978. – 120 s.
23. Tekhnicheskie zapiski po problemam vody: v 2-h t. / K. Barake, ZH. Beben, ZH. Bernar [i dr.] ; pod red. T. A. Karyuhinoy, I. N. CHurbanovoj. – M.: Strojizdat, 1983. – 609 s.
24. Rapoport, YA. D. Primenenie vodovozdushnoj promyvki pri obezhelezivanii vody fil'trovaniem / YA. D. Rapoport, YU. I. Tatanov // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – №8. –1997. – S. 20–21.
25. Lyubarskij, V. M. Osadki prirodnyh vod i metody ih obrabotki / V. M. Lyubarskij – M.: Strojizdat, 1980. – 128 s.
26. Myakishhev, V. A. Sokrashchenie poter' vody na sooruzheniyah ochistki poverhnostnyh vod / V. A. Myakishhev, L. D. Subbotkin // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – № 8. – 2002. – S. 12–14.
27. Novikov, M. G. Utilizaciya promyvnyh vod fil'troval'nyh sooruzhenij na vodoochistnyh stanciyah / M. G. Novikov, N. G. Ivanova, L. P. Dmitrieva // Voda i ekologiya. – № 1. – 2000.
28. Romyanceva, L. P. Bryzgal'nye ustanovki dlya obezhelezivaniya vody / L. P. Romyanceva – M.: Strojizdat, 1973. – 104 s.
29. SHevchenko, L. YA. Utilizaciya osadkov vodoprovodnyh stancij / L. YA. SHevchenko // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – № 4. – 1985. – S. 21.
30. Beleskova, E. A. Ob utilizacii osadkov, obrazuyushchihsysya pri obezhelezivanii podzemnyh vod / E. A. Beleskova, V. I. Ajzenberg // Vodnye resursy. – 1979. – № 5. – S. 190.
31. Alferova, L. I. Povtornoe ispol'zovanie promyvnyh vod i utilizaciya osadka na stanciyah ochistki podzemnyh vod / L. I. Alferova, E. I. Kurochkin, V. V. Dzyubo // Vodoochistka. – № 6. – 2008. – S. 26–31.
32. Sukasyan, B. D. Issledovanie processa obezhelezivaniya podzemnyh vod metodom vodovozdushnogo fil'trovaniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.04 / B. D. Sukasyan; inzh. storoit. inst. im. V.V. Kujbysheva – M., 1979. – 20 s.
33. Zolotova, E. F. Ochistka vody ot zheleza, marganca, fтора i serovodoroda. / E. F. Zolotova, G. YU. Ass. – M.: Strojizdat, 1975. – 176 s.
34. Kul'skij, L. A. Tekhnologiya ochistki prirodnyh vod / L. A. Kul'skij, P. P. Strokach. – Kiev: Vishcha shkola, 1986. – 352 s.
35. Nikoladze, G. I. Obezhelezivanie prirodnyh i oborotnyh vod / G. I. Nikoladze. – M.: Strojizdat, 1978. – 161 s.
36. Starinskij, V. P. Vodozabornye i ochistnye sooruzheniya kommunal'nyh vodoprovodov : uchebnoe posobie dlya studentov vuzov, obuchayushchihsya po special'nosti 2908 "Vodosnabzhenie, kanalizaciya, racional'noe ispol'zovanie i ohrana vodnyh resursov" i 29.05 "Kommunal'noe stroitel'stvo i hozyajstvo" / V. P. Starinskij, L. G. Mihajlik. – Minsk: Vyshejschaya shkola, 1989. – 269 s.
37. ZHitenev, B. N. Povysenie effektivnosti obezhelezivaniya podzemnyh vod al'b-senomanskogo vodonosnogo gorizonta «suhoy fil'traciej» / B. N. ZHitenev, G. O. Naumchik // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika. – 2007. – № 2 (44). – S. 77–81.
38. Stankevich, R. A. Artezijskie vody Bresta i ih ispol'zovanie: Prirodnye usloviya, istoriya osvoeniya i puti progressa / R. A. Stankevich. – Mн.: Adukacyya i vyhavanne, 2004. – 184 s.
39. Sanitarnye pravila i normy SanPiN 10-124 RB 99. Pit'evaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody centralizovannyh sistem pit'evogo vodosnabzheniya. Kontrol' kachestva // Sbornik sanitarnykh pravil i norm po pit'evomu vodosnabzheniyu / Ministerstvo zdoravoohraneniya Respubliki Belarus'. – Minsk, 2000. – S. 3–108. – Vved. 19.10.99.
40. Patent 2461 BY, MPK C 02F 3/10. Stanciya obezhelezivaniya : № u20050191 : zayavleno 05.04.2005 : opubl. 17.10.2005 / ZHitenev B. N., Gurinovich A. D., Naumchik G. O. ; zayavitel' Brestskij gos. tekhn. un-t // Gos. reestr polezn. modelej.

References

1. O Gosudarstvennoj programme «Komfortnoe zhi'e i blagopriyatnaya sreda» na 2021–2025 gody : postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 28 yanvarya 2021 g. № 50 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100050> (data obrashcheniya: 23.01.2025).
2. Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzheniya: stroitel'nye normy Respubliki Belarus' : SN 4.01.01-2019, BY. – Vzamen TKP 45-4.01-320-2018 (33020) ; vved. 09.07.2020. – Minsk : Minstrojarkhitektury, 2020. – IV, 68 s.

Материал поступил 28.02.2025, одобрен 09.03.2025, принят к публикации 14.03.2025

УДК 628.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ БРИКЕТИРОВАННОГО ТОРФА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ЦИНКА

Б. Н. Житенёв¹, Д. Д. Сенчук²

¹ К. т. н., доцент, профессор кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gitenev@tut.by

² Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: senchuk.d.d@mail.ru

Реферат

В настоящее время ведутся активные исследования по методам очистки сточных вод от токсичных металлов, таких как кадмий, свинец, медь и др., с применением новых композиционных сорбентов, совершенствованию ионообменной очистке, осаждению, например, в виде сульфидов или оксалатов, сорбцией золой от сжигания древесины, биосорбцией растениями. При этом одним из перспективных направлений является применение технологий сорбционной очистки сточных вод с использованием торфа. Наличие в Республике Беларусь значительных запасов торфа создает реальные предпосылки для выпуска дешевых, экологически безопасных сорбентов на основе модифицированного брикетированного торфа. Настоящая работа является продолжением исследований сорбционных свойств измельченного брикетированного торфа и посвящена очистке сточных вод от ионов цинка. Использованы физико-химические, технологические, математические методы исследования.

Выполнен анализ литературных данных по степени загрязненности природных водных объектов ионами цинка, установлено, что преимущественно ионы цинка попадают в водные объекты с недостаточно очищенными сточными водами. Наиболее эффективным способом предотвращения загрязнения водных объектов ионами цинка является более глубокая очистка производственных сточных вод. Очистка производственных сточных вод от ионов тяжелых металлов, в том числе от ионов цинка является весьма актуальной задачей, о чем свидетельствует количество научных публикаций, посвященных данной проблеме. Исследования ведутся по очистке сточных вод от цинка сорбционными методами [21–28], биосорбцией, биоаккумуляцией [30–35], электрохимическими [36–37] реагентными методами [38–41]. Исследована кинетика сорбции брикетированным торфом ионов Zn^{2+} . Установлено, что с увеличением крупности зерен брикетированного торфа эффективность сорбции снижается. Достаточная интенсивность процесса характеризуется тем, что за 5 минут контакта эффект сорбции ионов Zn^{2+} составляет $\Theta = 85,71\%$, а при 20 и 40 минутах соответственно 96 %, и 99 %. Сорбционная емкость при насыщении составляет по Zn^{2+} – 0,0045 ммоль/г (0,29 мг/г). С помощью уравнений диффузионной и химической кинетики установлено, что процесс сорбции идет в диффузионном режиме, при этом вклад в общую скорость процесса вносит стадия химического взаимодействия ионов металла с функциональными группами торфа.

Брикетированный торф является эффективным сорбентом для очистки сточных вод от ионов Zn^{2+} . Процесс сорбции практически заканчивается через 20 минут.

Ключевые слова: брикетированный торф, ионы Zn^{2+} , очистка сточных вод, сорбция, диффузионная и химическая кинетика.

STUDY OF SORPTION PROPERTIES OF BRIQUETTED PEAT FOR WASTEWATER TREATMENT FROM ZINC IONS

B. N. Zhitenev, D. D. Senchuk

Abstract

Currently, active research is underway on methods of wastewater treatment from toxic metals such as cadmium, lead, copper, etc., using new composite sorbents, improving ion-exchange treatment, precipitation, for example, in the form of sulfides or oxalates, sorption by ash from wood combustion, biosorption by plants. At the same time, one of the promising areas is the use of sorption wastewater treatment technologies using peat. The presence of significant peat reserves in the Republic of Belarus creates real prerequisites for the production of cheap, environmentally friendly sorbents based on modified briquetted peat. This work is a continuation of the study of the sorption properties of crushed briquetted peat and is devoted to the purification of wastewater from zinc ions. Physicochemical, technological, mathematical research methods were used.

The analysis of literary data on the degree of pollution of natural water bodies with zinc ions was performed. It was found that zinc ions mainly enter water bodies with insufficiently purified wastewater. The most effective way to prevent pollution of water bodies with zinc ions is a deeper purification of industrial wastewater. Purification of industrial wastewater from heavy metal ions, including zinc ions, is a very urgent task, as evidenced by the number of scientific publications devoted to this problem. Research is conducted on the purification of wastewater from zinc by sorption methods [21–28], biosorption, bioaccumulation [30–35], electrochemical [36–37] reagent methods [38–41]. The kinetics of sorption of Zn^{2+} ions by briquetted peat was studied. It has been established that with an increase in the grain size of briquetted peat, the efficiency of sorption decreases. Sufficient intensity of the process is characterized by the fact that for 5 minutes of contact, the effect of sorption of Zn^{2+} ions is $E = 85.71\%$, and at 20 and 40 minutes, respectively, 96 % and 99 %. The sorption capacity at saturation is for Zn^{2+} – 0.0045 mmol / g (0.29 mg / g). Using the equations of diffusion and chemical kinetics, it was established that the sorption process occurs in the diffusion mode, while the contribution to the overall rate of the process is made by the stage of chemical interaction of metal ions with the functional groups of peat.

Briquetted peat is an effective sorbent for wastewater treatment from Zn^{2+} ions. The sorption process is practically complete after 20 minutes.

Keywords: briquetted peat, Zn^{2+} ions, wastewater treatment, sorption, diffusion and chemical kinetics.

Введение

В постановлении Совета министров Республики Беларусь от 22 февраля 2022 г. № 9: «О Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года» отмечается, что к 2030 году повысить качество воды посредством уменьшения загрязнения, ликвидации сброса отходов и

сведения к минимуму выбросов опасных химических веществ и материалов, сокращения вдвое доли неочищенных сточных вод и значительного увеличения масштабов рециркуляции и безопасного повторного использования сточных вод [1]. В Республике Беларусь сосредоточено большое количество предприятий приборо- и машиностроения, в технологических процессах которых широко исполь-

зуются гальванопокрытия, в результате в сточных водах присутствуют ионы тяжелых металлов. Согласно шкале стресс-факторов, учитывающей комплексное негативное воздействие на организм человека, тяжелые металлы (135 баллов) оставляют далеко позади радиоактивные отходы (40 баллов) [2]. Настоящая работа является продолжением исследований сорбционных свойств измельченного брикетированного торфа и посвящена очистке сточных вод от ионов **цинка** [3, 4]. Цинк широко используется на предприятиях приборо- и машиностроения в качестве защитного покрытия различных изделий, что является причиной загрязнения поверхностных и подземных вод этим металлом. В [5] отмечается, что на основании данных гидрохимической лаборатории одного из заводов ПО "Гомсельмаш" (за период с 2000 по 2006 г.) и специальных экспериментальных исследований, проведенных авторами в августе 2006 г., можно сделать следующие выводы: а) на концентрации загрязняющих веществ в дождевых и талых водах существенное влияние оказывают технологические процессы производства: максимальные значения концентраций характерны для гальванических цехов и производств, связанных с горячей высадкой и штамповкой металлов, а минимальные – для производств холодной высадки, различных видов механической обработки, открытого складирования готовой продукции; б) наиболее характерными загрязнителями дождевых и талых вод являются взвешенные вещества, БПК, нефтепродукты, азот аммонийный, фосфаты, железо и цинк; в) диапазоны концентраций загрязняющих веществ находятся в пределах: по взвешенным веществам – 15...90 мг/л, нефтепродуктам – 0,25...4,8, азоту аммонийному – 0,4...5,9, железу – 0,2...9,4, цинку – 0,05...4,5. В [6] констатируется, что для стран Евросоюза существует проблема защиты морских прибрежных акваторий и эстуариев от загрязнений различных видов, в том числе от тяжелых металлов, которые поступают с речной водой, с неэффективно очищенными СВ и т. д. Сообщается о разработке рамочных направлений, в которых приведены рекомендации относительно предельно-допустимого содержания в донных отложениях эстуариев и прибрежных акваторий тяжелых металлов; в частности для кадмия это 0,45 мкг/г, для хрома – 71 мкг/г, для никеля – 57 мкг/г, для мышьяка – 24 мкг/г, для ртути – 0,27 мкг/г, для свинца – 66 мкг/г, для **цинка** – 248 мкг/г. В работе [7] исследовались процессы загрязнения акватории Атлантического океана при выпадении дождевых осадков; пробы осадков отбирались на расстоянии 50 км от береговой линии. Установлено, что дождевая вода содержала моновалентные катионы натрия, калия, двухвалентные кальция, магния, цинка и меди, а также анионы – хлориды, сульфаты и нитриты; другие загрязнители присутствовали в весьма низких концентрациях. Вода имела кислую реакцию с pH преимущественно ниже 5,4, содержание большинства компонентов не превышало предельно-допустимых значений по нормам ВОЗ. Уровень бактериальной загрязненности воды характеризуется как незначительный. В [8] представлены результаты определения реакции водяной сосенки (представитель погруженных высших водных растений) на воздействие ионов цинка, фтора, соединений мышьяка и низких величин pH.

Исследования [9] связаны с тем, что в прибрежных зонах заливов имеются мелководные участки, в которые периодически во время штормов поступает вода, кроме того, в них может собираться загрязненная вода от поверхностных водоисточников. Обследовался ряд таких мелководий, при этом отбирались пробы донных отложений (ДО), размер фракций ДО составлял от 13 до 646 мкм. В ДО определялось содержание сорбированных загрязнителей. Установлено, что в зависимости от места отбора пробы концентрация полихлорированных бифенилов составляла от менее чем 0,0004 до 0,704 мкг/кг ДО; для полициклических ароматических углеводородов – 0,2–80 мкг/кг; для свинца, кадмия и цинка 0,02–4670 мкг/кг. В [10] приводятся результаты обследования эстуария, связанного с гаванью, в него впадали несколько притоков; в донных отложениях (ДО) гавани и эстуария определялись ртуть, свинец, кадмий, хром, медь, цинк и алюминий, а также фосфор, азот, органические соединения, масла и др. Установлено, что содержание кадмия в ДО составляло в среднем 0,58 мкг/кг (наименьшее значение для всех металлов) и цинка 596 мкг/кг (наибольшее значение). При этом содержание металлов в ДО было значительно выше в местах впадения речных притоков, чем в среднем для эстуария. Сообщается [11], что при разработке

месторождения металлических руд выделялись кислые дренажные воды (ДВ), поступающие в речную воду; их расход namного увеличился при наводнениях. При обследовании реки установлено, что в наибольших концентрациях ДВ содержали железо, цинк и алюминий. Кроме того, присутствовали марганец, медь, мышьяк, свинец и др. Установлено также, что на расстоянии 3,5 км от точки сброса речная вода обладала высокой токсичностью, которая быстро убывала при разбавлении; при дистанции 25 км в воде фиксировались остаточные концентрации металлов. В работе [12] сообщается, что дренаж речной воды содержал различные металлы, в том числе кадмий, свинец, цинк и др. – всего 9 металлов. Они присутствовали в следовых концентрациях. Изучались процессы диффузии металлов, с этой целью использовался гель с толщиной слоя 0,16–2 мм. Установлено, что граница диффузионного слоя была наиболее стабильна для кадмия, свинца и цинка и наименее для марганца. В лабораторных экспериментах [13] исследовались процессы десорбции металлов морскими донными отложениями (ДО), при этом использовались реальные ДО, которые предварительно насыщались ионами кадмия, меди, свинца, цинка и содержали их в концентрациях 86, 240, 700 и 3000 мкг/кг соответственно (по сухой массе). Величина pH в опытах составляла 5,5–8, концентрация растворенного кислорода 3–8 мг/л, солесодержание также менялось в широких пределах. В опытах применялось два вида перемешивания: механическое и биологическое, когда струя создавалась выбросом от моллюсков. Установлено, что более эффективно перемешивание механическое, свинец и цинк более эффективно выделялись в присутствии сульфидов. Исследуемая территория с мангровыми [14] периодически затоплялась во время приливов. В донных отложениях (ДО) и биомассе растительности определялось содержание ионов тяжелых металлов, меди, свинца и цинка. Установлено, что ДО и биомасса аккумулировали металлы примерно с одинаковой эффективностью, при этом способность растительности к аккумуляции была для стеблей в среднем на 50 % выше, чем для листьев, в наибольших количествах металлы накапливались в корнях. Представлено распределение ионов различных металлов в ДО. В работе [15] обзор литературы и собственные исследования авторов показали, что наиболее приемлемым сорбентом для очистки сточных вод от цинка является зола от ТЭЦ. Проведены исследования [16] по удалению $^{152+154}\text{Eu}$ и ^{65}Zn из радиоактивных растворов активированным углем в периодичном и непрерывном режиме. Исследовалось влияние времени установления равновесия, дозы угля, pH раствора. Сорбционные данные интерпретированы с использованием моделей Лэнгмюра и Фрейндлиха. Полученные данные указывают на возможность использования активированного угля для удаления радиоактивных катионов европия и цинка из сточных вод. В [17] представлены результаты исследований по загрязнению цинком речных вод и донных отложений в районе свинцово-цинкового рудника на о. Tsushima (Япония). Рудник является одним из самых старейших предприятий Японии. Проведенный анализ воды показал, что 64 % проб имели превышение нормы в 0,03 мкг/мл. Концентрация цинка в отложениях составляла 86,75–7490,07 мкг/г и также превышала допустимую норму. Предполагается, что воды р. Shiine и донные отложения также загрязнены сульфидными рудами. Исследования [18] связаны с тем, что присутствующие в речной воде медь и цинк находятся в составе различных соединений и играют существенную роль в плане обеспечения реакционного потенциала водной экосистемы, играет роль их способность к биоаккумуляции представителями водной биоты, к образованию токсичных форм. В [19] исследовалось качество речной воды, протекающей вначале через парковую городскую зону (ПЗ), а затем через территорию с высокой концентрацией различных производств (ТП). Установлено, что в зоне ТП содержание таких тяжелых металлов, как цинк, медь, хром и свинец было значительно выше, чем для ПЗ, однако кадмий в ПЗ и ТП содержался примерно в одинаковых концентрациях. Содержание азота и фосфора было высоким в обеих зонах, но в ТП концентрации нитратов и органического азота были более высокими, чем в ПЗ. Предлагается увеличить эффективность работы очистных сооружений, сбрасывающих СВ в реку в ТП. Проведено исследование [20] по определению тенденций распределения загрязнителей в заливе Elefsis (Греция) и определен подход к классификации загрязнителей

в соответствии с их потенциальной опасностью. Пробы брались на побережье и в самом заливе. Определено, что основными загрязнителями являются четыре металла: свинец, цинк, хром и медь. Определены также временные тенденции концентрации загрязнителей в окружающей среде залива за 18 лет. Отмечено снижение концентрации Сг как на побережье, так и в воде залива.

Очистка воды от цинка

Молотый брусит может быть эффективным реагентом для удаления из воды ионов тяжелых металлов, в том числе меди, цинка и железа [21]. Наиболее эффективно (с меньшими расходами реагента) удаляются ионы тяжелых металлов при использовании мелкодисперсных фракций (0–45 мкм). Менее эффективно (при остаточной концентрации 0,5 мг/л) удаляются бруситом ионы никеля. Результаты проведенных исследований [22] показали, что извлечение цинка возможно как отходами горно-металлургической промышленности, так и минеральным сырьем (известняк, доломит и магнезит). Для концентрированных растворов применяется метод гальванокоагуляции, при котором даже кратковременная обработка позволяет извлечь до 100 % цинка. Из карбонатных минералов для извлечения цинка наряду с известняком может применяться магнезит. В [23] сообщается, что промышленные СВ содержали тяжелые металлы, очистка СВ производилась в многоступенчатой схеме, однако на выходе они содержали эти металлы в остаточных концентрациях. В лабораторных экспериментах разрабатывался процесс сорбционной доочистки этих СВ, в качестве модельного металла использовался цинк. Сообщается о синтезе сорбента с нанокристаллической структурой, который обозначался как минерал акагенит, он имел вид гранулята, которым заполнялась сорбционная колонка, при оптимальном режиме сорбции обеспечивалась высокая эффективность удаления ионов цинка. В фундаментальной работе [24] теоретически обоснована и практически подтверждена целесообразность использования новых углеродных сорбентов, полученных из длиннопламенных каменных и бурых углей, а также сорбента ИПИ-Т. Методом порометрии установлена неоднородность пористой структуры исследуемых сорбентов с преобладанием мезопор. Выявлено, что окислительное модифицирование кислородом воздуха позволяет получить сорбенты с развитой мезопористой структурой и химией поверхности селективной к сорбции металлов из жидких сред. Доказан полифункциональный характер поверхности сорбентов с доминированием карбоксильных, фенольных, карбонильных и эфирных групп. Установлено, что комплексообразование преимущественно идет с участием карбоксилат-иона и гидроксильной группы. Наиболее эффективен этот процесс для сорбентов из бурых углей. Впервые установлены закономерности сорбции, кинетики сорбции ионов меди, цинка, железа, хрома, ртути, кадмия, свинца из производственных растворов новыми сорбентами из бурых и каменных углей и их модификаций. Доказано, что сорбция ионов металлов на сорбентах из углей и их модификаций носит монослойный характер, подчиняется уравнению Ленгмюра, на сорбенте ИПИ-Т – принадлежит к полимолекулярной сорбции и подчиняются уравнению БЭТ. Определены коэффициенты распределения и избирательности сорбентов по отношению к металлам, подтверждающие селективность сорбента АБЗ по отношению к ртути, установлены ряды селективности металлов в кислой и щелочной среде, обусловленные электронным строением элементов. Впервые теоретически обоснованы и экспериментально доказаны механизмы сорбции ионов тяжелых цветных металлов новыми углеродными сорбентами. Значения дифференциальных теплот сорбции и энергии активации свидетельствуют о протекании процессов сорбции в переходной от диффузионной к кинетической области. Вычисленные термодинамические показатели процесса сорбции, константы устойчивости образующихся комплексов в исследуемых системах позволяют говорить о сложном механизме сорбции: физическая, электрохимическая. Комплексные ионы, сорбируемые на поверхности УС за счет дисперсионных сил, взаимодействуя с активными центрами, образуют новые комплексные соединения, включая хелаты, путем присоединения, замещения или отщепления лигандов. В [25] для очистки СВ рекомендован волокнистый хемосорбент марки КН-1 в Na-форме. Очистка реальных СВ показала, что концентрация цинка, меди, свинца

уменьшалась соответственно в 4,3, 34,3, 9,7 и 1,1 раз. Способность металлов сорбироваться на волокнистом хемосорбенте КН-1 в лабораторных условиях из реальной водной системы (имеющей примесь нефтепродуктов и взвесь) уменьшалась в ряду медь>цинк>железо>>свинец. Выполненная работа является по сути основой новой технологии дополнительной очистки поверхностных стоков от тяжелых металлов. Различные образцы АУ были получены при обработке активирующего агента (H_3PO_4) с разными концентрациями и при разных температурах [26]. Результаты экспериментов показали снижение сорбции с повышением концентрации. Высокие концентрации кислоты приводят к получению мезопористой структуры за счет микропористой. Обработка при 450 °С ведет к увеличению микро- и мезопористой структуры АУ. Сорбенты с удельной поверхностью >1723 м²/г были получены при соответствующих концентрациях кислоты и температурах. Полученные образцы АУ были успешно использованы для удаления ионов Zn из водных растворов. В [27] исследовано влияние pH, дозы адсорбента, концентрации ионов Cu и Zn, температуры и времени контакта для определения оптимальных условий очистки сточных вод. Сорбционная способность угольной золы по отношению к меди 4,71 мг/г, по отношению к цинку 5,75 мг/г при 18 °С. Определены термодинамические параметры процесса сорбции на основании константы Ленгмюра. В [28] отмечается, что присутствие в природных водоисточниках и донных отложениях токсичных металлов отрицательно влияет на состояние здоровья людей и животных, на развитие растений. В данных исследованиях модельными металлами являлись медь и цинк. Исследовалась возможность снижения их концентрации в воде с использованием гидроксиапатита (синтетического). Установлено, что удаление металлов происходило в две стадии: на первой на поверхности минерала образовывался комплекс металл/минерал; на второй формировался осаждающийся продукт. При использовании металлов в растворах по отдельности сорбционная емкость гидроксиапатита для меди и цинка была практически одинаковой (от 0,015 до 0,764 ммоль/г), для смесей металлов в различных концентрациях/соотношениях емкость относительно одного из металлов снижалась на 10–76 %. Разработан [29] композиционный оксидно-гидроксидный сорбент на основе активированного угля и исследованы его сорбционные свойства по отношению к ионам металлов в статических и динамических условиях. В исследованиях [30] разрабатывался метод удаления из грунтовых и поверхностных вод тяжелых металлов. Пилотная установка представляла собой контейнер диаметром 15 см, заполненный летучей золой, выделявшейся при сжигании углей, и бентонитом. В эту среду высаживался вид декоративной растительности, выращиваемой на плантации, а через золу/бентонит фильтровалась исходная вода. Через шесть месяцев мышьяк, хром, ртуть, свинец и селен в фильтрате не детектировались, а медь, марганец, никель и цинк определялись в следовых концентрациях. Результаты исследований по биоаккумуляции приводятся в [31]. Сообщается, что промышленные СВ содержали ионы меди, никеля, цинка, хрома, свинца и кадмия, эти СВ сбрасывались в проточный пруд. В экспериментах использовалась выполненная в грунте емкость, являющаяся моделью пруда, в ней высаживался один из видов высшей водной растительности, длительность эксперимента составляла 100 сут. После этого часть растений извлекалась, обрабатывалась и в сухой массе определялось содержание металлов. Установлено, что в усредненной биомассе медь, никель, цинк, хром, свинец и кадмий содержались в концентрациях 29, 12,8, 119, 16,43, 98,3 и 7,8 мг/кг, при этом медь и никель аккумулировались преимущественно в корнях, цинк и хром – в корнях и стеблях, приводятся временные зависимости накопления и др. В [32] отмечается, что за последние 10 лет увеличилось количество теоретических и практических разработок, связанных с удалением из СВ тяжелых металлов с использованием сульфатредуцирующих бактерий (СРБ). Указывается, что одной из проблем при этом является чувствительность СРБ к токсикантам и высоким значениям ХПК. Проводились эксперименты, в ходе которых чувствительность СРБ к токсичному воздействию металлов компенсировалась за счет их иммобилизации в слое геля, а потребность в органических соединениях, необходимых в процессах восстановления, обеспечивалась также путем включения последних в состав геля. В приводимом примере

цинк в этой системе удалялся на 99 %, сообщается о разработке модели процесса и др. Целью работы [33] было изучение возможности извлечения тяжелых металлов (кадмий, медь, цинк) из концентрированных сточных вод методом фиторемедиации с помощью высших водных растений. Анализ полученных данных показал: 1) несмотря на чрезвычайно высокие (залповые) концентрации тяжелых металлов Zn, Cd в воде, высшие водные растения криптокорины и лимнофила способны к их извлечению и накоплению в фитомассе; 2) скорость и степень удаления металлов не одинаковы и зависят от природы фитосорбента, природы и концентрации извлекаемого металла. Из высококонцентрированных растворов с наиболее высокой скоростью происходит извлечение кадмия как криптокориной, так лимнофилой. В растворах концентрации 100 мг/л, и криптокорины и лимнофила способны к наибольшему накоплению Zn как в течение первого часа, так и по истечении пяти часов; далее следует Cd и с наименьшей скоростью извлекается медь; 3) установлено, что даже в случае гибели растения удерживают до 45 % извлеченного цинка и 30 % кадмия; 4) рекомендуется изъятие погибших и высадку новых растений по истечении 8...10 дней для чрезвычайно высоких концентраций (залповых) и 15...18 дней для менее концентрированных растворов, прежде чем начнется процесс отторжения растениями ТМ. В [34] исследована сорбция ионов Cu и Zn биомассой шпикер *Punusylvestrus L.* Полученные результаты показали, что адсорбция ионов металлов увеличивается с увеличением pH и резко падает с уменьшением pH. Максимальная сорбция Cu и Zn 67 % и 30 % соответственно. Изучен процесс [35] поглощения меди и цинка из раствора биомассой сухих дрожжей в зависимости от времени, исходной концентрации тяжелых металлов, размера частиц pH раствора. Выявлена зависимость процесса поглощения меди и цинка культурами микроорганизмов от размера частиц. В [36] описан способ очистки в том числе и от цинка, включающий обработку импульсными высоковольтными разрядами с одновременным насыщением воды диспергированным воздухом и последующую очистку на зернистых и сорбционных фильтрах в присутствии коагулянта. Разряд создают в водной среде в присутствии в зоне разряда гранул металла, образующего нерастворимые гидроксиды. Воду обрабатывают последовательностью импульсных разрядов с энергией импульса 0,3–0,7 кДж/дм³ частотой 0,5...2,0 Гц. Гранулы металла за счет гидравлических ударов образуют псевдооживленный слой и равномерно распределяются в объеме очищаемой воды. Последующую очистку осуществляют в трехслойном зернистом фильтрующем материале, образующем в водной среде электрохимический источник тока. Сначала фильтруют по направлению движения воды через слой гранул электроотрицательного материала, затем через диэлектрический материал, а затем через слой гранул электроположительного углеводородсодержащего материала со скоростью 5–10 м/ч. Природные и сточные воды могут быть очищены от железа, марганца, цинка, органических загрязнений, нефтепродуктов, вирусов. Сообщается [37], что вода природного источника, используемая при водоподготовке, содержала тяжелые металлы, в данном примере Zn²⁺ и Ni²⁺, а также линейные алкилбензосульфонаты (ЛАС), применяемые в качестве ПАВ. Разработана лабораторная установка, предназначенная для обработки этой воды. В ней комбинировались электрохимический реактор для удаления ионов металлов и реактор для фотокаталитического окисления органических соединений, в которой разрушались ЛАС. Этот реактор снабжался УФ-излучателем и в него дозировался катализатор в виде порошка TiO₂. Сообщается, что в оптимальных условиях цинк и никель удалялись на 86 и 56 % соответственно и ЛАС на 76 %. В [38] отмечается, что в зависимости от вида производства СВ могут содержать различные тяжелые металлы, в том числе цинк, медь, никель, свинец, ртуть, кадмий, серебро и др., или их смесь. Предлагается флотационный метод их очистки с использованием ступени флокуляции, схема содержит напорный флотатор, промежуточный усреднитель с большим временем пребывания и флокулятор, они замкнуты в контур циркуляции. Ступень флокуляции имеет статический усреднитель, на его вход подается флокулянт с удельно статический усреднитель, на его вход подается флокулянт с удельной массой до 100000 и выше, предусмотрено регулирование производительности дозатора, флотат удаляется скребками и обезвоживается на фильтр-прессе. В испытаниях схемы

содержание тяжелых металлов достигало 58 мг/л, свинец на выходе содержался менее 0,1 мг/л. Исследования [39] связаны с тем, что в урбанизированном регионе Туниса вода природного источника содержала ионы тяжелых металлов (ТМ), в том числе свинца, кадмия, меди и цинка. Разрабатывался метод их сорбционного удаления с использованием в качестве дешевого сорбента фосфорной руды, содержащей фосфаты. В одном варианте применялись фосфаты немодифицированные, в другом они предварительно модифицировались (ФМ). В экспериментах изменялись температура, pH, экспозиция и др. Показана возможность эффективного удаления ТМ с применением ФМ, при этом оптимальным значением pH при удалении Pb²⁺ являлась величина три, для Cd²⁺, Cu²⁺ и Zn²⁺ этот показатель равнялся шести. Сообщается [40], что при эксплуатации железнорудного месторождения добыча руды была прекращена в результате его истощения, однако фильтрация дренажных шахтных вод в грунтовые воды (ГВ) продолжалась; в результате ГВ содержали никель, цинк, мышьяк и т. д. В лабораторных и пилотных экспериментах разрабатывался метод удаления из ГВ тяжелых металлов в процессе коагуляции/осаждения, при этом колонка заполнялась смесью гранулята извести и карбоната кальция. Установлено, что в зависимости от долевого соотношения реагентов и гидравлического режима удаление никеля и цинка превышало 97 %, для мышьяка эти показатели находились в пределах 50–96 %, кадмий удалялся на 96 %. Сообщается [41], что СВ содержали медь, кобальт, никель, цинк, железо и серебро. На первых стадиях эксперимента для удаления этих катионов применялся процесс ультрафильтрации без дополнительных воздействий на СВ, однако при этом ионы задерживались мембраной неэффективно. На следующих стадиях в СВ дозировался высокомолекулярный комплексобразователь в виде поливинилового спирта, он образовывал крупные агрегаты комплексов с ионами металлов, которые эффективно задерживались на мембране, при этом эффективность удаления металлов составляла выше 97 %.

Выводы

Очистка производственных сточных вод от ионов тяжелых металлов, в том числе от ионов цинка, является весьма актуальной задачей, о чем свидетельствует количество научных публикаций, посвященных данной проблеме. Исследования ведутся по очистке сточных вод от цинка сорбционными методами [21–28], биосорбцией, биоаккумуляцией [30–35], электрохимическими [36–37], реагентными методами [38–41].

Экспериментальная часть. Материалы и методы исследований

В процессе исследований использовались физико-химические, технологические, математические методы. В данной работе объектом исследования являлась проба производственной сточной воды, полученной с предприятия СП ОАО "Брестгазоаппарат" 05 февраля 2025 года. Проба была отобрана из резервуара объемом 500 м³, где собираются сточные воды со всего завода. Концентрация ионов цинка в технологической воде до взаимодействия с торфом составила 2,1 мг/дм³.

В работе выполнялось экспериментальное исследование влияния крупности гранул измельченного брикетированного торфа и времени контакта его с пробой воды на величину снижения концентрации ионов цинка в производственных сточных водах СП ОАО "Брестгазоаппарат".

Для выполнения эксперимента использовался торфобрикет марки БТ-2, произведенный на ТБЗ «Гатча-Осовский», расположенном в Жабинковском районе Брестской области. Опыты осуществлялись следующим образом. Брикет механическим способом измельчался, затем рассеивали через набор сит калибром 1,0–2,0–3,0–4,0 мм. В результате были получены образцы крупностью < 1 мм, 1,00–2,0 мм, 2,0–3,0 мм, 3,0–4,0 мм. Далее исследовалась сорбция ионов цинка Zn²⁺. Исходный сток, объемом 100 мл, заливали в колбу и добавляли 10 г гранул торфа. Затем суспензию непрерывно перемешивали с помощью магнитной мешалки (рисунок 1) в течение 1, 3, 5, 10, 15, 20 и 40 минут. Растворы фильтровали через бумажный фильтр сорта «Синяя лента» (рисунок 2) и определяли остаточное содержание ионов цинка Zn²⁺.

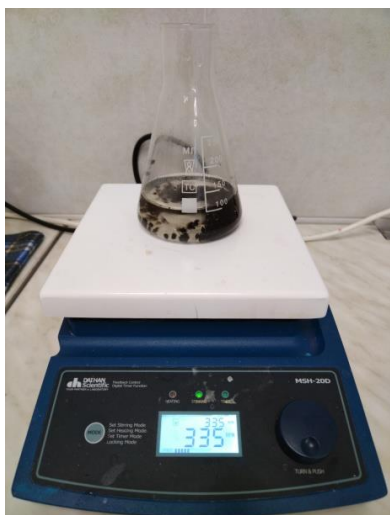


Рисунок 1 – Механическое перемешивание

Процесс сорбции ионов цинка на торфобрикетных зернах исследовали с использованием спектрофотометра СФ-2000 (рисунок 3) с кварцевыми кюветами толщиной слоя 1 см. Диапазон сканирования составлял до 620 нм, количество сканирований каждой пробы – 3. По результатам спектрофотометрических исследований оценивалась степень очистки сточных вод.



Рисунок 3 – Спектрофотометр СФ-2000

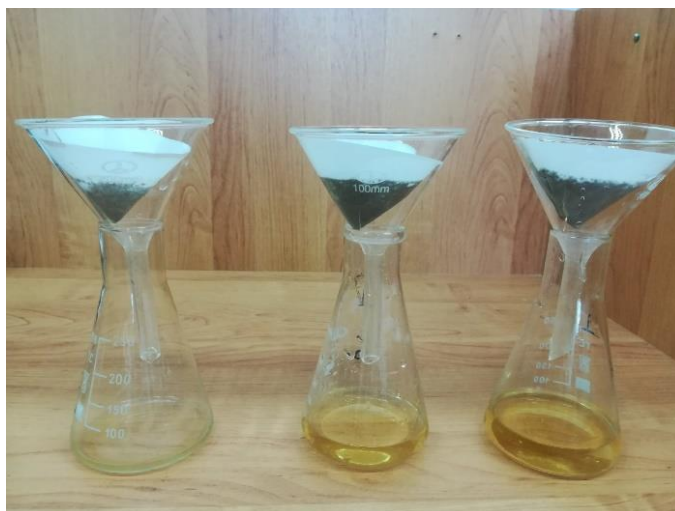


Рисунок 2 – Фильтрационное отделение сорбента

Результаты и их обсуждение

Предварительно изучалась зависимость эффекта очистки сточных вод от крупности зерен брикетированного торфа. Исследовали эффективность сорбции для гранул средних размеров 1 мм, 2 мм, 3 мм и 4 мм, при продолжительности контакта 15 минут, результаты приведены на рисунке 5.

Из рисунка 4 видно, что с увеличением крупности гранул сорбента эффективность сорбции снижается, это является следствием того, что уменьшается площадь межфазовой границы между сорбентом и раствором. Дальнейшие исследования выполнялись с гранулами размером около 2 мм.

На рисунке 4 эффективность процесса сорбции ионов цинка на брикетированном торфе выражена через эффект снижения концентрации ионов Zn^{2+} в сточной воде, определяемый по формуле

$$\Xi = \frac{C_{исх} - C_{обр}}{C_{исх}} \cdot 100, \% \quad (1)$$

где $C_{исх}$ – массовая концентрация ионов цинка в пробе воды до опыта;

$C_{обр}$ – массовая концентрация ионов цинка в пробе воды после опыта.

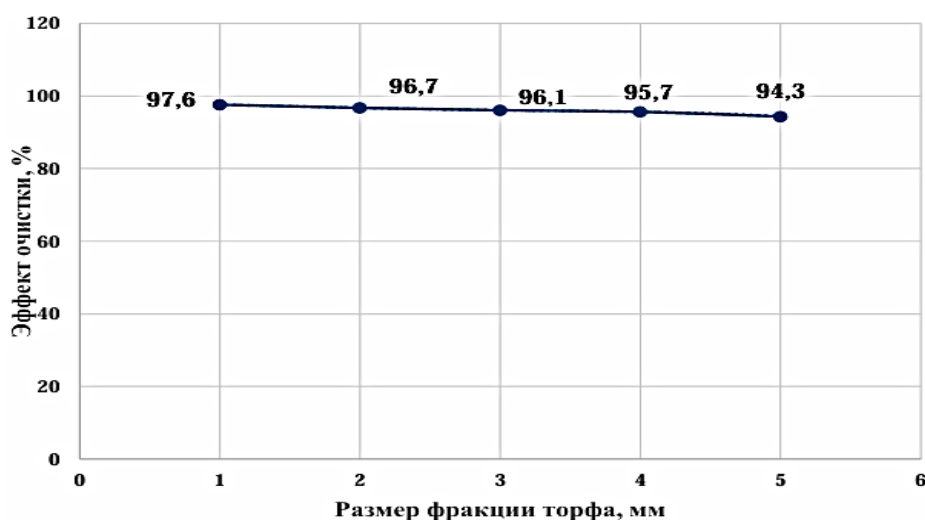


Рисунок 4 – Влияние размеров зерен брикетированного торфа на эффективность сорбции при продолжительности контакта 15 минут

Наиболее эффективно процесс сорбции ионов брикетированным торфом протекает в течении 20 минут контакта, затем он замедляется. В течении 20 минут удаляется до 96 % ионов Zn^{2+} (рисунок 5) и практически наступает сорбционное равновесие. Степень достиже-

ния равновесия F показывает, какая часть общего количества вещества сорбируется к данному моменту времени и для брикетированного торфа она составила $F = 0.86$ при продолжительности контакта 5 минут и $F = 0.99$ при контакте 40 минут (рисунок 6).

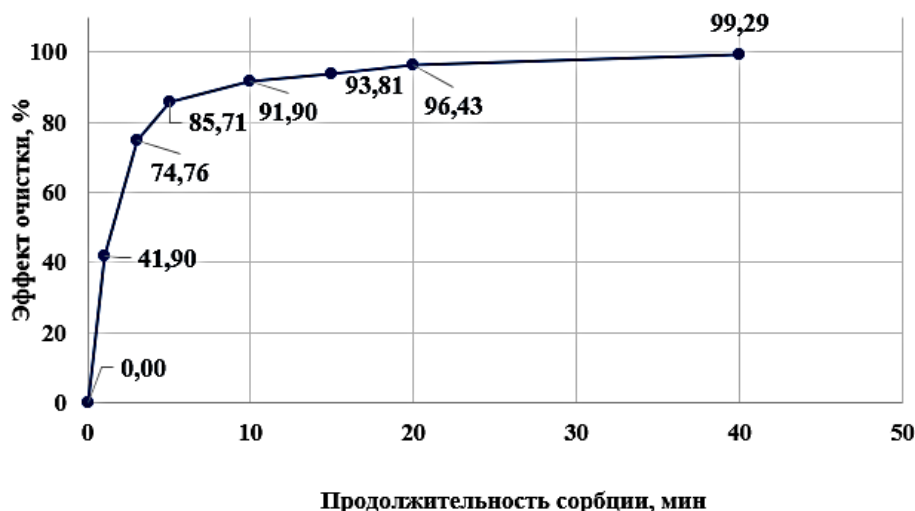


Рисунок 5 – Зависимость эффекта сорбции ионов Zn^{2+} от продолжительности контакта, мин

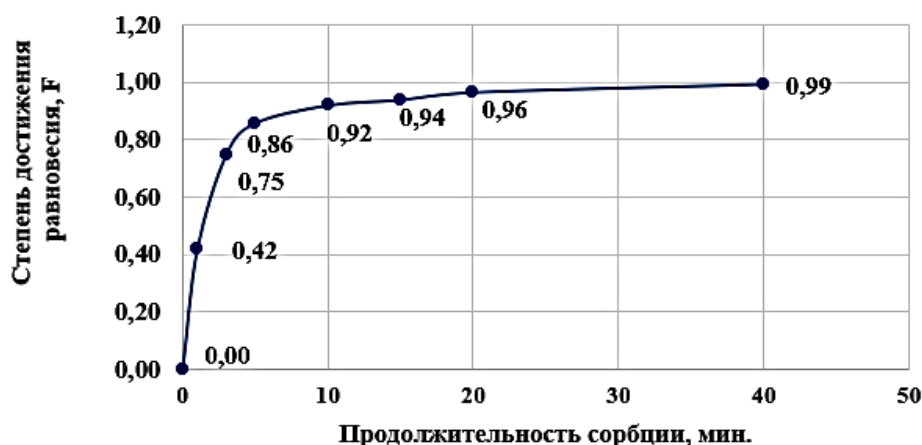


Рисунок 6 – Зависимость степени достижения равновесия от продолжительности контакта брикетированного торфа с раствором содержащим ионы Zn^{2+}

Для установления адсорбционной емкости брикетированного торфа был использован концентрированный раствор, содержащий 46 мг/л ионов цинка. После взаимодействия с навеской измельченного торфа в течение 20 минут остаточная концентрация ионов цинка составила 17 мг/л. Кинетическая кривая сорбции представлена на рисунке 7. Адсорбционная емкость брикетированного торфа рассчитывалась по уравнению

$$A = (C_1 - C_{\text{равн}}) \cdot \left(\frac{V}{m}\right), \quad (2)$$

где V – Объем раствора, дм^3 ;

m – масса навески брикетированного торфа, г;

C_1 – исходная концентрация ионов Zn^{2+} в растворе, ммоль/дм^3 ;

$C_{\text{равн}}$ – равновесная концентрация ионов Zn^{2+} в растворе после сорбции, ммоль/дм^3 .

Для выяснения механизма сорбции ионов цинка Zn^{2+} брикетированным торфом результаты экспериментов были обработаны с помощью уравнений диффузионной кинетики. Кинетическая кривая для внешне диффузионных процессов должна быть линейной в координатах $-\ln(A_e - A_t) - t$ (рисунок 8),

где A_e и A_t – количество сорбированного иона металла на единицу массы сорбента в состоянии равновесия и в момент времени t .

Кривая сорбции для ионов Zn^{2+} на начальном этапе описывается прямой, следовательно, диффузия в пленке раствора вносит вклад в

общую скорость процесса. При дальнейшем контакте график сорбции ионов цинка искривляется. Согласно литературным данным [36], это свидетельствует о том, что диффузия в зерне сорбента контролирует общую скорость процесса. В случае химического взаимодействия торфа с ионами тяжелых металлов (реакция ионного обмена) вклад в кинетику может вносить стадия собственно химической реакции между сорбируемым ионом и функциональными группами поглотителя. Поэтому для выявления вклада химической стадии при описании сорбционного процесса брикетированным торфом использовали модели псевдопервого и псевдвторого порядка [36]. Линейные формы этих моделей представлены в виде уравнений (3) и (4):

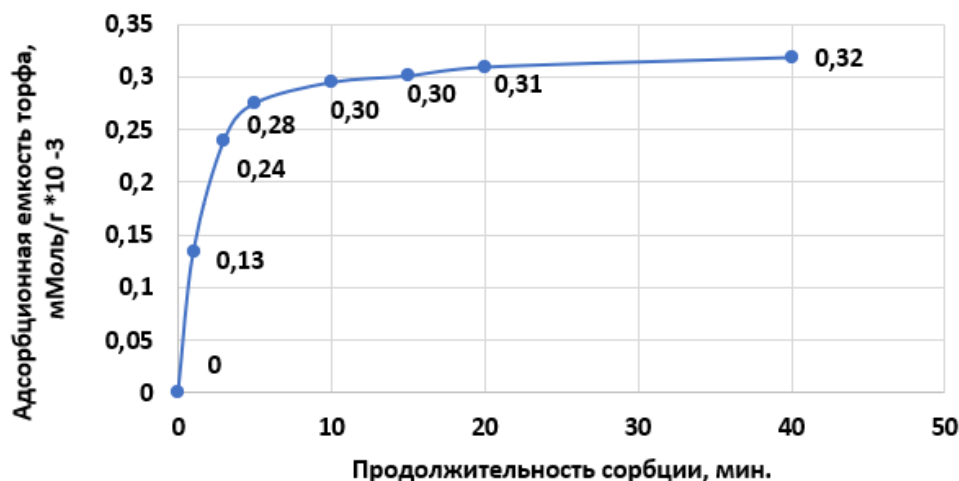
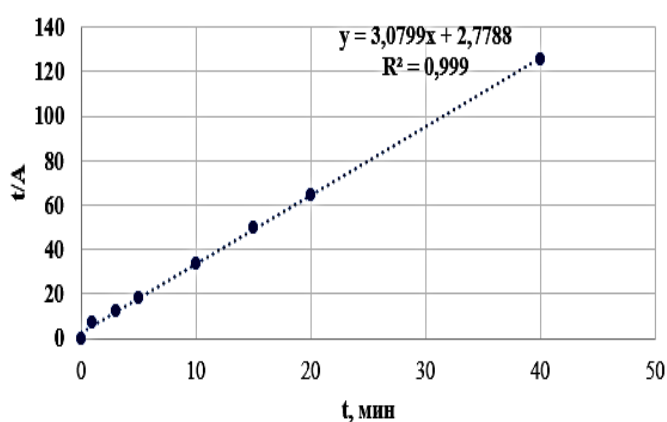
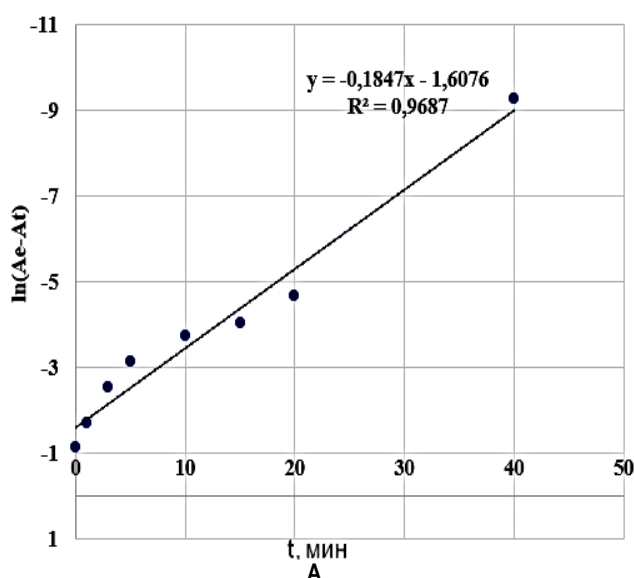
$$\ln(A_e - A_t) = \ln A_e - k_1 \cdot t, \quad (3)$$

$$\frac{t}{A_t} = \frac{1}{k_2 \cdot A_e^2} + \frac{1}{A_e} \cdot t, \quad (4)$$

где k_1 – константа скорости сорбции в модели псевдопервого порядка;

k_2 – константа скорости сорбции в модели псевдвторого порядка.

Для установления модели, оптимально описывающей сорбцию [37] на брикетированном торфе (рисунок 8) сравнивались коэффициенты корреляции псевдопервого и псевдвторого порядка. Установлено, что сорбция ионов Zn^{2+} наиболее точно описывается моделью псевдвторого порядка (рисунок 8 Б).

Рисунок 7 – Кинетическая кривая сорбции ионов Zn^{2+} брикетированным торфом

Б

Рисунок 8 – Кинетические кривые сорбции ионов цинка брикетированным торфом в моделях псевдопервого (А) и псевдовторого (Б) порядков

Заключение

• На основании обзора литературных источников: одним из распространенных ионов тяжелых металлов, загрязняющих природную среду, являются ионы цинка. Цинк попадает в водные объекты в результате сброса недостаточно очищенных сточных вод, присутствует в воде водотоков и водоемов, донных отложениях, а также биоаккумулируется в водной растительности. Наиболее эффективным способом предотвращения загрязнения водных объектов ионами цинка является более глубокая очистка производственных сточных вод.

• По результатам проведенных исследований снижения концентрации ионов цинка в сточных водах СП ОАО "Брестгазоаппарат" процессом сорбции брикетированным торфом было установлено:

– увеличением крупности зерен брикетированного торфа эффективность сорбции снижается;

– достаточная интенсивность процесса характеризуется тем, что за пять минут контакта эффект сорбции ионов Zn^{2+} составляет $\bar{\varepsilon} = 85,71\%$, а при 20 и 40 минутах – соответственно 96 %, и 99 %;

– сорбционная емкость при насыщении составила по Zn^{2+} 0,0045 мМоль/г (0,29 мг/г);

– согласно уравнениям диффузионной и химической кинетики процесс сорбции идет в диффузионном режиме, при этом вклад в общую скорость процесса вносит стадия химического взаимодействия ионов металла с функциональными группами торфа.

• Полученные результаты исследований свидетельствуют о возможности использования брикетированного торфа в качестве эффективного сорбента для очистки сточных вод от ионов Zn^{2+} .

Список цитированных источников

1. О Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года : постановление Совета Министров Республики Беларусь от 22 февраля 2022 г. № 91 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22200091> (дата обращения: 23.01.2025).
2. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии в водном хозяйстве промышленных предприятий : монография / Е. А. Урецкий. – Брест : БрГТУ, 2008. – 320 с.
3. Житенёв, Б. Н. Исследование сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов / Б. Н. Житенёв, Д. Д. Сенчук // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Водохозяйственное строительство, теплоснабжение, геология. – 2019. – № 2 (104). – С. 61–64.
4. Житенев, Б. Н. Исследование сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов кадмия, свинца и меди / Б. Н. Житенев, А. Д. Гуринович, Д. Д. Сенчук // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, Вып. 11. – С. 1534–1545. – DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1534-1545.

5. Колобаев, А. Н. Влияние технологических процессов производства на загрязненность поверхностного стока с территории предприятий сельскохозяйственного машиностроения / А. Н. Колобаев, О. К. Новикова // V Международный конгресс по управлению отходами и природоохранными технологиями (Вэистэк-2007), 29 мая – 1 июня 2007 г., Москва : сборник докладов. – М. : СИБИ-КО Инт. 2007. – С. 345–346.
6. Maximum likelihood mixture estimation to determine metal background values in estuarine and coastal sediments within the European Water Framework Directive / J. G. Rodriguez, I. Tueros, A. Borja [et al.] // Science of the Total Environment. – 2006. – Vol. 370, Iss. 2–3. – P. 278–293.
7. Chemical and bio-logical characteristics of dew and rain water in an urban coastal area (Bor-deaux, France) / D. Beysens, C. Ohayon, M. Muselli, O. Clus // Atmospheric Environment. – 2006. – Vol. 40, Iss. 20. – P. 3710–3723.
8. Попов, А. Н. Влияние соединений металлов, фтора, мышьяка (III+) и величины pH на процессы жизнедеятельности высшей водной растительности. 1. Влияние ионов цинка (2+), мышьяка (Ш+), фтора (-1) и величины pH на процессы жизнедеятельности водяной сосенки / А. Н. Попов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2008. – № 3. – С. 46–56.
9. Runoff of particle bound pollutants from urban impervious surfaces studied by analysis of sediments from stormwater traps / Jartun Morten, Ottesen Rolf Tore, Steinnes Eiliv, Volden Tore // Science of the Total Environment. – 2008. – Vol. 396, Iss. 2–3. – P. 147–163.
10. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan / Chen Chiu-Wen, Kao Chih-Ming, Chen Chih-Feng, Dong Cheng-Di // Chemosphere. – 2007. – Vol. 66, Iss. 8. – P. 1431–1440.
11. Water chemistry and ecotoxicity of an acid mine drainage-affected stream in subtropical China during a major flood event / C. Lin, Y. Wu, W. Lu [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – Vol. 142, Iss. 1–2. – P. 199–207.
12. In situ measurements of metal complex exchange kinetics in freshwater / Warnken Kent W., Davison William, Zhang Hao [et al.] // Environmental Science and Technology. – 2007. – Vol. 41, Iss. 9. – P. 3179–3185.
13. Atkinson, Clare A. Effect of overlying water pH, dissolved oxygen, salinity and sediment disturbances on metal release and sequestration from metal contaminated marine sediments / Clare A. Atkinson, Dianne F. Jolley, Stuart L. Simpson // Chemosphere. – 2007. – Vol. 69, Iss. 9. – P. 1428–1437.
14. MacFarlane, Geoff R. Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies / Geoff R. MacFarlane, Claudia E. Koller, Simon P. Blomberg // Chemosphere. – 2007. – Vol. 69, Iss. 9. – P. 1454–1464.
15. Research concerning the purification of the wastewater resulted from the galvanic processes. I. The retention of the Zn ions resulted / Maria Harja, Lacramioara Rusu, Florin Bandrabur, Constantin Harja // Modelling and Optimization in the Machines Building Field. – 2007. – Vol. 13, Iss. 2. – P. 321–326.
16. Omar, H. A. Use of activated carbon in removal of some radioisotopes from their waste solutions / H. A. Omar, H. Moloukhia // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – Vol. 157, Iss. 2–3. – P. 242–246.
17. Shikazono, N. Zinc contamination in river water and sediments at Taisyu Zn-Pb mine area, Tsushima Island, Japan / N. Shikazono, H. M. Zakir, Y. Sudo // Journal of Geochemical Exploration. – 2008. – Vol. 98, Iss. 3. – P. 80–88.
18. Hoffmann, Stephen R. Strong colloidal and dissolved organic ligands binding copper and zinc in rivers / Stephen R. Hoffmann, Martin M. Shafer, David E. Armstrong // Environmental Science and Technology. – 2007. – Vol. 41, Iss. 20. – P. 6996–7002.
19. Surface water quality of factory-based and vegetable-based peri-urban areas in the Yangtze River Delta region, China / Zhang Qing Li, Shi Xue Zheng, Huang Biao [et al.] // Catena. – 2007. – Vol. 69, Iss. 1. – P. 57–64.
20. Pollutant trends and hazard ranking in Elefsis Bay, Greece / M. Pantazidou, S. Kapniaris, A. Katsiri, A. Christidis // Desalination. – 2007. – Vol. 210, Iss. 1–3. – P. 69–82.
21. Эффективность применения молотого брусита в технологиях очистки воды / А. Белевцев, С. Байкова, В. Жаворонкова [и др.] // Аква-Маг. – 2007. – № 4. – С. 20–21.
22. Чалкова, Н. Л. Извлечение цинка из модельной воды сорбционными и гальванокоагуляционными методами / Н. Л. Чалкова, Д. А. Чалков // Вестник МГТУ (Магнитогорск). – 2008. – № 3. – С. 79–82, 94, 99.
23. Deliyanni, E. A. Removal of zinc ion from water by sorption onto iron-based nanoadsorbent / E. A. Deliyanni, E. N. Peleka, K. A. Matis // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – Vol. 141, Iss. 1. – P. 176–184.
24. Домрачева, В. А. Развитие теории и практики сорбционной технологии извлечения ценных компонентов из сточных вод и техногенных образований: автореф. дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук / В. А. Домрачева ; Иркут. гос. техн. ун-т. – Иркутск, 2006. – 43 с.
25. Мисин, В. М. Использование промышленных волокнистых хемосорбентов для очистки поверхностных стоков от ионов тяжелых металлов / В. М. Мисин, Е. В. Майоров // Экология речных бассейнов ЭРБ – 2007 : IV Международная научно-практическая конференция, Владимир, 28–30 сент. 2007 г. : труды. – Владимир : Владим. гос. ун-т, 2007. – С. 414–419.
26. Adsorption of Zn(II) in aqueous solution by activated carbons prepared from evergreen oak (Quercus rotundifolia L.) / M. del Mar Gomez-Tamayo, Antonio Macias-Garcia, M. Diez Angeles Diaz, M. Cuerda-Correa Eduardo // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – Vol. 153, Iss. 1–2. – P. 28–36.
27. Thermal power plants ash as sorbent for the removal of Cu(II) and Zn(II) ions from wastewaters / Tofan Lavinia, Paduraru Carmen, Bilba Doina, Rotariu Mugurel // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – Vol. 156, Iss. 1–3. – P. 1–8.
28. Corami, Alessia. Copper and zinc decontamination from single- and binary-metal solutions using hydroxyapatite / Alessia Corami, Silvano Mignardi, Vincenzo Ferrini // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – Vol. 146, Iss. 1–2. – P. 164–170.
29. Козырева, В. П. Разработка сорбционного процесса очистки сточных вод от ионов меди, цинка, кадмия / В. П. Козырева, Е. А. Фарберова, А. В. Виноградова // Химия и экология : тезисы докладов IX Краевой конференции студентов и молодых ученых, Пермь, 19 апр. 2007 г. – Пермь : ПГТУ, 2007. – С. 27–29.
30. Li Qiansheng. Heavy metal leaching from coal fly ash amended container substrates during Syngonium production / Li Qiansheng, Chen Jianjun, Li Yuncong // Journal of Environmental Science and Health – Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes. – 2008. – Vol. 43, Iss. 2. – P. 179–186.
31. Sadecka, Zofia. Metaleciezkie w trzciniepospolitej (Phragmitesaustralis) / Zofia Sadecka // Przemysl Chemiczny. – 2008. – Vol. 87, Iss. 5. – P. 557–562.
32. Control of metal toxicity, effluent COD and regeneration of gel beads by immobilized sulfate-reducing bacteria / Min Xiaobo, Chai Liyuan, Zhang Chuanfu [et al.] // Chemosphere. – 2008. – Vol. 72, Iss. 7. – P. 1086–1091.
33. Очистка сточных вод от тяжелых металлов / Л. Н. Ольшанская, Ю. А. Тарушкина, О. Н. Колесникова, Н. А. Собгайда // Энергосбережение в Саратов. обл. – 2008. – № 2. – С. 17–19.
34. Ucin, Handan. Copper(II) and zinc(II) biosorption on Pinus sylvestris L. / Ucin Handan, Aksakal Ozkan, Yildiz Ergun // Journal of Hazardous Materials. – 2009. – Vol. 161, Iss. 2–3. – P. 1040–1045.
35. Газнабиева, Р. Т. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов / Р. Т. Газнабиева, Г. А. Козлова // Химия и экология : тезисы докладов IX Краевой конференции студентов и молодых ученых, Пермь, 19 апр., 2007 г. – Пермь : ПГТУ, 2007. – С. 71–72.
36. Патент 2337070 Россия, МПК С 02 F 9/12 (2006.01). Способ очистки природных и сточных вод и устройство для его осуществления : № 2003107632/15 : заявл. 20.03.2003 : опубл. 27.10.2008 / Назаров В. Д., Алексеев С. А., Назаров М. В. ; гос. образ. учрежд. высш. проф. образ. «Уфим. гос. нефт. технич. ун-т».
37. Doan, H. D. Simultaneous removal of metal ions and linear alkylbenzene sulfonate by combined electrochemical and photocatalytic process / H. D. Doan, M. Saidi // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – Vol. 158, Iss. 2–3. – P. 557–567.

38. United States Patent 7332079, IPC C 02 F 1/24 (2006.01), C 02 F 1/56 (2006.01), NPK 210/221.2. Floatation process for removal of heavy metal and associated apparatus : N 10/641844 : filing date 15.08.2003 : publ. date 19.02.2008 / Industrial Waste Water Services, LLC, Lamar Coleman C. (Jr). – URL: <https://patents.google.com/patent/US7332079B2> (date of access: 19.01.2025).
 39. Heavy metal removal from aqueous solutions by activated phosphate rock / Z. Elouear, J. Bouzid, N. Boujelben [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 156, Iss. 1–3. – P. 412–420.
 40. Remediation of heavy metal contaminated groundwater originated from abandoned mine using lime and calcium carbonate / Lee Minhee, Paik In Sung, Kim Insu [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2007. – Vol. 144, Iss. 1–2. – P. 208–214.
 41. Mimoun Scheherazade. Purification of aqueous solutions of metal ions by ultrafiltration / Mimoun Scheherazade, Belazzougui Rafik Eddine, Amrani Farouk // *Desalination*. – 2007. – Vol. 217, Iss. 1–3. – P. 251–259.
- References**
1. O Nacional'noj strategii upravleniya vodnymi resursami v usloviyah izmeneniya klimata na period do 2030 goda : postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 22 fevralya 2022 g. № 91 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22200091> (data obrashcheniya: 23.01.2025).
 2. Ureckij, E. A. Resursosberegayushchie tekhnologii v vodnom hozyajstve promyshlennykh predpriyatij : monografiya / E. A. Ureckij. – Brest : BrGTU, 2008. – 320 s.
 3. ZHitenyov, B. N. Issledovanie sorbcionnykh svoystv briketirovannogo torfa dlya ochistki stochnykh vod ot ionov tyazhelykh metallov / B. N. ZHitenyov, D. D. Senchuk // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Seriya: Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika, geokologiya. – 2019. – № 2 (104). – S. 61–64.
 4. ZHitenyov, B. N. Issledovanie sorbcionnykh svoystv briketirovannogo torfa dlya ochistki stochnykh vod ot ionov kadmiya, svinca i medi / B. N. ZHitenyov, A. D. Gurinovich, D. D. Senchuk // *Vestnik MGSU*. – 2020. – T. 15, Vyp. 11. – S. 1534–1545. – DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1534-1545.
 5. Kolobaev, A. N. Vliyaniye tekhnologicheskikh processov proizvodstva na zagryaznennost' poverhnostnogo stoka s territorii predpriyatij sel'skohozyajstvennogo mashinostroeniya / A. N. Kolobaev, O. K. Novikova // V Mezhdunarodnyj kongress po upravleniyu otdomami i prirodohraneniyu tekhnologiyami (VejsTtek-2007), 29 maya – 1 iyunya 2007 g., Moskva : sbornik dokladov. – M. : SIBI-KO Int. 2007. – S. 345–346.
 6. Maximum likelihood mixture estimation to determine metal background values in estuarine and coastal sediments within the European Water Framework Directive / J. G. Rodriguez, I. Tueros, A. Borja [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2006. – Vol. 370, Iss. 2–3. – P. 278–293.
 7. Chemical and bio-logical characteristics of dew and rain water in an urban coastal area (Bor-deaux, France) / D. Beysens, C. Ohayon, M. Muselli, O. Clus // *Atmospheric Environment*. – 2006. – Vol. 40, Iss. 20. – P. 3710–3723.
 8. Popov, A. N. Vliyaniye soedinenij metallov, ftora, mysh'yaka (III+) i velichiny rN na processy zhiznedejatel'nosti vysshej vodnoj rastitel'nosti. 1. Vliyaniye ionov cinka (2+), mysh'yaka (SH+), ftora (-1) i velichiny rN na processy zhiznedejatel'nosti vodyanoj sosenki / A. N. Popov // *Vodnoye hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. – 2008. – № 3. – S. 46–56.
 9. Runoff of particle bound pollutants from urban impervious surfaces studied by analysis of sediments from stormwater traps / Jartun Morten, Ottesen Rolf Tore, Steinnes Eiliv, Volden Tore // *Science of the Total Environment*. – 2008. – Vol. 396, Iss. 2–3. – P. 147–163.
 10. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan / Chen Chiu-Wen, Kao Chih-Ming, Chen Chih-Feng, Dong Cheng-Di // *Chemosphere*. – 2007. – Vol. 66, Iss. 8. – P. 1431–1440.
 11. Water chemistry and ecotoxicity of an acid mine drainage-affected stream in subtropical China during a major flood event / C. Lin, Y. Wu, W. Lu [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2007. – Vol. 142, Iss. 1–2. – P. 199–207.
 12. In situ measurements of metal complex exchange kinetics in freshwater / Warnken Kent W., Davison William, Zhang Hao [et al.] // *Environmental Science and Technology*. – 2007. – Vol. 41, Iss. 9. – P. 3179–3185.
 13. Atkinson, Clare A. Effect of overlying water pH, dissolved oxygen, salinity and sediment disturbances on metal release and sequestration from metal contaminated marine sediments / Clare A. Atkinson, Dianne F. Jolley, Stuart L. Simpson // *Chemosphere*. – 2007. – Vol. 69, Iss. 9. – P. 1428–1437.
 14. MacFarlane, Geoff R. Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies / Geoff R. MacFarlane, Claudia E. Koller, Simon P. Blomberg // *Chemosphere*. – 2007. – Vol. 69, Iss. 9. – P. 1454–1464.
 15. Research concerning the purification of the wastewater resulted from the galvanic processes. I. The retention of the Zn ions resulted / Maria Harja, Lacramioara Rusu, Florin Bandrabur, Constantin Harja // *Modelling and Optimization in the Machines Building Field*. – 2007. – Vol. 13, Iss. 2. – P. 321–326.
 16. Omar, H. A. Use of activated carbon in removal of some radioisotopes from their waste solutions / H. A. Omar, H. Moloukhia // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 157, Iss. 2–3. – P. 242–246.
 17. Shikazono, N. Zinc contamination in river water and sediments at Taisyu Zn-Pb mine area, Tsushima Island, Japan / N. Shikazono, H. M. Zakir, Y. Sudo // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2008. – Vol. 98, Iss. 3. – P. 80–88.
 18. Hoffmann, Stephen R. Strong colloidal and dissolved organic ligands binding copper and zinc in rivers / Stephen R. Hoffmann, Martin M. Shafer, David E. Armstrong // *Environmental Science and Technology*. – 2007. – Vol. 41, Iss. 20. – P. 6996–7002.
 19. Surface water quality of factory-based and vegetable-based peri-urban areas in the Yangtze River Delta region, China / Zhang Qing Li, Shi Xue Zheng, Huang Biao [et al.] // *Catena*. – 2007. – Vol. 69, Iss. 1. – P. 57–64.
 20. Pollutant trends and hazard ranking in Elefsis Bay, Greece / M. Pantazidou, S. Kapniaris, A. Katsiri, A. Christidis // *Desalination*. – 2007. – Vol. 210, Iss. 1–3. – P. 69–82.
 21. Effektivnost' primeneniya molotogo brusita v tekhnologiyah ochistki vody / A. Belevcev, S. Bajkova, V. ZHavoronkova [i dr.] // *Akva-Mag*. – 2007. – № 4. – S. 20–21.
 22. CHalkova, N. L. Izvlechenie cinka iz model'noj vody sorbcionnymi i gal'vanokoagulyacionnymi metodami / N. L. CHalkova, D. A. CHalkov // *Vestnik MGTU (Magnitogorsk)*. – 2008. – № 3. – S. 79–82, 94, 99.
 23. Deliyanni, E. A. Removal of zinc ion from water by sorption onto iron-based nanoadsorbent / E. A. Deliyanni, E. N. Peleka, K. A. Matis // *Journal of Hazardous Materials*. – 2007. – Vol. 141, Iss. 1. – P. 176–184.
 24. Domracheva, V. A. Razvitie teorii i praktiki sorbcionnoj tekhnologii izvlecheniya cennykh komponentov iz stochnykh vod i tekhnogennykh obrazovaniy: avtoref. dis. na soisk. uch. step. dokt. tekhn. nauk / V. A. Domracheva ; Irkut. gos. tekhn. un-t. – Irkutsk, 2006. – 43 s.
 25. Misin, V. M. Ispolzovanie promyshlennykh voloknistykh hemosorbentov dlya ochistki poverhnostnykh stokov ot ionov tyazhelykh metallov / V. M. Misin, E. V. Majorov // *Ekologiya rechnykh bassejnov ERB*. – 2007 : IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, Vladimir, 28–30 sent. 2007 g. : trudy. – Vladimir : Vladim. gos. un-t, 2007. – S. 414–419.
 26. Adsorption of Zn(II) in aqueous solution by activated carbons prepared from evergreen oak (*Quercus rotundifolia* L.) / M. del Mar Gomez-Tamayo, Antonio Macias-Garcia, M. Diez Angeles Diaz, M. Cuerda-Correa Eduardo // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 153, Iss. 1–2. – P. 28–36.
 27. Thermal power plants ash as sorbent for the removal of Cu(II) and Zn(II) ions from wastewaters / Tofan Lavinia, Paduraru Carmen, Bilba Doina, Rotariu Mugurel // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 156, Iss. 1–3. – P. 1–8.

28. Corami, Alessia. Copper and zinc decontamination from single- and binary-metal solutions using hydroxyapatite / Alessia Corami, Silvano Mignardi, Vincenzo Ferrini // *Journal of Hazardous Materials*. – 2007. – Vol. 146, Iss. 1–2. – P. 164–170.
29. Kozyreva, V. P. Razrabotka sorbционного процесса oчитki stochnyh vod ot ionov medi, cinka, kadmiya / V. P. Kozyreva, E. A. Farberova, A. V. Vinogradova // *Himiya i ekologiya : tezisy dokladov IX Kraevoy konferencii studentov i molodyh uchenyh*, Perm', 19 apr. 2007 g. – Perm' : PGU, 2007. – S. 27–29.
30. Li Qiansheng. Heavy metal leaching from coal fly ash amended container substrates during Syngonium production / Li Qiansheng, Chen Jianjun, Li Yuncong // *Journal of Environmental Science and Health – Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*. – 2008. – Vol. 43, Iss. 2. – P. 179–186.
31. Sadecka, Zofia. Metaleciezkie w trzciniepospolitej (*Phragmites australis*) / Zofia Sadecka // *Przemysl Chemiczny*. – 2008. – Vol. 87, Iss. 5. – P. 557–562.
32. Control of metal toxicity, effluent COD and regeneration of gel beads by immobilized sulfate-reducing bacteria / Min Xiaobo, Chai Liyuan, Zhang Chuanfu [et al.] // *Chemosphere*. – 2008. – Vol. 72, Iss. 7. – P. 1086–1091.
33. Oчитka stochnyh vod ot tyazhelyh metallov / L. N. Ol'shanskaya, YU. A. Tarushkina, O. N. Kolesnikova, N. A. Sobgajda // *Energobezbezhenie v Saratov. obl.* – 2008. – № 2. – S. 17–19.
34. Ucin, Handan. Copper(II) and zinc(II) biosorption on *Pinus sylvestris* L. / Ucin Handan, Aksakal Ozkan, Yildiz Ergun // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 161, Iss. 2–3. – P. 1040–1045.
35. Gaznabieva, R. T. Oчитka stochnyh vod ot ionov tyazhelyh metallov / R. T. Gaznabieva, G. A. Kozlova // *Himiya i ekologiya : tezisy dokladov IX Kraevoy konferencii studentov i molodyh uchenyh*, Perm', 19 apr., 2007 g. – Perm' : PGU, 2007. – S. 71–72.
36. Patent 2337070 Rossiya, MPK C 02 F 9/12 (2006.01). Sposob oчитki prirodnyh i stochnyh vod i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya : № 2003107632/15 : zayavl. 20.03.2003 : opubl. 27.10.2008 / Nazarov V. D., Alekseev S. A., Nazarov M. V. ; gos. obraz. uchrezhd. vyssh. prof. obraz. «Ufim. gos. neft. tekhnich. un-t».
37. Doan, H. D. Simultaneous removal of metal ions and linear alkylbenzene sulfonate by combined electrochemical and photocatalytic process / H. D. Doan, M. Saidi // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 158, Iss. 2–3. – P. 557–567.
38. United States Patent 7332079, IPC C 02 F 1/24 (2006.01), C 02 F 1/56 (2006.01), NPK 210/221.2. Floatation process for removal of heavy metal and associated apparatus : N 10/641844 : filing date 15.08.2003 : publ. date 19.02.2008 / Industrial Waste Water Services, LLC, Lamar Coleman C. (Jr). – URL: <https://patents.google.com/patent/US7332079B2> (date of access: 19.01.2025).
39. Heavy metal removal from aqueous solutions by activated phosphate rock / Z. Elouear, J. Bouzid, N. Boujelben [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – Vol. 156, Iss. 1–3. – P. 412–420.
40. Remediation of heavy metal contaminated groundwater originated from abandoned mine using lime and calcium carbonate / Lee Minhee, Paik In Sung, Kim Insu [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2007. – Vol. 144, Iss. 1–2. – P. 208–214.
41. Mimoune Scheherazade. Purification of aqueous solutions of metal ions by ultrafiltration / Mimoune Scheherazade, Belazzougui Rafik Eddine, Amrani Farouk // *Desalination*. – 2007. – Vol. 217, Iss. 1–3. – P. 251–259.

Материал поступил 21.02.2025, одобрен 10.03.2025,
принят к публикации 11.03.2025

УДК 504.3.054

МЕТОДОЛОГИЯ СНИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ**Г. И. Морзак¹, Н. В. Сидорская², С. С. Мартынюк³**¹ К. т. н., доцент кафедры «Инженерная экология», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: gmorzak@bntu.by² Старший преподаватель кафедры «Инженерная экология», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: nsidorskaya@bntu.by³ Старший преподаватель кафедры «Инженерная экология», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: smartyniuk@bntu.by**Реферат**

Одной из важнейших задач, стоящих в наши дни перед мировым международным сообществом, является борьба с глобальным изменением климата. Углеродный след рассматривается как важный инструмент для оценки воздействия промышленности на окружающую среду, а также обеспечения устойчивого развития общества. Углеродный след подразделяется на первичный и вторичный (косвенный). Первичный углеродный след формируется в результате потребления ископаемого топлива. Вторичный углеродный след определяется как выбросы парниковых газов, которые происходят в течение жизненного цикла всех используемых продуктов. Понимание углеродного следа больше не является просто экологической проблемой, в настоящее время это критическая деловая необходимость для различных производств и отраслей народного хозяйства. По мере ускорения изменения климата предприятия сталкиваются с растущим давлением в отношении сокращения выбросов парниковых газов не только для защиты окружающей среды, но и для поддержания своей репутации и прибыли. Однако многие компании испытывают трудности с точным измерением, управлением и снижением своего углеродного следа.

В статье исследованы основные этапы формирования выбросов парниковых газов в промышленном секторе, принципы количественной оценки углеродного следа продукции. Определена методология снижения углеродного следа для предприятий, которая должна базироваться на описании и учете четырех этапов оценки жизненного цикла продукции. Основными направлениями природоохранных решений по уменьшению выбросов парниковых газов являются внедрение технологий, позволяющих значительно снизить выбросы CO₂, а также решения, направленные на совершенствование используемых технологий с минимизацией входных потоков. В статье приведены примеры таких решений.

Ключевые слова: выбросы парниковых газов, углеродный след продукции, составляющие углеродного следа продукции, стадии жизненного цикла продукции, природоохранные решения по уменьшению выбросов CO₂.

METHODOLOGY FOR REDUCING CARBON FOOTPRINT FOR ENTERPRISES**G. I. Morzak, N. V. Sidorskaya, S. S. Martyniuk****Abstract**

One of the most important challenges facing the world international community today is the fight against global climate change. Carbon footprint is an important tool for assessing the impact of industry on the environment, as well as ensuring the sustainable development of society. Carbon footprint can be divided into primary and secondary (indirect). The primary carbon footprint is formed as a result of the consumption of fossil fuels. The secondary carbon footprint is defined as greenhouse gas emissions that occur during the life cycle of all products used. Understanding the carbon footprint is no longer just an environmental issue, it is now a critical business need for various industries and sectors of the national economy. As climate change accelerates, businesses face increasing pressure to reduce greenhouse gas emissions not only to protect the environment, but also to maintain their reputation and profits. However, many companies have difficulty accurately measuring, managing and reducing their carbon footprint.

The article examines the main stages of greenhouse gas emissions in the industrial sector, principles of quantitative assessment of the carbon footprint of products. A methodology for reducing the carbon footprint for enterprises is defined, which should be based on the description and consideration of four stages of product life cycle assessment. The main areas of environmental solutions for reducing greenhouse gas emissions are the introduction of technologies that can significantly reduce CO₂ emissions, as well as solutions aimed at improving the technologies used while minimizing input flows. The article provides examples of such solutions.

Keywords: greenhouse gas emissions, carbon footprint of products, components of the carbon footprint of products, stages of the product life cycle, environmental solutions for reducing CO₂ emissions.

Введение

Производство готовой продукции нужно рассматривать как совокупность технологических процессов, направленных на превращение сырья в заданную продукцию, обладающую различными физико-механическими свойствами. Для этого используют инновационное технологическое оборудование, механизмы, приспособления. Процесс производства сопровождается значимыми воздействиями на окружающую среду, в том числе большими эмиссиями загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Углеродный след продукции (УСП) представляет собой общий объем выбросов парниковых газов (ПГ) от деятельности предприятия/организации по производству товаров и оказанию услуг, а также при реализации проектов. Он учитывает как прямые, так и косвенные выбросы ПГ на каждой стадии жизненного цикла продукции (ЖЦП), включая проектирование, эксплуатацию, обслуживание и ликвидацию/реконструкцию производства.

К существенным техногенным изменениям климата приводят выбросы определенных видов газов. Согласно МГЭИК, определяющим в этой тенденции является значимое увеличение объемов ПГ, в основном диоксида углерода (CO₂) [1, 2, 3, 4]. Основными источниками выделения CO₂ являются процессы сжигания топлива в жилищно-коммунальном хозяйстве, на предприятиях или электростанциях. Такие ПГ, как метан, оксиды азота, хладагенты, выбросы специфических производств, также оказывают отрицательное влияние на процессы и химический состав атмосферы.

Подходы к количественной оценке углеродного следа продукции

На всех стадиях производственного цикла от поставки сырья, проектирования, производства, транспортирования/доставки до использования произведенной продукции и ее утилизации могут фиксироваться выбросы/поглощение ПГ. Необходимость проведения количественной оценки УСП способствует контролировать ситуацию

и своевременно внедрять эффективные технологические решения по сокращению/поглощению выбросов ПГ на протяжении всего ЖЦП. Для минимизации воздействий ПГ на окружающую среду необходимо применять принципы количественной оценки УСП, с учетом данных обо всех выбросах/поглощениях ПГ на всех стадиях ЖЦП.

К основным принципам оценки УСП относятся:

- концепция ЖЦП (учет всех этапов);
- относительный подход и функциональная (заявленная) единица (полученные результаты оценивать относительно этой единицы);
- итеративный подход (учет четырех основных этапов – цель и области исследования, инвентаризационный анализ ЖЦП, оценки воздействия ЖЦП и его интерпретация);
- научный подход (применение естественно-научных методов (физических, химических, биологических), научных методов (социальных, экономических) и международный опыт);
- актуальность;
- полнота (учет всех потоков выбросов/поглощений ПГ);
- согласованность применения методов;
- последовательность (применение методологий, стандартов для повышения эффективности результатов оценки);

- точность (обоснованная количественная оценка УСП);
- прозрачность (доступность информации);
- предотвращение повторного учета (однократное распределение выбросов/поглощений ПГ).

Для классификации выбросов ПГ и выбора инструментов их учета предприятия применяют «Протокол по парниковым газам» GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol) [5]. Основные положения данного документа направлены на количественную оценку и направления обращения с выбросами ПГ. Все производственные выбросы ПГ необходимо рассматривать как прямые и косвенные и классифицировать по трем категориям – Score 1 (прямые выбросы ПГ), Score 2 (косвенные «энергетические» выбросы) и Score 3 (косвенные, прочие выбросы). Категория Score 3 включает выбросы транспортных средств других предприятий на доставку сырья, материалов, продукции, от услуг логистических центров, а также от утилизации отходов продукции и др. Все объемы выбросов категории Score 1 и Score 2 являются обязательными при количественной оценке ПГ, выбросы категории 3 – добровольными, поскольку их трудно отследить. Совокупность всех выбросов ПГ, прямо и косвенно произведенных предприятием, составляет УСП (рисунок 1).

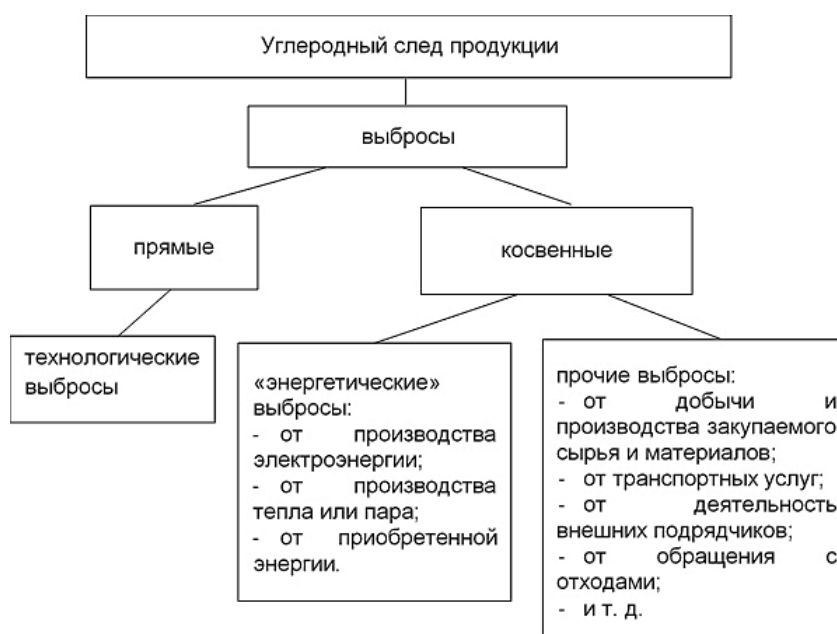


Рисунок 1 – Составляющие углеродного следа продукции

Оценка УСП – один из основных видов углеродной отчетности. Основные требования и подходы к процессу оценки УСП заложены в международных стандартах серии ISO 14060. Для поддержки концепции устойчивого развития с использованием принципов низкоуглеродной экономики при организации производственной деятельности необходимо соблюдать требования данных стандартов. Такой подход позволит предприятиям обеспечить последовательность и достоверность мониторинга, отчетности и верификации выбросов/поглощения ПГ и их количественной оценки.

Международный стандарт ISO 14064–2018 «Greenhouse Gases» (в трех частях) содержит основные рекомендации по процедуре мониторинга, количественной оценки выбросов ПГ и составлению документации по управлению/сокращению их выбросов. Требования и указания по количественной оценке частного УСП изложены в международном стандарте ISO 14067:2018 «Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification». Данная оценка УСП состоит из расчета потенциального вклада продукта в глобальное потепление, выражаемого в единицах CO₂-экв., на основе количественной оценки существенных выбросов/поглощений ПГ на протяжении всего ЖЦП [6, 7].

В 2021 году Европейской комиссией был разработан проект климатического законодательства, который содержит новые предложе-

ния и поправки в существующие законы. Главным аргументом данного акта является стремление к достижению цели по сокращению выбросов ПГ на 55 % к 2030 году и достижению их нулевого уровня к 2050 году. Для достижения поставленной цели предложено внедрение механизма трансграничного углеродного регулирования (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM). Реализация этого механизма базируется на продаже сертификатов для ввоза в Европейский союз товаров углеродоемкого производства по установленному перечню [8].

В Республике Беларусь разрабатывается «Стратегия долгосрочного развития Республики Беларусь с низким уровнем выбросов парниковых газов на период до 2050 года». Главным направлением Стратегии является внедрение на предприятиях технологий, позволяющих перейти на устойчивое низкоуглеродное развитие. Выполнение задачи позволит снизить нагрузку на окружающую среду и не приведет к значимым климатическим изменениям [9, 10].

Основные задачи Стратегии представлены на рисунке 2. Стратегия базируется на анализе данных прогнозов, замечаниях и предложениях по их возможной корректировке, с учетом международного опыта подготовки сценарных прогнозов и ключевой цели Парижского соглашения – достижения нуля нетто-выбросов парниковых газов во второй половине XXI века (к 2050 году, для недопущения роста температуры >1,5–2 °C).



Рисунок 2 – Задачи «Стратегия долгосрочного развития Республики Беларусь с низким уровнем выбросов парниковых газов на период до 2050 года»

Наиболее значимым по объему выбросов ПГ в Республике Беларусь является диоксид углерода (CO_2), доля диоксида углерода (CO_2), метан (CH_4), закиси азота (N_2O) и гексафторида серы (SF_6) в выбросах ПГ от предприятий республики представлена на рисунке 3.

Динамика выделения ПГ в экономическом секторе Республики Беларусь за 2015–2022 г. представлена на рисунке 4 (по данным [11, 12, 13]). Значительный вклад в общий объем ПГ вносят выбросы предприятий энергетики (от любого сжигания топлива) и сельского хозяйства.

При прогнозировании выбросов ПГ предусмотрены три сценария – сценарий «Без мер» (после 2015 г. все планируемые меры по транспорту реализовываться не будут), сценарий «С мерами» (меры реализуются в соответствии с программами развития различных отраслей экономики), сценарий «С дополнительными мерами» (меры могут быть реализованы при наличии соответствующего финансирования).

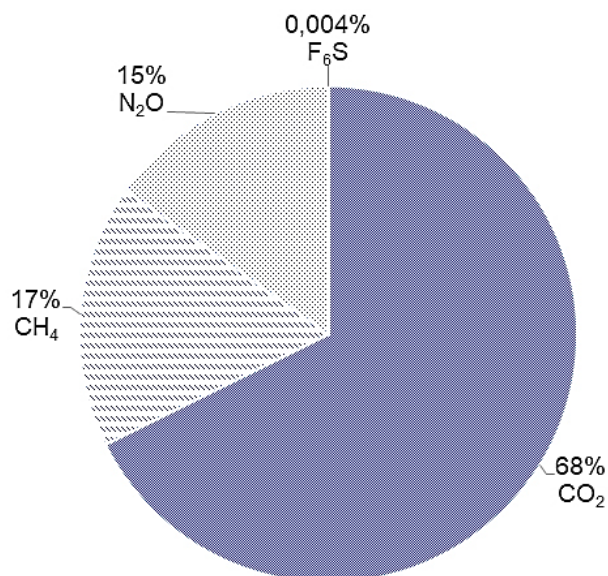


Рисунок 3 – Доля основных компонентов ПГ (без нетто-стоков CO_2 сектора землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства)

Отдельные процессы технологической системы должны группироваться по этапам ЖЦП. Выбросы/поглощения ПГ в ЖЦП должны учитываться только на этапах их образования. Предприятие может разрабатывать собственный системный подход к оценке УСП [14, 15, 16].

Граница технологической системы охватывает все единичные процессы, ЖЦП. Выбор границы системы определяется целью исследования. Граница системы ограничивается стадией «cradle-to-gate». Методология «cradle-to-gate» была стандартизирована на международном уровне посредством стандартов ISO 14040 и ISO 14044, согласно которым проводится оценка жизненного цикла [17, 18].

ЖЦП включает этапы добычи сырья, его подготовки, все стадии производства, использования, переработки по истечению срока службы и транспортировку [19].

Для экологической оценки продукции важно рассмотреть весь жизненный цикл продукта и учесть все экологические нагрузки на этих этапах ЖЦП. Для этого необходимо разработать и внедрить обоснованную методологию, методы анализа, компьютерное моделирование и методы расчетов. Оценка ЖЦП является наиболее эффективным методом для контроля воздействий на окружающую среду в течение всего ЖЦП. Основными экологическими показателями при проведении оценки являются качественные и количественные характеристики выбросов загрязняющих веществ и объемы потребление энергии. Конечная стадия определяется образованием отходов или утилизацией конечных остатков, включая любую упаковку, не покидающую территорию предприятия вместе с продукцией.

Таким образом, граница системы включает в себя те процессы, которые обеспечивают поступление материалов и энергии в систему и последующие процессы производства и транспортировки до границы предприятия, а также обращение с любыми отходами, возникающими в результате этих процессов. Экологическая оценка продукционной системы, с учетом стадий жизненного цикла, основана на перечислении и количественной оценке всех входящих и выходящих потоков исследуемой системы.

Инвентаризационный анализ жизненного цикла учитывает все входные и выходные потоки, необходимые для создания конкретной функциональной единицы в соответствии с определенными целями. Результаты инвентаризационного анализа технологии и данных являются необходимыми:

- для подробного описания единичного процесса с учетом показателей входных и выходных потоков;
- составления реестра потоков и данных о рабочих режимах стадий технологического процесса;
- выбора единиц измерения;
- разработки методов сбора и обработки данных.



Рисунок 4 – Выбросы ПГ по секторам экономики без учета землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства (млн тонн CO₂-эквивалента в год)

Для контроля выбросов в атмосферу, потребления энергии и определения источников или параметров, оказывающих влияние на экологические показатели, необходимо использовать метод анализа, такой как методология анализ жизненного цикла. С помощью методов компьютерного моделирования и расчетов определяются единичные входные и выходные потоки для каждого единичного процесса, которые в свою очередь формировались в процесс производства. На основании актов инвентаризации выбросов в атмосферный

воздух каждому входному и выходному параметру присваиваются количественные значения в пересчете на функциональную единицу.

Современные природоохранные решения по уменьшению выбросов углекислого газа (CO₂) подразделяются на два типа: первичные решения направлены на снижения выбросы CO₂ максимально на 15–20 % при умеренных расходах, вторичные – внедрение технологий, позволяющих значительно снизить выбросы CO₂ (более чем на 50 %). Пример таких решений представлен на рисунке 5.

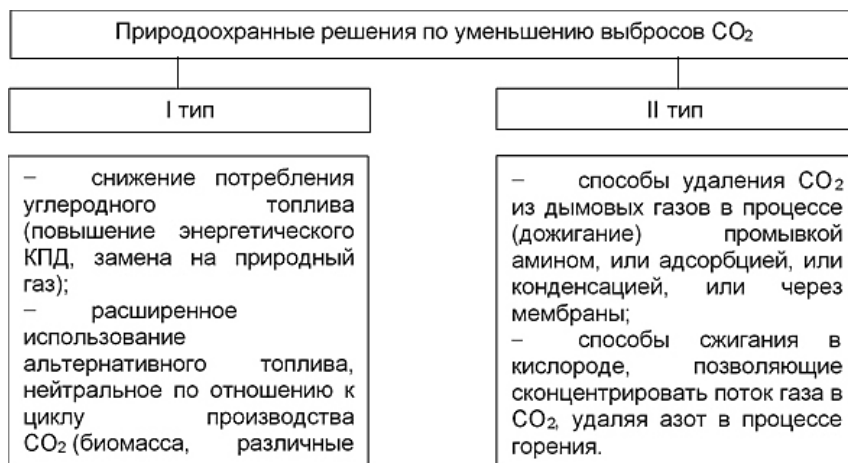


Рисунок 5 – Пример природоохранные решения по уменьшению выбросов CO₂

Совершенствование технологии декарбонизации, которая включает стадии улавливания, использования и хранения углерода (Carbon capture, use and storage – CCU), может позволить снизить объемы промышленных выбросов CO₂ с дальнейшей его транспортировкой или хранением. Дополнительно CCUS может обеспечить низкоуглеродные способы производства электроэнергии. Кроме того, два приложения CCUS – биоэнергетика с улавливанием и хранением углерода (bioenergy with carbon capture and storage – BECCS) и прямое улавливание и хранение углерода в воздухе (direct air carbon capture and storage – DACCS) – могут удалять существующий CO₂ из атмосферы. BECCS и DACCS входят в более широкий набор методов, которые совместно называются методами удаления диоксида углерода (carbon dioxide removal – CDR) или отрицательными методами выбросов (negative emissions techniques – NETs), которые предназначены для противодействия последствиям изменения климата путем снижения концентрации CO₂ в атмосфере [20]. Декарбонизация промышленных выбросов базируется на комплексе правовых, технических и организационных мероприятий. Эти процессы должны быть инновационными, отвечать экономической целесообразности и иметь государственную поддержку [21, 22].

На основании анализа используемых технологий, природоохранной деятельности предприятий разрабатываются направления и мероприятия по снижению содержания CO₂ в производственных отходящих газах [23]. Для этого может быть предложено внедрение системы очистки отходящих газов методом промывки амином. Основным технологическим оборудованием такой системы промывки амином является установка УОГ-20/100/200. После очистки отходящие газы могут использоваться повторно в технологическом процессе, например для подогрева сырьевой смеси. Очистка газа проводится при температуре +10...+50 °С, не требует дополнительного нагрева и повышения давления для его транспортировки. Конструктивно установка УОГ-20/100/200 – это совокупность простых технологических решений, поэтому для нее не характерны высокие эксплуатационные затраты и дополнительные штатные единицы на обслуживание. Экологический эффект от внедрения системы очистки отходящих газов методом промывки амином заключается в поглощении CO₂ и снижении валовых выбросов загрязняющих веществ.

Заключение

Для сокращения влияния парниковых газов на окружающую среду необходимо использовать методы количественного анализа углеродного следа, при этом учитывать данные о всех выбросах и поглощениях ПГ на каждом этапе жизненного цикла продукта.

Анализ УСП является одним из ключевых методов учета углерода. Основополагающие критерии и методики процесса анализа УСП закреплены в глобальных нормах серии ISO 14060. Для обеспечения концепции долговременного развития путем применения принципов экономики с минимальными выбросами углерода в процессе организации производственных операций требуется выполнение требований указанных норм.

Таким образом, подход уменьшения углеродного следа для организаций должен опираться на четыре стадии анализа жизненного цикла продукции: определение рамок изучаемого технического комплекса, инвентаризационный анализ жизненного цикла продукта, оценка последствий жизненного цикла продукта, разъяснение жизненного цикла продукта.

Современные стратегии снижения выбросов углекислого газа можно разделить на две категории: первичные и вторичные меры. Первичные меры, относительно недорогие и легко реализуемые, направлены на сокращение выбросов углекислого газа на 15–20 %. Эффективность первичных мер зависит от многих факторов, включая специфику отрасли, географическое положение и доступность технологий. Вторичные меры, напротив, требуют значительных капиталовложений и технологических инноваций, но позволяют достичь значительно более существенного сокращения выбросов углекислого газа – более чем на 50 %. Сюда входят технологии улавливания, использования и хранения углерода (CCUS – Carbon Capture, Utilization and Storage), являющиеся ключевыми в борьбе с изменением климата. Технологии улавливания углекислого газа разнообразны и включают в себя абсорбцию (например, с использованием аминов), адсорбцию (использование пористых материалов) и мембранные методы. Выбор конкретной технологии зависит от типа источника выбросов и экономических факторов. Промывка отходящих газов аминами является одним из методов очистки, эффективным для удаления углекислого газа из газовых потоков. Однако, этот метод требует дальнейшей оптимизации, включая поиск более эффективных и менее энергоемких аминов, а также разработку эффективных способов регенерации аминного раствора. Важно отметить, что эффективность любого метода снижения выбросов углекислого газа зависит от правильного проектирования, реализации и последующего мониторинга. Системный подход, объединяющий первичные и вторичные меры, является ключевым для достижения значительного сокращения выбросов углекислого газа и смягчения последствий изменения климата.

Список цитированных источников

1. Изменение климата. Комплект информационных карточек по изменению климата: материалы доклада МГЭИК об оценке «Изменение климата, 2021 г.» и текущей деятельности по Рамочной конвенции ООН об изменении климата, Женева, 9 августа 2021 г. / МГЭИК. – Женева, 2021. – 64 с.
2. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Edited by Core Writing Team, H. Lee, J. Romero. – IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. – 184 p. – DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
3. GHG Emissions of All World Countries. Luxembourg: Publications Office of the European Union / M. Crippa, D. Guizzardi, F. Pagani [et al.]. – 2024. – URL: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/booklet/GHG_emissions_of_all_world_countries_booklet_2023report.pdf (дата обращения: 30.09.2024).
4. Global carbon budget 2023. Earth System Science Data 15(12), 5301–5369 / P. Friedlingstein, M. O'Sullivan, M. W. Jones [et al.]. – 2023. – DOI: 10.5194/essd-15-5301-2023.
5. Стандарты и руководства. Инструменты и рекомендации по расчетам. – URL: <https://ghgprotocol.org/calculation-tools-andguidance?ap3c=IGXmCH6WDeDPomoEAGXmCH6mIt-Db9NCNH00dmje0ZqebCmgPw> (дата обращения: 30.09.2024).
6. Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и поглощении парниковых газов на уровне организации: ГОСТ Р 14064-1-2021. – Введ. 30.09.2021. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 53 с.
7. Газы парниковые. Углеродный след продукции. Требования и руководящие указания по количественному определению: ГОСТ Р 14067–2021. – Введ. 30.09.2021. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 50 с.
8. Европейский механизм пограничной углеродной корректировки – ключевые вопросы и влияние (август 2021) / Московской школы управления СКОЛКОВО ; сост.: И. А. Гайда, Н. И. Доброславский. – М., 2021. – 50 с.
9. Седьмое национальное сообщение Республики Беларусь в соответствии с обязательствами по рамочной конвенции ООН об изменении климата. – URL: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/92104765Belarus-NC7-1-AIBLRNC7.Pdf> (дата обращения: 29.09.2024).
10. Об установлении определяемого на национальном уровне вклада Республики Беларусь в сокращение выбросов парниковых газов до 2030 года : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 29 сентября 2021 г. № 553. // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 01.10.2021, 5/49478 (дата обращения: 29.09.2024).
11. Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/okruzhayushchaya-sreda/sovmestnaya-sistema-ekologicheskoi-informatsii2/b-izmenenie-klimata/b-3-vybrosy-parnikovyykh-gazov/?ysclid=m2rlxdzre105233649> (дата обращения: 25.10.2024).
12. Республика Беларусь: Статистический ежегодник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь: И. В. Медведева (отв. ред.). – Минск, 2024. – 317 с.
13. Охрана окружающей среды: статистический сборник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь: И. В. Медведева (отв. ред.). – Минск, 2024. – 35 с.
14. Что мы знаем об LCA, или оценке жизненного цикла продукта. – URL: <https://theoryandpractice.ru/posts/18128-cto-my-znaem-ob-lca-ili-otsenke-zhiznennogo-tsikla-produkta> (дата обращения: 30.09.2024).
15. Омельченко, И. Н. Современные подходы к оценке жизненного цикла продукции / И. Н. Омельченко, А. Е. Бром // Вестник Волжского университета имени В.Н. Татищева. – 2013. – № 2. – С. 29–34.
16. Бром, А. Е. Современные технологии организации и управления жизненным циклом наукоемкой продукции / А. Е. Бром // Вестник МГОУ. Экономика. – 2015. – № 2. – С. 41–46.
17. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура: ГОСТ Р 14040-2022. – Введ. 12.12.2022. – М. : Технический комитет по стандартизации ТК 020 «Экологический менеджмент и экономика», 2022. – 24 с.
18. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и рекомендации: ГОСТ Р 14044-2019. – Введ. 19.09.2019. – М. : Технический комитет по стандартизации ТК 020 «Экологический менеджмент и экономика», 2019. – 48 с.
19. Сравнение углеродного следа и анализа жизненного цикла – ресурсы. – URL: <https://ru.vayongroup.com/4840-comparing-carbon-footprint-and-life-cycle-analyses.html> (дата обращения: 20.09.2024).
20. Carbon capture utilization and storage in review: Sociotechnical implications for a carbon reliant world / Hope McLaughlin, Anna A. Littlefield, Maia Menefee [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – Vol. 177. – 2023.
21. Rattle, I. Decarbonisation strategies in industry: Going beyond clusters / I. Rattle, A. Gailani, P. G. Taylor // Sustainability Science. – 2024. – Т. 19. – № 1. – С. 105–123.

22. Sovacool, B. K. Industrial clusters for deep decarbonization / B. K. Sovacool, F. W. Geels, M. Iskandarova // Science. – 2022. – Т. 378. – № 6620. – С. 601–604.
 23. Аминовья очистка. – URL: <https://gazsurf.com/ru/gazopererabotka/oborudovanie/modelnyj-ryad/item/aminovaya-ochistka> (дата обращения: 20.09.2024).
- References**
1. Изменение климата. Комплект информационньх карточек по изменению климата: материалы доклада MGEIK об оценке «Изменение климата, 2021 г.» i tekushchej deyatel'nosti po Ramochnoj konvencii OON ob izmenenii klimata, ZHeneva, 9 avgusta 2021 g. / MGEIK. – ZHeneva, 2021. – 64 s.
 2. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Edited by Core Writing Team, H. Lee, J. Romero. – IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. – 184 p. – DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
 3. GHG Emissions of All World Countries. Luxembourg: Publications Office of the European Union / M. Crippa, D. Guizzardi, F. Pagani [et al.]. – 2024. – URL: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/booklet/GHG_emissions_of_all_world_countries_booklet_2023report.pdf (data obrashcheniya: 30.09.2024).
 4. Global carbon budget 2023. Earth System Science Data 15(12), 5301–5369 / P. Friedlingstein, M. O'Sullivan, M. W. Jones [et al.]. – 2023. – DOI: 10.5194/essd-15-5301-2023.
 5. Standarty i rukovodstva. Instrumenty i rekomendacii po raschetam. – URL: <https://ghgprotocol.org/calculation-tools-andguidance?ap3c=IGXmCH6WDeDPomoEAGXmCH6mIt-Db9NCNH00dmje0ZqebCmgPw> (data obrashcheniya: 30.09.2024).
 6. Gazy parnikovye. CHast' 1. Trebovaniya i rukovodstvo po kolichestvennomu opredeleniyu i otchetnosti o vybrosah i pogloshchenii parnikovyh gazov na urovne organizacii: GOST R 14064-1-2021. – Vved. 30.09.2021. – M. : Rossijskij institut standartizacii, 2021. – 53 s.
 7. Gazy parnikovye. Uglerodnyj sled produkcii. Trebovaniya i rukovodstva ukazaniya po kolichestvennomu opredeleniyu: GOST R 14067-2021. – Vved. 30.09.2021. – M. : Rossijskij institut standartizacii, 2021. – 50 s.
 8. Evropejskij mekhanizm pograničnoj uglerodnoj korrekcirovki – klyuchevye voprosy i vliyanie (avgust 2021) / Moskovskoj shkoly upravleniya SKOLKOVO ; sost.: I. A. Gajda, N. I. Dobroslavskij. – M., 2021. – 50 s.
 9. Sed'moe nacional'noe soobshchenie Respubliki Belarus' v sootvetstvii s obyazatel'stvami po ramochnoj konvencii OON ob izmenenii klimata. – URL: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/92104765Belarus-NC7-1-AIBLRNC7.Pdf> (data obrashcheniya: 29.09.2024).
 10. Ob ustanovlenii opredelyaemogo na nacional'nom urovne vklada Respubliki Belarus' v sokrashchenie vybrosov parnikovyh gazov do 2030 goda : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 29 sentyabrya 2021 g. № 553. // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus', 01.10.2021, 5/49478 (data obrashcheniya: 29.09.2024).
 11. Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/okruzhayushchaya-sreda/sovmeistnaya-sistema-ekologicheskoi-informatsii2/b-izmenenie-klimata/b-3-vybrosy-parnikovyh-gazov/?ysclid=m2rlxdrze105233649> (data obrashcheniya: 25.10.2024).
 12. Respublika Belarus'. Statisticheskij ezhegodnik / Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. I. V. Medvedeva (otv. red.). – Minsk, 2024. – 317 s.
 13. Ohrana okruzhayushchej sredy: statisticheskij sbornik / Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. I. V. Medvedeva (otv. red.). – Minsk, 2024. – 35 s.
 14. CHto my znaem ob LCA, ili ocenke zhiznennogo cikla produkta. – URL: <https://theoryandpractice.ru/posts/18128-cto-my-znaem-ob-lca-ili-otsenke-zhiznennogo-tsikla-produkta> (data obrashcheniya: 30.09.2024).
 15. Omel'chenko, I. N. Sovremennye podhody k ocenke zhiznennogo cikla produkcii / I. N. Omel'chenko, A. E. Brom // Vestnik Volzhskogo universiteta imeni V.N. Tatishcheva. – 2013. – № 2. – S. 29–34.
 16. Brom, A. E. Sovremennye tekhnologii organizacii i upravleniya zhiznennym ciklom naukoemkoj produkcii / A. E. Brom // Vestnik MGOU. Ekonomika. – 2015. – № 2. – S. 41–46.
 17. Ekologicheskij menedzhment. Ocenka zhiznennogo cikla. Principy i struktura: GOST R 14040-2022. – Vved. 12.12.2022. – M. : Tekhnicheskij komitet po standartizacii TK 020 «Ekologicheskij menedzhment i ekonomika», 2022. – 24 s.
 18. Ekologicheskij menedzhment. Ocenka zhiznennogo cikla. Trebovaniya i rekomendacii: GOST R 14044-2019. – Vved. 19.09.2019. – M. : Tekhnicheskij komitet po standartizacii TK 020 «Ekologicheskij menedzhment i ekonomika», 2019. – 48 s.
 19. Sravnenie uglerodnogo sleda i analiza zhiznennogo cikla – resursy. – URL: <https://ru.vayongroup.com/4840-comparing-carbon-footprint-and-life-cycle-analyses.html> (data obrashcheniya: 20.09.2024).
 20. Carbon capture utilization and storage in review: Sociotechnical implications for a carbon reliant world / Hope McLaughlin, Anna A. Littlefield, Maia Menefee [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – Vol. 177. – 2023.
 21. Rattle, I. Decarbonisation strategies in industry: Going beyond clusters / I. Rattle, A. Gailani, P. G. Taylor // Sustainability Science. – 2024. – Т. 19. – № 1. – S. 105–123.
 22. Sovacool, B. K. Industrial clusters for deep decarbonization / B. K. Sovacool, F. W. Geels, M. Iskandarova // Science. – 2022. – Т. 378. – № 6620. – С. 601–604.
 23. Aminovaya очистка. – URL: <https://gazsurf.com/ru/gazopererabotka/oborudovanie/modelnyj-ryad/item/aminovaya-ochistka> (data obrashcheniya: 20.09.2024).

Материал поступил 22.11.2024, одобрен 09.12.2024, принят к публикации 09.12.2024

УДК 631.445.52

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОСФОГИПСА ПРИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ЗАСОЛЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ**А. А. Цыганова¹, А. А. Хрипович², Е. В. Зеленуха³, И. В. Скуратович⁴**¹ К. с.-х. н., доцент, заведующий кафедрой инженерной экологии, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: cyganovaa@bntu.by² К. т. н., доцент кафедры инженерной экологии, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: ahripovich@bntu.by, anna.hripovich@gmail.com³ Старший преподаватель кафедры инженерной экологии, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: ezelenuha@bntu.by⁴ Старший преподаватель кафедры инженерной экологии, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: i.skuratovich@bntu.by**Реферат**

Деятельность ОАО «Беларускалий» оказывает трансформирующее воздействие на почвы Республики Беларусь. До 75 % массы добываемой сильвинитовой руды переходит в отходы, представляющие собой галит (хлорид натрия, содержащий также хлориды магния и кальция) или жидкие глинисто-солевые шламы. Ежегодно на предприятии образуется свыше 17 млн галитовых и около 2,0 млн глинисто-солевых шламов. Несмотря на высотное (сто и более метров) складирование галитовых отходов, оборудование дамбы и ложа солеотвалов противофильтрационными экранами, происходит засоление почв на значительных площадях за счет ветровой и дождевой эрозии солеотвалов. Внесение в засоленные почвы мелиорантов способствует улучшению агрохимических свойств, регулирует кислотность, уменьшает содержание натрия и общую засоленность, позволяет вернуть земли в сельскохозяйственный оборот. В работе исследована возможность использования фосфогипса из отвалов ОАО «Гомельский химический завод» в качестве мелиоранта и структуратора для улучшения свойств техногенно нарушенных засоленных почв, отобранных в зоне воздействия второго рудоуправления ОАО «Беларускалий» в радиальном направлении на расстоянии 200 метров от террикона. По результатам анализа физико-химических свойств проб почвы определен связно-песчаный состав, высокие показатели pH, общего содержания солей и содержания хлорид-ионов. Проведены модельные опыты по определению всхожести семян тест-растений сельскохозяйственных культур Беларуси, толерантных к присутствию солей в почве: пшеницы, свеклы, рапса с различным соотношением фосфогипс : засоленная почва. Проведен анализ динамики всхожести семян, определены морфометрические показатели растений при выращивании в засоленной почве с добавлением различного количества фосфогипса. Установлено, что внесение 5–10 масс.% фосфогипса в засоленную почву увеличивает всхожесть семян и стимулирует рост и развитие растений, что положительно сказывается на урожайности культур и состоянии нарушенных экосистем.

Ключевые слова: засоленная почва, фосфогипс, рекультивация, техногенно нарушенные земли, мелиорант, гранулометрический состав, кислотность почвы, растения-галофиты.

USE OF PHOSPHOGYPSUM IN RECLAMATION OF SALINE LANDS**H. A. Tsyhanava, H. A. Khrypovich, A. V. Zelianukha, I. V. Skuratovich****Abstract**

JSC "Belaruskali's" operations have a transformational impact on the soils of the Republic of Belarus. Up to 75 % of the mass of extracted sylvinit ore is converted into waste, which is halite (sodium chloride containing also magnesium and calcium chlorides) or liquid clay-salt sludge. The plant generates over 17 million halite slurries and about 2.0 million clay-salt slurries annually. In spite of high (one hundred meters and more) storage of halite waste, equipment of the dam and bed of salt dumps with impervious blankets, salinization of soils occurs on significant areas due to wind and rain erosion of salt dumps. Application of ameliorants to saline soils improves agrochemical properties, regulates acidity, reduces sodium content and total salinity, allows to return lands to agricultural turnover. In the work the possibility of using phosphogypsum from the dumps of JSC "Gomel Chemical Plant" as an ameliorant and stabilizer to improve the properties of technogenically disturbed saline soils sampled in the zone of impact of the second ore-dressing plant of JSC "Belaruskali" in the radial direction at a distance of 200 meters from the heap. According to the results of analysis of physical and chemical properties of soil samples, the cohesive-sandy composition, high pH, total salt content and chloride ion content were determined. Model experiments on determination of seed germination of test-plants of Belarusian agricultural crops tolerant to salt presence in soil: wheat, beet, rape with different ratio of phosphogypsum : saline soil were carried out. The dynamics of seed germination was analyzed, morphometric indices of plants were determined when growing in saline soil with the addition of different amounts of phosphogypsum. It has been established that application of 5-10 wt.% phosphogypsum to saline soil increases seed germination and stimulates plant growth and development, which has a positive effect on crop yields and the condition of disturbed ecosystems.

Keywords: saline soil, phosphogypsum, reclamation, technogenically disturbed lands, meliorant, granulometric composition, soil acidity, halophyte plants.

Введение

При получении калийных удобрений до 75 % сильвинитового сырья переходит в отходы, представляющие собой твердый галит (хлорид натрия, содержащий также хлориды магния и кальция), а также жидкие глинисто-солевые шламы [1]. Вид и объем образующихся отходов зависит от метода получения хлорида калия – флотационный или галургический, в целом по ОАО «Беларускалий» ежегодно образуется свыше 17 млн галитовых и около 2,0 млн глинисто-солевых шламов [2]. Складирование отходов организовано в солеотвалах и шламохранилищах, занимающих более чем 1,9 тыс. га, объем отходов превысил 1 млрд т [3]. Размещение отходов в

непосредственной близости от сельскохозяйственных угодий и населенных пунктов (Малое Быково, Большое Быково, Пиваши, Малый Жабин, Чепели, Глядки находятся в радиусе 4 км, Бряничцы – менее 500 м) является основным фактором, определяющим техногенное воздействие на экосистемы Солигорского района. В последние годы на рудоуправлениях предприятия применяют интенсивные технологии складирования, позволяющие увеличить высоту террикона и за счет этого количество галитов, складываемых на единицу площади [3]. Эмиссия хлоридов из террикона происходит в основном ветровой эрозией, с помощью осадков и миграцией по почвенному профилю. Однако увеличение высоты террикона приво-

дит к увеличению площади зоны воздействия галитовых отходов. В этой связи поиск новых технических решений по минимизации засоления почвы в техногенно нарушенных экосистемах является своевременным и актуальным.

Складирование фосфогипса – твердого отхода, образующего на ОАО «Гомельский химический завод», – является еще одной нерешаемой в течение ряда лет проблемой Гомельской области. Фосфогипс, имеющий кислую реакцию среды, оказывает негативное воздействие не только на почву, но и подземные и поверхностные воды за счет размывания отвала атмосферными осадками. Однако наличие в составе фосфогипса фосфора, кальция, серы и других микроэлементов позволяет использовать его в качестве мелиоранта почвы. Кислая реакция среды в случае фосфогипса является достоинством при внесении его в засоленные почвы, поэтому использование данного отхода для биологической рекультивации засоленных земель представляет научный и практический интерес.

Особенности проведения рекультивации засоленных земель

В рекультивации техногенно нарушенных земель традиционно выделяют три основных этапа: подготовительный, техническая и биологическая рекультивация. В подготовительном этапе проводятся работы по оценке состояния экосистемы и степени ее нарушенности, необходимые расчеты и планирование рекультивационных мероприятий. Техническая рекультивация предполагает осуществление мероприятий по корректировке рельефа местности (выравнивание, удаление пней и валунов), изменение состава и структуры рекультивационного слоя (землевание, торфование, кольматаж, сооружение терпов), гидротехнические (осушение, орошение, организация поверхностного стока) и теплотехнические мероприятия (мульчирование, грядование, обогрев, применение утеплителей), а также применение химических веществ для улучшения физико-химических свойств почвы на следующем этапе. Основными задачами биологической рекультивации являются [4]:

- возобновление процесса почвообразования;
- повышение самоочищающей способности почвы;
- воспроизводство биоценозов.

Биологическую рекультивацию осуществляют в два этапа. На первом этапе выращивают пионерные (предварительные, авангардные) культуры, умеющие адаптироваться в существующих условиях и обладающие высокой восстановительной способностью. На втором этапе переходят к целевому использованию нарушенных земель. Длительность биологического этапа и подбор культур зависят от направления использования нарушенных земель.

Для успешной рекультивации засоленных земель на техническом этапе рекомендуется создание специального гидрологического режима экосистемы путем полива и промывки водой и дренажного обустройства территории. При высоких уровнях засоления либо недостатке влаги возможно использование мобильных дренажных устройств [5].

Избыток хлоридов щелочных и щелочно-земельных металлов приводит к ухудшению агрофизических свойств почвы. Под воздействием солей происходит значительное уплотнение поверхностного слоя почвы с образованием плотной корки с признаками кристаллизации [6]. Поэтому на технических этапах рекультивации наряду с работами по корректировке рельефа местности и гидрологических условий экосистемы в обязательном порядке проводится химическая рекультивация. К химическим техническим рекультивационным мероприятиям относят известкование, гипсование, кислование почвы и внесение сорбентов и структуров [4]. Гипсование и кислование почвы (внесение гипса; сульфатов железа, аммония и серной кислоты) осуществляют при рекультивации сильно засоленных почв – солонцов и солончаков с общей засоленностью до 30 %. Для умеренно засоленных почв (до 10 %) применяют известкование – внесение карбоната кальция. Этот прием позволяет повысить реакцию среды (рН) до 4,5–7,5 достаточную для формирования устойчивого фитоценоза на последующем этапе биологической рекультивации. Внесение химических мелиорантов (сорбенты или структуров почвы) стабилизирует почвенную структуру путем уменьшения плотности почвы и накопления в ней солей, при этом улучшается воздухо- и водопроницаемость почвы и ее агрегатный состав. По мнению [5],

для засоленных земель внесение минеральных кальцийсодержащих удобрений является обязательным этапом успешной биологической рекультивации, на которой возможно использование такой аборигенной солеустойчивой флоры, как ромашка непахучая. В качестве сорбента и структуров почвы в патенте [7] предлагается применять отработанный активный ил водочистки, а в качестве растений-галофитов – амарант и полынь.

Галиты способны оказывать влияние на жизнедеятельность почвенных микроорганизмов, снижая функциональную активность почвенной биоты и ее способность к разнообразным биохимическим превращениям [8]. Почвенное дыхание является по мнению авторов [9] интегральным показателем всей биоты. Присутствие в почве хлоридов в концентрации 1,0 кг/кг почвы уменьшает каталазную активность почвы в 3–4 раза и выделение углекислого газа микробиоценозом в 1,8–2,2 раза по сравнению с незасоленной контрольной почвой [9].

Отрицательное воздействие избытка солей хлористого натрия заметно на самых начальных фазах роста и развития растений. В фазе набухания и активного прорастания семян наблюдается воздействие на процесс диффузии в клетках растений, заметно нарушается водный баланс и за счет этого растения подвергаются стрессу [10]. В связи с трансформацией физиологических процессов происходит увеличение периода появления начальной фазы всходов, существенно замедляются процессы дальнейшего развития растений в первой фазе вегетационного периода.

Ряд авторов [11, 12, 13] отмечают особенности в проявлении чувствительности органов растений по отношению к засолению почвы. Угнетающее действие хлоридов выражается в уменьшении роста и развития растений, особенно их корневой системы. При этом отмечалось уменьшение длины корней, их искривление и нарушение строения, а также усиленное развитие боковых корешков и деформация корневых волосков как реакция адаптивности к неблагоприятным условиям засоленности. Надземная часть растений менее чувствительна к засолению почвы. Однако наличие в почве галитов подавляет биосинтез ферментов и биологически активных соединений в листьях растений, что в итоге может привести к снижению активизации ростовых процессов либо полной гибели растений при концентрации солей порядка 0,5 г/кг. Присутствие хлоридов в почве приводит к ингибированию биосинтеза фотосинтетических пигментов, а следовательно, к снижению содержания хлорофилла, каротиноидов и аскорбиновой кислоты в листьях растений [9].

Одним из современных направлений рекультивации засоленных земель является применение растений – галофитов, то есть культур, обладающих высокой степенью устойчивости к присутствию солей в почвенном растворе. Комплекс мероприятий, направленных на перехват атмосферных осадков, включает формирование на солеотвале почвенно-растительного покрова с предварительной технической рекультивацией строительными отходами и вскрышными породами [14]. Среди видов травянистой растительности предлагается вейник наземный, овсяница луговая, лебеда раскидистая, марь сизая, донник белый, латук татарский [15]. Из культурных растений солеустойчивыми являются ячмень, кукуруза, сахарная свекла, сорго, хлопчатник, люцерна, подсолнечник [16–19].

Фосфогипс – это побочный продукт, образующийся при производстве фосфорных удобрений из фосфоритов. Его основной составляющей является гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Хотя он широко используется в строительной сфере, но большая часть фосфогипса размещается в отвалах на долгосрочное хранение. В Республике Беларусь наибольшее количество фосфогипса образуется после переработки апатитовой руды с целью получения фосфорных минеральных удобрений на ОАО «Гомельский химический завод».

В соответствии с информацией, представленной в экологических бюллетенях [20–23], на конец 2022 года в отвалах фосфогипса на территории г. Гомеля накоплено 24,85 млн тонн данного вида отходов. Данные по образованию отходов фосфогипса представлены на рисунке 1. В настоящее время фосфогипс не является часто используемым отходом производства и большая его часть отправляется на захоронение и отвалы. В рамках нашей работы мы предлагаем рассмотреть возможность его использования в качестве добавки для улучшения свойств техногенно нарушенных засоленных почв.

Методы и объекты исследования. Для исследований были отобраны образцы засоленной почвы в зоне воздействия второго рудоуправления ОАО «Беларускалий» в радиальном направлении на расстоянии 200 м от террикона, из отвалов ОАО «Гомельский химический завод» были отобраны образцы фосфогипса.

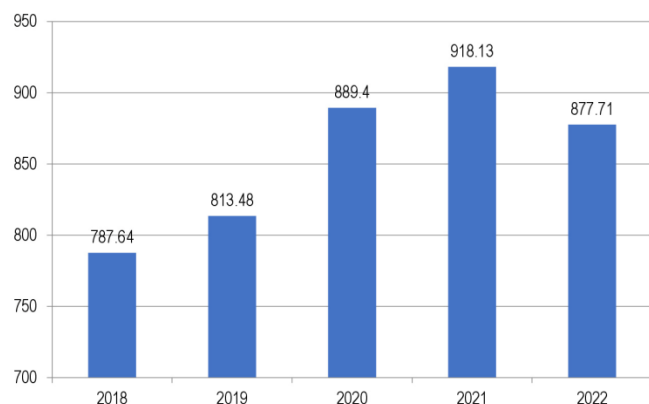


Рисунок 1 – Образование крупнотоннажных отходов фосфогипса в период с 2019 по 2022 гг., тыс. т

Процентное соотношение первичных частиц различной крупности по фракциям определяли согласно ГОСТ 12536-2014 «Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состояния». Определение влажности производили согласно ГОСТ 28268-89 «Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений». Определение общей засоленности почвы осуществляли гравиметрическим методом сухого остатка водной вытяжки согласно ГОСТ Р 59540-2021 «Грунты. Методы лабораторного определения степени засоленности». Определение кислотности анализируемых образцов почвы, позволяющее определить тип засоления – согласно ГОСТ Р 58594-2019. Массовая концентрация хлорид-ионов в водных вытяжках проводилась потенциометрическим методом с использованием ионселективного электрода. Метод заключается в измерении разности потенциалов измерительного ионселективного электрода и электрода сравнения в растворе с помощью иономера. Концентрацию определяемого иона находят по градуировочному графику зависимости потенциала от отрицательного логарифма молярной концентрации ионов хлора в градуировочных растворах.

По результатам определения гранулометрического состава образца фосфогипса, большую фракцию составляют частицы размером 0,5–0,9 мм, на их долю приходится 27 % (рисунок 2).

Как следует из данных, приведенных на рисунке 3, гранулометрический состав засоленной почвы с преобладанием фракции средней крупности (размер частиц от 0,5 до 2 мм) и содержанием лишь 3 % мелкой глинистой фракции до 0,5 мм определяет связно-песчаный состав почвы по классификации Н. А. Качинского, тип почвы дерново-подзолистый.

Как следует из данных таблицы 1, отобранный образец засоленной почвы характеризуется высокими значениями pH, общего содержания солей и содержания хлорид-ионов, полученные данные коррелируют с результатами предыдущих исследований с учетом незначительных отличий, обусловленных условиями отбора образцов и метеорологическими условиями разных сезонов [16, 18].

Таблица 1 – Физико-химическая характеристика исследуемых образцов почвы и отходов

Образец	Влажность, %	pH	Содержание хлорид-ионов, мг/кг	Содержание солей, %
Почва	11,4	8,7	0,57	0,26
Фосфогипс	0,17	4,6	Ниже предела обнаружения	Не определялось

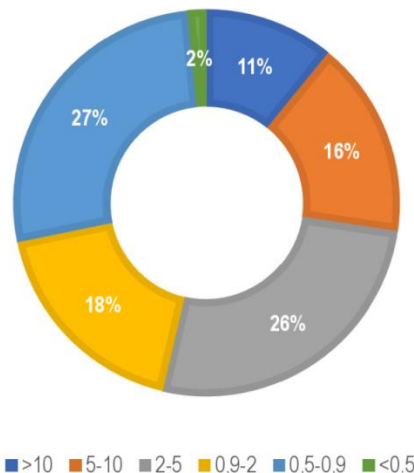


Рисунок 2 – Процентное соотношение фракций гранулометрического состава фосфогипса

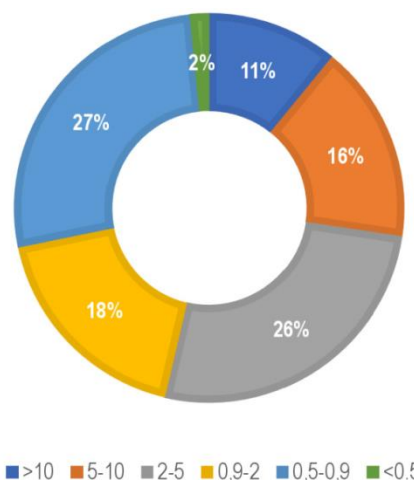


Рисунок 3 – Процентное соотношение фракций гранулометрического состава анализируемого образца почвы

С целью определения возможности применения фосфогипса в качестве мелиоранта и структуратора почвы на биологическом этапе рекультивации были заложены лабораторные опыты по определению всхожести семян с различным соотношением фосфогипса : засоленная почва. Опыт заложен в трёхкратной повторности, фосфогипс добавляли к засоленной почве в количестве 5, 10 и 20 масс.%, контролем служила засоленная почва. В качестве тест-растений были выбраны основные сельскохозяйственные культуры, широко используемые в растениеводстве Беларуси и достаточно толерантные к присутствию солей в почве, такие как пшеница, свекла, рапс. Всхожесть определяли как процентное соотношение всходов к общему количеству семян в сосуде, длительность наблюдений составила 10 суток. В течение всего эксперимента растения поливали водой по мере пересыхания верхнего слоя почвы, опыт проводили при естественном освещении.

Анализ динамики всхожести семян пшеницы (рисунок 4) в лабораторном опыте с добавлением различного количества фосфогипса показал, что всходы появлялись на 1–2 суток ранее, чем в контроле. Добавление к засоленной почве 5 и 10 % фосфогипса положительно сказывается на всхожести семян, при этом максимальная всхожесть (90 %) была отмечена на десятый день вегетации при добавлении к засоленной почве 10 % фосфогипса. Динамика роста показателя всхожести при добавлении 5 % фосфогипса была сравнима с вариантом опыта с добавлением 10 % фосфогипса и составила на 10 сутки более 80 %. Однако следует отметить, что увеличение доли фосфогипса до 20 % не дало существенного увеличения показателя всхожести в сравнении с контролем.

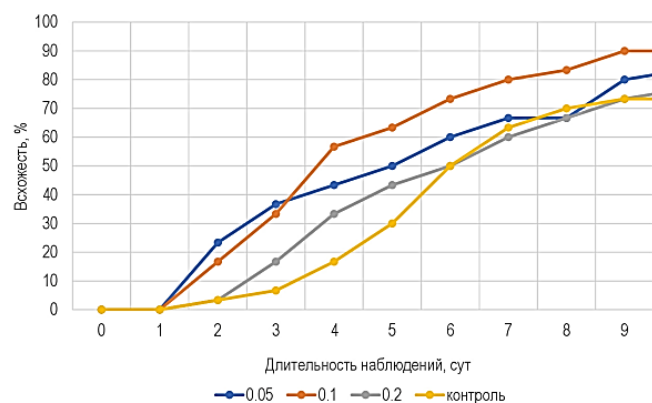


Рисунок 4 – Динамика всхожести семян пшеницы в лабораторном опыте с добавлением различного количества фосфогипса к засолённой почве

Аналогичная тенденция прослеживается при проращивании семян свеклы (рисунок 5). Отмечается задержка всхожести семян на 1–2 суток в контроле и при добавлении к засолённой почве 20 % фосфогипса. На 8 сутки наблюдений количество всходов увеличивается во всех вариантах опыта, однако разница с контролем более существенная и к концу периода наблюдений (10 суток) составила 80 % при добавлении 5 % фосфогипса и 93 % при добавлении 10 % фосфогипса, в то время как в засолённой почве (контроль) всхожесть составила 66 %.

В случае семян рапса (рисунок 6), максимальная всхожесть (90 %) на десятый день вегетации наблюдалась при соотношении засолённая почва : фосфогипс (95:5). Положительный результат также отмечается при внесении 10 % фосфогипса, так как всхожесть семян рапса составляет 86 % по сравнению с контролем 63 %. Как следует из анализа всхожести (рисунки 4, 5, 6), для всех исследуемых тест-культур – пшеница, свекла, рапс – добавление 20 % фосфогипса не даёт существенного увеличения показателя всхожести.

По окончании периода наблюдений (10 суток) были определены морфометрические показатели корневой и надземной части растений, результаты измерений которых представлены в таблице 2.

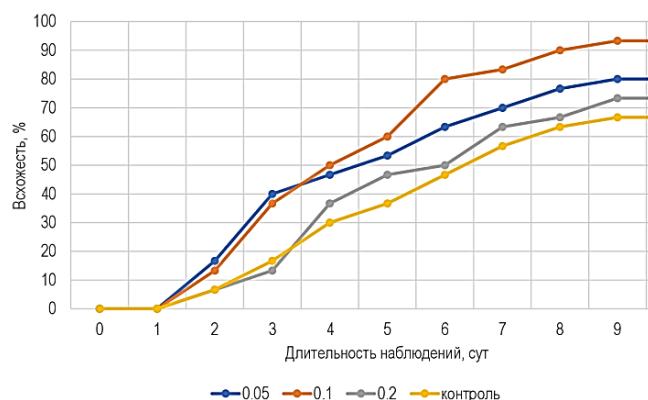


Рисунок 5 – Динамика всхожести семян свеклы в лабораторном опыте с добавлением различного количества фосфогипса к засолённой почве

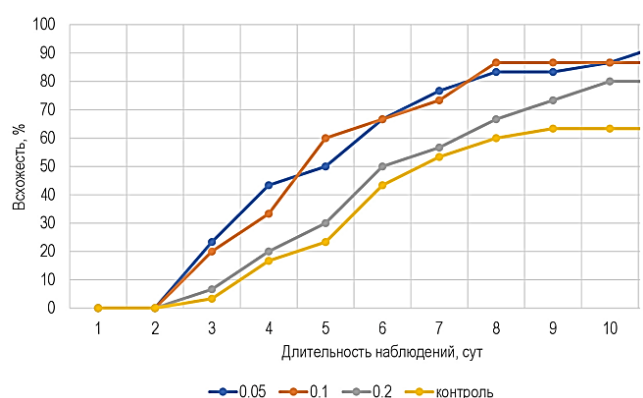


Рисунок 6 – Динамика всхожести семян рапса в лабораторном опыте с добавлением различного количества фосфогипса к засолённой почве

Таблица 2 – Морфометрические показатели растений при выращивании в засолённой почве с добавлением различного количества фосфогипса

Культура	Засолённая почва + 5 % фосфогипса		Засолённая почва + 10 % фосфогипса		Засолённая почва + 20 % фосфогипса		Засолённая почва – контроль	
	длина корневой, см	длина надземной части, см	длина корневой, см	длина надземной части, см	длина корневой, см	длина надземной части, см	длина корневой, см	длина надземной части, см
Пшеница	7,8	8,6	7,2	8,5	6,7	8,4	5,9	6,9
Свекла	4,4	5,2	4,3	4,9	3,9	4,8	3,6	4,1
Рапс	6,0	4,4	5,7	4,3	5,3	3,9	4,8	3,6
НСР ₀₅	0,5	0,6	0,6	0,4	0,7	0,6	0,5	0,4

Тенденция угнетения роста и развития корневой системы растений по сравнению с надземной частью полностью прослеживается из данных таблицы 2. При этом наибольшая разница в длине корней и надземной части растений пшеницы, свеклы и рапса с контролем (засолённая почва) установлена в варианте опыта с добавлением 5 % фосфогипса к почве, что полностью коррелирует с данными по всхожести семян (рисунки 4, 5, 6).

Заключение

Установлено, что одним из экологических и экономически выгодных методов рекультивации техногенно нарушенных засолённых почв в районах деятельности калийного производства является внесение фосфогипса в качестве мелиоранта и структуратора. По результатам тестирования технических и злаковых культур на засолённых почвах с добавлением фосфогипса лучшие результаты показало внесение в почву мелиоранта 5–10 масс. %.

Всхожесть семян пшеницы увеличивается на 10–17 %, свеклы на 14–27 % и рапса на 20–31 % по сравнению с засолённой почвой при внесении в нее от 5 до 10 масс. % фосфогипса. Добавление к засолённой почве 5 масс. % фосфогипса улучшает морфометрические показатели растений пшеницы, свеклы и рапса, за счет ускорения развития корневой системы и роста надземной части, что позволяет сформировать устойчивый фитоценоз и стимулировать урожайность сельскохозяйственных культур в условиях засолённой почвы. Внесение фосфогипса может применяться как на биологическом этапе рекультивации засолённых земель, так и при возделывании сельскохозяйственных культур на почвах, прошедших рекультивацию либо имеющих невысокую степень засолённости, тем не менее оказывающую негативное воздействие на структуру урожая. Использование фосфогипса позволяет не только решить проблему засолённости почвы, но и утилизировать отход, засоряющий литосферу.

Список цитированных источников

1. Rauche, H. Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert / H. Rauche. – Germany : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – 580 p. – DOI: 10.1007/978-3-662-46834-0.
2. Шемет, С. Ф. Снижение геоэкологических последствий при подземной разработке калийных месторождений / С. Ф. Шемет, А. А. Кологривко // Горный журнал. – 2015. – № 5. – С. 100–105. – DOI: 10.17580/gzh.2015.05.21.
3. Анализ воздействия хранилищ отходов калийного производства на окружающую среду и подходы к выбору рационального способа их складирования / Т. А. Петрова, Т. С. Астапенко, А. А. Кологривко, А. С. Долгих // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14, № 3. – URL: <https://esj.today/PDF/11NZVN322.pdf> (дата обращения 12.01.2025).
4. Желязко, В. И. Рекультивация и охрана земель: учебно-методическое пособие / В. И. Желязко. – Горки : БГСХА, 2021. – 190 с. – URL: <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/3023> (дата обращения 14.01.2025).
5. Фоминых, Д. Е. Техногенное засоление почв как геоэкологический фактор при разработке нефтяных месторождений среднего Приобья : дис. ... канд. геол.-мин. наук, 25.00.36 / Д. Е. Фоминых ; НИ ТПУ. – Томск, 2013. – 22 с.
6. Судник, А. В. О последствиях применения в качестве противогололедного реагента хлорида натрия на состояние насаждений вдоль улиц и дорог в г. Минске / А. В. Судник, А. П. Яковлев. – URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/270769> (дата обращения 14.01.2025).
7. Способ рекультивации почв, загрязненных минерализованными водами: Пат. RU 2459398 / Г. Г. Ягафарова, Л. Р. Акчурина, Ю. А. Федорова, И. Р. Ягафаров, А. В. Московец, С. М. Лавренчук. – опубл. 27.08.2012.
8. Двуреченская, Е. Б. Техногенный галогенез в торфяных болотных верховых почвах средней тайги Западной Сибири / Е. Б. Двуреченская // Географический вестник = Geographical Bulletin, № 3. – 2020. – С.148–158. – DOI: 10.17072/2079-7877-2020-3-148-158.
9. Демидова, М. И. Влияние галитовых отходов ОАО «Уралкалий» города Березники на почву и растительность / М. И. Демидова, Ю. Е. Лихарева, В. К. Лапина // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. – 2014. – № 2. – С. 154–166.
10. Головатый, С. Е. Влияние содержание натрия и хлора на урожайность яровых зерновых культур / С. Е. Головатый, З. С. Ковалевич, Н. К. Лукашенко // Почвоведение и агрохимия. – 2010. – № 1. – С. 148–156.
11. Метод биологической рекультивации территорий с высокой засоленностью почв на основе энергетических плантаций древесных растений / О. И. Родыкин, Т. Волк, И. А. Басалай, Е. В. Черненко // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. по материалам V Междунар. науч. экол. конф. / Куб. гос. аграр. ун-т ; под ред. И. С. Белюченко. – Краснодар, 2017. – С. 409–414.
12. Четина, О. А. Накопление низкомолекулярных соединений как ответная реакция растений на техногенное засоление / О. А. Четина, О. З. Еремченко, И. В. Пахорук // Экология. – 2023. – № 2. – С. 94–102. – DOI: 10.31857/S036705972302004X.
13. Почвенно-геохимическая оценка засоления территории, прилегающей к Кучукскому месторождению солей (Алтайский край) / Ю. В. Симонова, О. Р. Жунусова, М. В. Чарыкова, Г. А. Касаткина // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2024. – Т. 69, № 1. – DOI: 10.21638/spbu07.2024.110.
14. Хайрулина, Е. А. Проблемы рекультивации солеотвалов калийных предприятий / Е. А. Хайрулина, О. С. Кудряшова, Л. В. Новоселова // Горный журнал. – 2019. – № 5. – С. 90–95. – DOI: 10.17580/gzh.2019.05.18.
15. Носова, М. В. Опыт проведения локальных рекультивационных мероприятий по восстановлению техногенно-засоленных почв / М. В. Носова, В. П. Середина, С. А. Стовбунин // Принципы экологии. – 2024. – № 3. – С. 61–71. – DOI: 10.15393/j1.art.2024.14964.
16. Хрипович, А. А. Использование природных каустобиолитов для минимизации засоления почвы в техногенно нарушенных экосистемах / А. А. Хрипович, А. А. Цыганова, Е. А. Тишкова // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 2. – С. 108–111. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-108-111.
17. Хрипович, А. А. Геоэкологические факторы загрязнения хлоридами почвы и подземных вод в зоне воздействия складирования галитовых отходов / А. А. Хрипович, Е. А. Тишкова // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 78–87. – DOI: 10.47612/2079-3928-2024-1-78-87.
18. Перспективы выращивания растений на засоленных землях для энергетических целей / Е. В. Зеленуха, И. В. Скуратович, С. А. Лаптенко [и др.] // Научные горизонты. – 2023. – № 10 (74). – С. 61–70.
19. Фитомелиорация территорий в зонах добычи калийных удобрений / И. В. Скуратович, Е. В. Зеленуха, С. А. Лаптенко [и др.] // Научные горизонты. – 2023. – № 4 (68). – С. 35–48.
20. Состояние природной среды Беларуси: экологический бюллетень / Е. И. Громадская, Д. В. Баканова, М. В. Водейко [и др.] ; под общ. ред. Е. И. Громадской. – Минск : РУП «ЦНИИКИВР», 2022. – 145 с.
21. Состояние природной среды Беларуси: экологический бюллетень / Е. И. Громадская, С. А. Дубенок, С. В. Сушко [и др.] ; под общ. ред. С. А. Дубенок. – Минск : РУП «ЦНИИКИВР», 2021. – 150 с.
22. Состояние природной среды Беларуси: экологический бюллетень / Е. И. Громадская, Д. В. Цубленок, М. В. Водейко [и др.] ; под общ. ред. Е. И. Громадской. – Минск : РУП «ЦНИИКИВР», 2023. – 151 с.
23. Состояние природной среды Беларуси: ежегодное информационно-аналитическое издание / Р. В. Михалевич, В. М. Бурак, С. А. Дубенок [и др.] ; под общ. ред. М. А. Ереско. – Минск : РУП «Бел НИЦ «Экология», 2020. – 101 с.

References

1. Rauche, H. Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert / H. Rauche. – Germany : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – 580 p. – DOI: 10.1007/978-3-662-46834-0.
2. SHemet, S. F. Snizhenie geoeekologicheskikh posledstvij pri podzemnoj razrabotke kaliynih mestorozhdenij / S. F. SHemet, A. A. Kologrivko // Gorniy zhurnal. – 2015. – № 5. – S. 100–105. – DOI: 10.17580/gzh.2015.05.21.
3. Analiz vozdeystviya hranilishch othodov kaliynogo proizvodstva na okruzhayushchuyu sredu i podhody k vyboru racional'nogo sposoba ih skladirovaniya / T. A. Petrova, T. S. Astapenko, A. A. Kologrivko, A. S. Dolgih // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2022. – T. 14, № 3. – URL: <https://esj.today/PDF/11NZVN322.pdf> (data obrashcheniya 12.01.2025).
4. ZHelyazko, V. I. Rekul'tivaciya i ohrana zemel': uchebno-metodicheskoe posobie / V. I. ZHelyazko. – Gorki : BGSKHA, 2021. – 190 s. – URL: <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/3023> (data obrashcheniya 14.01.2025).
5. Fominyh, D. E. Tekhnogennoe zasolenie pochv kak geoeekologicheskij faktor pri razrabotke nefyanyh mestorozhdenij srednego Priob'ya : dis. ... kand. geol.-min. nauk, 25.00.36 / D. E. Fominyh ; NI TPU. – Tomsk, 2013. – 22 s.
6. Sudnik, A. V. O posledstviyah primeneniya v kachestve protivogolodnogo reagenta hlorida natriya na sostoyanie nasazhdenij vdol' ulic i dorog v g. Minske / A. V. Sudnik, A. P. YAKovlev. – URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/270769> (data obrashcheniya 14.01.2025).
7. Sposob rekul'tivacii pochv, zagryaznennykh mineralizovannymi vodami: Pat. RU 2459398 / G. G. YAgafarova, L. R. Akchurina, YU. A. Fedorova, I. R. YAgafarov, A. V. Moskovec, S. M. Lavrenchuk. – opubl. 27.08.2012.
8. Dvurechenskaya, E. B. Tekhnogennyy galogenez v torfanyh bolotnyh verhovyyh pochvah srednej tajgi Zapadnoj Sibiri / E. B. Dvurechenskaya // Geograficheskij vestnik = Geographical Bulletin, № 3. – 2020. – S.148–158. – DOI: 10.17072/2079-7877-2020-3-148-158.

9. Demidova, M. I. Vliyaniye galitovykh othodov OAO «Uralkalij» goroda Berezniki na pochvu i rastitel'nost' / M. I. Demidova, YU. E. Lihareva, V. K. Lapshina // Vestnik PNIPU. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika. – 2014. – № 2. – S. 154–166.
10. Golovatyj, S. E. Vliyaniye sodержaniye natriya i hlora na urozhajnost' yarovykh zemovykh kul'tur / S. E. Golovatyj, Z. S. Kovalevich, N. K. Lukashenko // Pochvovedenie i agrokimiya. – 2010. – № 1. – S. 148–156.
11. Metod biologicheskoy rekul'tivatsii territorij s vysokoj zasolennost'yu pochv na osnove energeticheskikh plantacij drevesnykh rastenij / O. I. Rod'kin, T. Volk, I. A. Basalaj, E. V. CHernenok // Problemy rekul'tivatsii othodov byta, promyshlennogo i sel'skohozyajstvennogo proizvodstva : sb. nauch. tr. po materialam V Mezhdunar. nauch. ekol. konf. / Kub. gos. agrar. un-t ; pod red. I. S. Belyuchenko. – Krasnodar, 2017. – С. 409–414.
12. CHetina, O. A. Nakopleniye nizkomolekulyarnykh soedinenij kak otvetnaya reakciya rastenij na tekhnogennoe zasoleniye / O. A. CHetina, O. Z. Eremchenko, I. V. Pahorukov // Ekologiya. – 2023. – № 2. – S. 94–102. – DOI: 10.31857/S036705972302004X.
13. Pochvenno-geohimicheskaya ocenka zasoleniya territorij, prilgayushchej k Kuchukскому mestorozhdeniyu solej (Altajskij kraj) / YU. V. Simonova, O. R. ZHunusova, M. V. CHarykova, G. A. Kasatkina // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle. – 2024. – T. 69, № 1. – DOI: 10.21638/spbu07.2024.110.
14. Hajrulina, E. A. Problemy rekul'tivatsii soleotvalov kalijnykh predpriyatij / E. A. Hajrulina, O. S. Kudryashova, L. V. Novoselova // Gornyj zhurnal. – 2019. – № 5. – С. 90–95. – DOI: 10.17580/gzh.2019.05.18.
15. Nosova, M. V. Opyt provedeniya lokal'nykh rekul'tivacionnykh meropriyatij po vosstanovleniyu tekhnogenno-zasolennykh pochv / M. V. Nosova, V. P. Seredina, S. A. Stovbunik // Principy ekologii. – 2024. – № 3. – S. 61–71. – DOI: 10.15393/j1.art.2024.14964.
16. Hripovich, A. A. Ispolzovanie prirodnykh kaustobiolitov dlya minimizatsii zasoleniya pochvy v tekhnogenno narushennykh ekosistemah / A. A. Hripovich, A. A. Cyganova, E. A. Tishkovskaya // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 2. – S. 108–111. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-108-111.
17. Hripovich, A. A. Geoekologicheskie faktory zagryazneniya hlорidami pochvy i podzemnykh vod v zone vozdejstviya skladirovaniya galitovykh othodov / A. A. Hripovich, E. A. Tishkovskaya // Prirodopol'zovanie. – 2024. – № 1 – S. 78–87. – DOI: 10.47612/2079-3928-2024-1-78-87.
18. Perspektivy vyrashchivaniya rastenij na zasolennykh zemlyah dlya energeticheskikh celej / E. V. Zelenuho, I. V. Skuratovich, S. A. Laptенok [i dr.] // Nauchnye gorizonty. – 2023. – № 10 (74). – S. 61–70.
19. Fitomelioratsiya territorij v zonah dobychi kalijnykh udobrenij / I. V. Skuratovich, E. V. Zelenuho, S. A. Laptенok [i dr.] // Nauchnye gorizonty. – 2023. – № 4 (68). – S. 35–48.
20. Sostoyaniye prirodnoj sredy Belarusi: ekologicheskij byulleten' / E. I. Gromadskaya, D. V. Bakanova, M. V. Vodejko [i dr.] ; pod obshch. red. E. I. Gromadskoj. – Minsk : RUP «CNIKIVR», 2022. – 145 s.
21. Sostoyaniye prirodnoj sredy Belarusi: ekologicheskij byulleten' / E. I. Gromadskaya, S. A. Dubenok, S. V. Sushko [i dr.] ; pod obshch. red. S. A. Dubenok. – Minsk : RUP «CNIKIVR», 2021. – 150 s.
22. Sostoyaniye prirodnoj sredy Belarusi: ekologicheskij byulleten' / E. I. Gromadskaya, D. V. Cublenok, M. V. Vodejko [i dr.] ; pod obshch. red. E. I. Gromadskoj. – Minsk : RUP «CNIKIVR», 2023. – 151 s.
23. Sostoyaniye prirodnoj sredy Belarusi: ezhegodnoe informacionno-analiticheskoe izdanie / R. V. Mihalevich, V. M. Burak, S. A. Dubenok [i dr.] ; pod obshch. red. M. A. Eres'ko. – Minsk : RUP «Bel NIC «Ekologiya», 2020. – 101 s.

Материал поступил 22.01.2025, одобрен 27.02.2025,
принят к публикации 28.02.2025

ЭКОНОМИКА

УДК 913

РОЛЬ ПРИРОДНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАЗВИТИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ (НА ПРИМЕРЕ АПСХЕРОН-ХЫЗИНСКОГО И БАКИНСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЙОНА)

Н. К. Абдуллаева

Докторант кафедры экономической и политической географии Азербайджана, Институт географии им. академика Г. А. Алиева Национальной академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджанская Республика, e-mail: abdullayevanurr@gmail.com

Реферат

Целью исследования является независимый анализ влияния природных и экономических факторов, наличие имеющихся возможностей и ограничений, влияющих на развитие промышленности строительных материалов Апшерон-Хызинского и такого важного экономического района, как Баку.

Материалы и методы

В статье дан анализ экономических показателей развития промышленности строительных материалов двух экономико-географических районов Азербайджана (Апшерон-Хызинского и Баку) и, учитывая роль промышленности строительных материалов в общем социально-экономическом развитии экономики страны, были исследованы факторы, обеспечивающие ускоренное и устойчивое развитие этой отрасли.

Результаты и обсуждение

Оценка природных и экономических факторов, влияющих на развитие промышленности строительных материалов, помогает понять потенциал развития и авантажность в экономических отраслях одного региона. На развитие промышленности строительных материалов оказывают влияние такие факторы, как географическая среда, наземные и подземные ресурсы, транспортная инфраструктура, различные производственные отрасли, рынок недвижимости, трудовые ресурсы, социальные и политические отношения, торговля и др.

Выводы

С целью обеспечения развития промышленности строительных материалов в будущем с применением передовых технологий в производстве и для управления этими технологиями, вырастить грамотных специалистов для сотрудничества в разных отраслях. Для увеличения инновационной способности в промышленности строительных материалов необходимо составить и утвердить план сотрудничества всех участников. Сделанные выводы в экономических целях могут быть использованы в программе социально-экономического развития регионов страны.

Ключевые слова: строительный материал, природный фактор, рациональное использование, экономический фактор, экономическое сотрудничество.

THE ROLE OF NATURAL AND ECONOMIC FACTORS AFFECTING THE DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION MATERIALS INDUSTRY (IN THE EXAMPLE OF ABSHERON-KHIZI AND BAKU ECONOMIC REGIONS)

N. K. Abdullayeva

Abstract

The purpose of the study is to independently analyze the natural and economic factors affecting the development of the building materials industry in important economic regions such as Absheron-Khizi and Baku, and to understand the existing opportunities and limitations in the field of industry.

Material and method

In the article, the economic indicators of the construction sector and the building materials industry in two economic-geographical regions of Azerbaijan (Absheron-Khizi and Baku regions) were analyzed, and the factors that help ensure the rapid and sustainable development of this industry, taking into account the role of the building materials industry in the overall socio-economic development of the country's economy analyzed.

Analysis and discussion

The assessment of natural and economic factors affecting the development of the construction materials industry helps to understand the development potential of a region and its advantages in economic fields. Factors such as geographic location, underground and surface resources, transportation infrastructure, various production areas, real estate market, labor force level, social and political relations, trade and sales are also factors influencing the development of building materials industry.

Conclusions

In order to ensure the future development of the construction materials industry, advanced technologies should be applied to production and cooperation with various sectors should be done to train qualified and educated personnel to manage these technologies. In order to increase the innovation capacity in the construction materials industry, a plan should be drawn up that confirms the cooperation of all participants of the general construction sector. The proposed results can be used for economic purposes and in socio-economic development programs of the country's regions.

Keywords: construction material, natural factor, efficient use, economic factor, economic cooperation.

Введение

Республика известна как страна нефтяной промышленности и энергетики. Апшеронский полуостров обладает нефтяными и газовыми месторождениями, имеющими стратегическое значение на мировом энергетическом рынке и глобальные изменения в плоскости мировой энергетики не влияют на развитие промышленности этого региона. В последние годы развитие нефтяной и газовой отраслей расширили экономику страны и создали большие возможности для начала строительных проектов ускоренными темпами. Сле-

дует отметить, что экономические отношения в нефтяной отрасли и энергетике, как и в других отраслях, не влияют на устойчивое развитие промышленности строительных материалов.

На рисунке 1 показаны некоторые экономические показатели Баку и Апшерон-Хызинского экономического района, а также тенденции увеличения и уменьшения этих экономических показателей в 2022 году по сравнению с 2015 годом. Несмотря на общий рост стоимости строительных работ, наблюдалось снижение других показателей. Причиной этого могут быть несколько факторов. Одной из

причин может быть то, что вместо получения быстрой прибыли в краткосрочный период, компании вкладывают инвестиции в отрасли, обеспечивающие длительное развитие. Одной из причин сокращения инвестиций является и политическая ситуация на финансовом рынке (канун II Карабахской войны). Это отрицательное влияние является причиной сокращения инвестиций.

В 2022 г. в Республике было зарегистрировано 320 предприятий по производству строительных материалов, из которых 70 % приходится на долю Бакинского экономического района.

С 2015 г. и по настоящее время в Бакинском экономическом районе в производстве многих видов изделий и конструкций строительных материалов наблюдается рост. По статистическим данным Бакинский экономический район удовлетворил потребности республики в общем производстве гипса и ангидрита на 84,9 %, известкового камня для

строительства на 56,9 %, цемента – 71,6 %, строительной извести – 87,4 %, в кирпиче из цемента, бетона и похожих изделий – 95,1 %, готовый смешанный бетон для кладки – 67,8 %, производстве строительного кирпича – 52 %, гипсовые плиты и блоки – 94,2 %. Доля экономического района в производстве гравия, обломочного камня, мелкого речного камня и кремня очень низкая. Но, несмотря на это, экономический район является лидером в производстве основных видов строительных материалов, изделий и конструкций [1, 19].

В Апшерон-Хызинском экономическом районе в производстве строительных материалов отличаются Апшеронский район и Сумгаит. По статистическим данным в 2022 г. в Апшеронском районе было произведено 12 % гравия, мелкого речного и обломочного камня, 30 % строительного известняка, 2 % цемента, 42 % строительного кирпича, 16 % стеклянных изделий, 3 % асфальта [1, 16, 19].

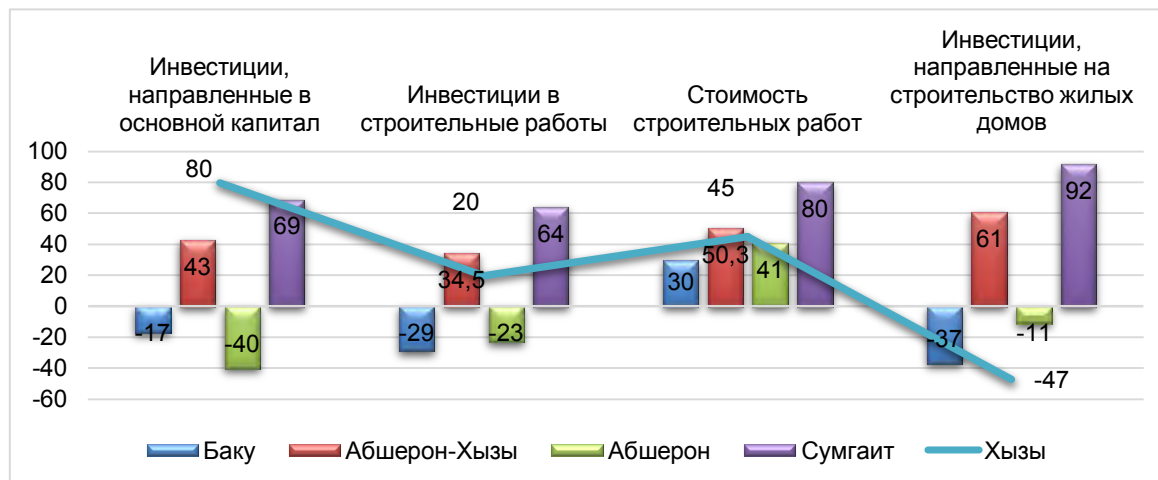


Рисунок 1 – Тенденция увеличения и снижения экономических показателей по основным направлениям инвестиций в строительный сектор в 2022 году по сравнению с 2015 годом (%)

Примечание – Источник: подготовлен автором на основе статистических материалов

На рисунке 2 представлены строительные материалы, изделия и конструкции, произведенные в Абшерон-Хызинском и Бакинском экономических районах в 2022 году. Судя по картинке, отмечу, что Абшеронский район сильно отличается от других регионов разнообразием производимых строительных материалов.

В производстве кирпича Апшеронский район и Нахичеванская АР отстают от г. Баку. Следует отметить, что основными производителями строительного известняка являются г. Баку, Апшеронский и Газахский районы. Однако в производстве гипса и ангидрита г. Баку и Геранбойский район являются лидерами. В производстве цемента Бакинский экономический район занимает первое место. В то же время крупным производителем цемента после Баку является Газахский район. В производстве асфальта выделяются Баку, Нахичеванская АР, Апшеронский, Гейчайский, Кюрдамирский и Имишлинский районы. Только в 2022 г. из произведенного 1131,8 тыс. т асфальта 59 % приходилось на долю Баку, 20 % – Нахичеванской АР и остальная часть – на долю других регионов.

Материалы и методы

В ходе исследования были использованы материалы Государственного комитета статистики Азербайджанской Республики, материалы Министерства экологии и природных ресурсов Азербайджанской Республики, материалы фонда институтов географии, геологии и геофизики НАНА, а также материалы исследования и практические рекомендации ученых стран СНГ и других зарубежных стран. В ходе исследования использовались методы сравнения, статистического, математического анализа и системного подхода.

Результаты и обсуждения

Совместное использование природных и экономических факторов способствуют развитию и росту производства продукции промышленности строительных материалов. В усилении экономики регионов, богатых сырьем, развитие промышленности строительных

материалов является одним из значимых направлений, потому что строительное сырье является важным источником в социально-экономическом развитии регионов. Как и во многих странах, в Азербайджане такие отрасли как промышленность строительных материалов, нефтехимическая, энергетика и инфраструктура, обеспечивающие равномерное развитие регионов, улучшая стандарты проживания населения, играют важную роль в экономике страны [2, 4, 5].

Развитие промышленности строительных материалов в первую очередь зависит от геологических условий и потребности этой территории в строительных материалах. Для развития промышленности строительных материалов какого-либо региона важным условием является экономическая оценка строительного сырья данного региона. Н. Набиев, д. э. н., экономическую оценку строительного сырья излагает как получение экономической пользы, полученной в процессе совместного производства и потребления [15]. Во время экономической оценки строительного сырья, наряду с оценкой первичного состава сырья, исследуется состав, количество и качество отходов, полученных от первичной и вторичной обработки сырья, и, с этой точки зрения, подсчитываются затраты при эксплуатации и использовании сырья и готовится план по размещению соответствующих предприятий производства.

Известный профессор М. Лемешев, эксперт ООН по окружающей среде привел пример о нерациональной сути в использовании природных ресурсов: «Мы ежегодно добываем железную руду. Добывая её открытым способом, мы уничтожаем тысячи гектаров чернозёма, ограничивая рост производства молока, мяса и хлеба [12, 13]. Принимая во внимание меры по охране природы с применением прогрессивных методов, экономическая выгода природных богатств заключается в их комплексном использовании».

Изобилие строительного сырья в регионах республики благоприятно для территориальной организации и рационального развития промышленности строительных материалов. Азербайджан, обладая богатыми наземными и подземными ресурсами, образует большой потенциал для обеспечения промышленности оборудованием.

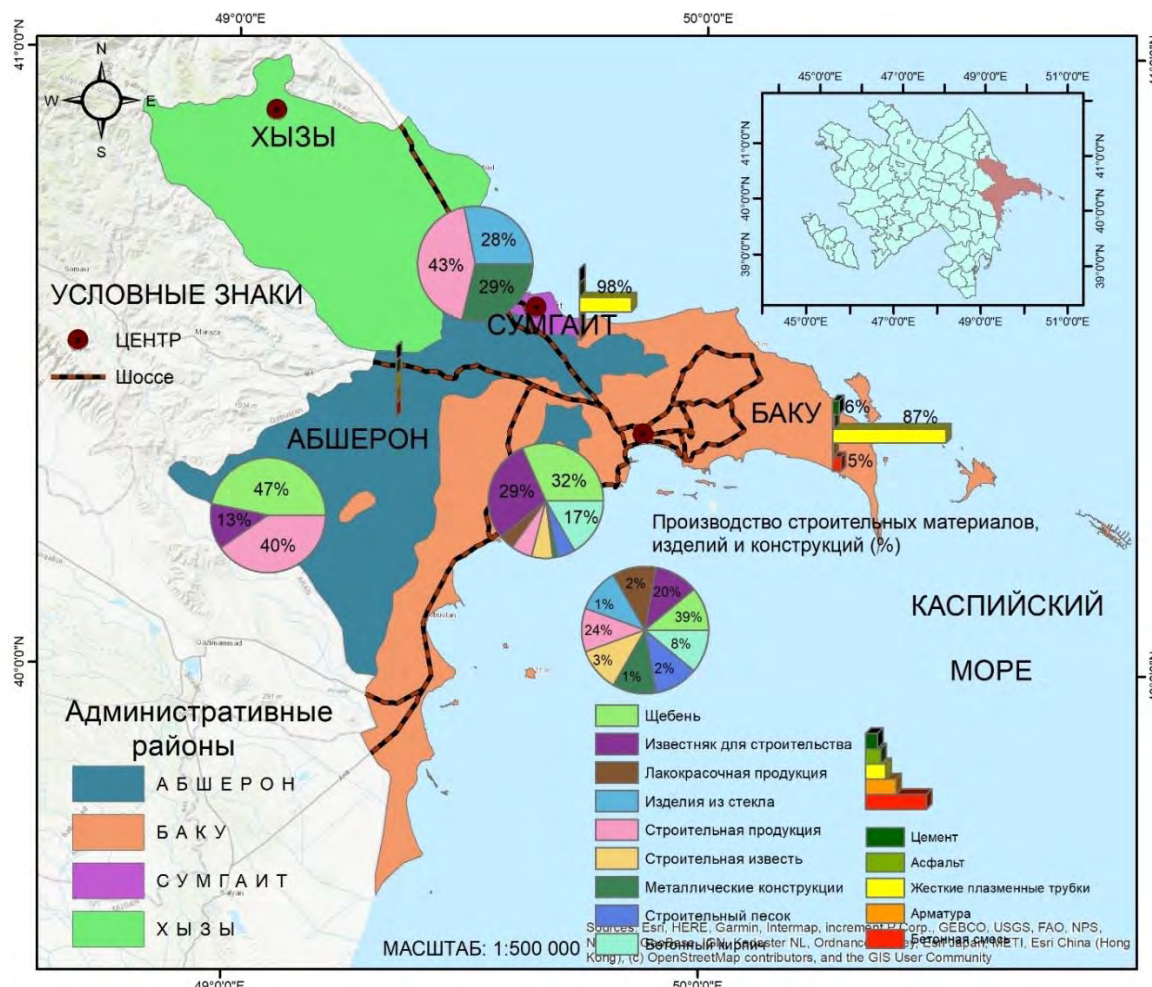


Рисунок 2 – Тенденция увеличения и снижения экономических показателей по основным направлениям инвестиций в строительный сектор в 2022 году по сравнению с 2015 годом (%)

Примечание – Источник: подготовлен автором на основе статистических материалов

Апшерон-Хызинский и Бакинский экономический районы, поддерживая развитие промышленности строительных материалов, обладают разнообразными запасами сырья. Геологическое строение региона и наличие месторождений известняка, глины, нефти, газа и др. сырья непосредственно влияют на ассортимент и качество производимой продукции строительных материалов. Месторождения строительного сырья Апшеронского полуострова представлены каменными запасами, которые могут быть использованы для напольных и стенных покрытий, а также для создания элементов дизайна, в производстве кирпича, цемента и других строительных блоков могут быть использованы глина и известняк, в производстве бетона и асфальта – месторождения песка и гравия. Богатство региона нефтегазовым месторождением является большой опорой для развития разных отраслей промышленности строительных материалов, в том числе асфальта, изоляционных и пластиковых материалов.

Одним из природных факторов в развитии отрасли строительных материалов является доступное, с экономической точки зрения, использование запасов глины и известняка в производстве строительных материалов, что является толчком для развития этой отрасли в регионе.

В Азербайджане самые крупные месторождения цементного сырья – это Карадагское месторождение известняка, Шахгая – месторождение известняка, Гарадаг – 1 и Карадаг – 2, месторождения глины расположены на Апшероне. Эти месторождения в развитии цементной отрасли и укреплении инфраструктуры имеют стратегическое значение. Эффективное использование и управление этими месторождениями играют важную роль в развитии цементной отрасли. В Азербайджане из общих запасов 154,5 млн м³ исследовано 82 месторождения глины. На территории Бакинского экономического

района имеется достаточное количество месторождений морской глины. Зыхское месторождение и Гызылдашское обладают высоким качеством и имеют промышленное значение [1, 4, 5].

Известно, что в Баку и окружающих регионах такие строительные материалы, как бетон и железобетон, широко используемые в строительстве зданий и инфраструктуры, являются основными. В современном строительстве эти два материала, обладая высокой прочностью для создания крепкой структуры, считаются идеальным строительным материалом. Так, бетон и железобетон, основу которых составляет производство цемента на базе месторождений известняка и глины Апшеронского района, открывают путь для обеспечения строительства региона в прочном и выгодном сырье. Потребительские предприятия промышленности строительных материалов производят материалоемкую, энергоёмкую грузообъёмную продукцию, потребляющую много горячего, и являются трудоёмкой. Бетонные, железобетонные изделия и конструкции, мягкие кровельные покрытия, теплоизоляционный материал, настенный материал и др. производственные отрасли, обладая большим объёмом и весом, отличаются низкой транспортабельностью. Перечисленные отрасли являются в основном передовыми потребительскими отраслями.

Известно, что минеральное строительное сырье дешевое, но производство продукции из него требует очень высоких затрат. Такие отрасли, как производство цемента, строительного кирпича и керамических плит, керамики, керамических труб, асбестоцементных изделий и шифера, стекла, гипса, извести, неметаллических строительных материалов и др. требуют высоких затрат. Например, на производство 1 т керамических труб требуется 1–1,5 т глины, 1 т цемента клинкера требуется 2,0–2,5 т известняка и глины, 1 т изве-

сти необходимо 2 т известняка [21, 23]. Так, слияние истоков известняка и глины на Апшероне и Баку, с географической точки зрения, экономически выгодно в развитии некоторых отраслей строительных материалов. Тот факт, что сырье составляет значительную часть стоимости строительных материалов, ещё раз подтверждает тягу производства к сырьевой базе.

Перечисленные строительное сырье и материалы Апшерон-Хызинского и Бакинского экономических районов, а также Азербайджана для удовлетворения потребностей строительства создают условия для активной деятельности этой отрасли как на местном, так и международном уровне.

Апшеронский полуостров является одним из регионов Азербайджанской Республики стратегического значения. В последние годы в Апшеронском регионе ряд взаимосвязанных факторов, таких как рост населения, ускорение урбанизации, расширение промышленности, подъём экономики и др. в значительной степени влияет на развитие строительства.

На развитие промышленности строительных материалов этого региона влияют следующие факторы.

Важность экономики

Баку является важным экономическим центром республики. Одной из причин роста строительства в регионе является реализация многочисленных строительных проектов, приведших к развитию производства строительных материалов. Увеличиваются потребности страны в развитии строительных материалов. В Азербайджане энергетика является важной отраслью экономики. Развитие энергетики Апшеронского полуострова, обладающего запасами нефти и газа, обеспечивает растущие потребности строительства в строительных материалах. В последние годы успешно реализуемая нефтяная стратегия страны является одним из основных факторов, обеспечивающих развитие инфраструктуры. На общие строительные-монтажные работы в 2015 г. из общего бюджета инвестиций 12 млн манат, 5 млн манат были направлены в нефтегазовую отрасль, в 2020 г. из 11 млн манат бюджета соответственно 3 млн манат, в 2022 г. из 13 млн манат соответственно 3 млн манат. Эти показатели реализации строительных проектов в нефтегазовой отрасли, в развитии инфраструктуры страны и строительной отрасли играют важную роль.

Оценка энергетики

Оценка энергетических запасов играет одну из значимых ролей в развитии строительных материалов. Из-за роста цен в энергетике и увеличении финансирования производства строительных материалов наблюдается рост цен на строительные материалы, разную продукцию и услуги. А это отрицательно сказывается на финансировании строительных проектов и использовании строительных материалов. Энергетический кризис в 2014–2017 гг. значительно сократил финансирование инвестиционной программы из бюджета страны и до определенного периода были сокращены работы по основному строительству и жилья. С ростом цен на энергоносители увеличиваются и затраты на производство цемента, стекла и пластика. Эти материалы во время производственного процесса при нагревании, плавке, с учетом перевозки, требуют значительных энергетических затрат.

Турецкий экономист и эксперт Фатих Бирол в оценке энергетических ресурсов для всех отраслей промышленности, в том числе строительных материалов, акцентирует важность энергетической эффективности, инноваций и стабильности на рынке в прочном и устойчивом развитии промышленности [24].

Рынок недвижимости в строительстве

Одним из важных факторов, влияющих на развитие промышленности строительных материалов, является оборот и потребности рынка недвижимости [18, 22]. С ростом объёма строительных проектов растут и требования к строительным материалам. Баку является крупным городом с прилегающей к нему заселенной территорией Апшерона. Растет потребность в производстве строительных материалов, что является причиной начала строительных проектов на рынке недвижимости. Сегодня на рынке недвижимости, не только в Азербайджане, но и во всем мире наблюдается рост. Изменения, происходящие с ростом курса валюты, мало влияют, но считаются очень эффективной, длительной и зарабатывающей инвестиционной отраслью, связанной с

устойчивостью инвестиционного потенциала рынка недвижимости. Всё это влияет на сферу недвижимости. Специально следует отметить, что с начала российско-украинской войны и введением западными странами антироссийских санкций, рынок недвижимости Азербайджана для российских покупателей превратился в область рациональных инвестиций. Географическая близость и малый потенциальный риск для российских инвесторов является итогом серьезных инвестиционных вложений в жилищный сектор Азербайджана. Эти моменты наблюдались и ранее. В 2010–2012 гг. во время глобального мирового кризиса наблюдался поток инвестиций иранских инвесторов в рынок недвижимости Азербайджана [2].

Социальная и политическая стабильность

Социальные и политические отношения, стабильность и деловитость, торговая безопасность относятся к экономическому фактору, влияющему на развитие всех отраслей промышленности, а также строительных материалов [9, 10]. Стабильная среда и торговая безопасность – это факторы, обеспечивающие эффективность и конкурентоспособность промышленности. Для политической стабильности страны важным является установление плана развития разных отраслей промышленности и прогноз, а также планирование длительных инвестиционных вложений. Одним из многочисленных вопросов, интересующих инвесторов, является охрана юридических прав инвесторов в регионе и безопасная доставка товара и услуг на мировой рынок. С этой целью инвесторы страны особое внимание уделяют таким факторам, как прозрачность юридической среды и торговая безопасность. В то же время социальная стабильность и связи между организациями являются основным фактором в развитии промышленности. Социальная стабильность подразумевает социальные отношения, безопасность населения, справедливость, возможности развития отношений. Это помогает владельцам трудовой силы обеспечить мотивацией в промышленности.

Инфраструктурные проекты

Для нормальной деятельности инфраструктуры региона или страны необходимо иметь в целом структуру и объекты. Апшеронский регион, включая Баку, в общем один из быстро развивающихся регионов. Претворяя в жизнь инфраструктурные проекты (дороги, энергетические и коммуникационные проекты), растут нужды в строительных материалах, а это поощряет развитие промышленности в регионе.

Развитие туризма

Развитие туризма в Азербайджане является приоритетной отраслью. С распадом Советского Союза развалился и туризм в Азербайджане, но в начале 2000 г. началось развитие и возрождение туризма. В настоящее время туризм в Азербайджане ускоренно развивается и находится в списке лидеров.

Следует отметить, что с развитием туризма в регионе началось строительство отелей, ресторанов и других объектов. Это способствует росту потребности в строительных материалах и развитию промышленности.

Технологические ресурсы

В современных условиях, наряду с высокими технологиями и инновационным подходом, строительное сырье является важным в производстве строительных материалов [25, 26]. В производстве строительных материалов развитие технологий и инноваций оказывают влияние на производительность и качество продукции. Рост и совершенствование технологий и инфраструктурных функций является движущей силой в производстве строительных материалов. Решение многих проблем, наблюдающихся в строительстве, таких как низкая энергетическая производительность и высокая карбоновая эмиссия, стало возможно с внедрением технологий и инновационных строительных материалов [11].

Транспорт

Промышленность строительных материалов играет важную роль в развитии транспорта, обладая передовым транспортным коридором [8, 14]. Азербайджан занимает выгодное положение для перевозки строительных материалов. Влияние транспорта на развитие промышленности строительных материалов связано с транспортной

инфраструктурой страны. Скоростные автомобильные дороги, железные дороги, воздушный и морской порты оказывают большое влияние на развитие промышленности. В прокладке скоростных автодорог, железной дороги, воздушных и морских линий важным является использование качественных и удобных строительных материалов. Значимым фактором в развитии транспортной системы является правильная организация проектов транспортной системы и ускоренное и качественное претворение в жизнь и доставка строительных материалов на обширную территорию [20]. Транспорт играет важную роль в доставке песка, гравия, песчаника, известняка и другого строительного сырья к месту выполнения проекта, имеющего важное значение для промышленности строительных материалов.

Правильная и эффективная организация транспортной сети, обеспечивающая быструю и экономичную поставку материалов, увеличивает скорость реализации проекта и обеспечивает безопасное снабжение. Кроме того, хорошо организованная транспортная система обеспечивает благоприятную деловую среду для производителей материалов и владельцев проекта, снижая стоимость поставок материалов и уменьшая логистические кризисы.

Следует отметить, что социально-экономическое развитие играет важную роль в развитии транспортной инфраструктуры. В 2019–2023 годах в регионах Азербайджана претворились в жизнь широкомасштабные транспортные проекты, поддерживающие безопасность окружающей среды и обеспечивающие скоростным транспортом. Строительство новых дорог, мостов и железнодорожных линий имеют значимую роль в повседневной жизни проживающих людей.

Эти проекты за счет ускоренного выполнения государственной программы являются важным шагом в социально-экономическом развитии страны.

Кадры

Одним из факторов, влияющих на развитие промышленности строительных материалов, являются грамотные и специализированные кадры [17]. Здесь имеется в виду уровень образования и технические навыки местного населения региона. Высокий уровень образования, технические и инженерные навыки создают возможность для интеграции новейших технологий в промышленность. Совершенствование технических навыков способствует росту эффективного развития промышленности и конкурентоспособности [3, 6, 7].

В итоге, учитывая наличие таких факторов, как потребительский, сырьевой, транспортный и др. не только в Апшерон-Хызинском, Баку и Гянджа-Газакском экономическом, но и других районов, исследование природных условий, сырьевого потенциала, географического положения и особенности расселения населения позволит улучшить территориальную организацию производства строительных материалов и их использование. В обеспечении строительной промышленности новой техникой и технологическими средствами, правильная оценка земельных участков с расположенными на ней месторождениями строительного сырья, привлечение строительных отходов к вторичной переработке и соблюдение нормативов в защите природы играют важную роль. Важным условием является принятие ряда мер для решения проблем в территориальной организации строительной промышленности. Важным является проведение на территории республики разведывательных работ и точной инвентаризации новых месторождений строительного сырья, выявление эффективности и картографирование. В итоге для решения недостатка в сырье и материалах строительной промышленности необходимо привлечь в производство в полном объеме местное сырье, и, увеличив объем экспорта в этой отрасли, сократив транспортные расходы, возможно открывать новые предприятия.

Выводы

В статье обсуждены сведения о развитии промышленности строительных материалов. В решении этого развития должны быть поставлены следующие цели:

1. Промышленность строительных материалов, являясь энергоёмкой и материалоемкой, одна из отраслей, сильно влияющая на окружающую среду и изменение климата. Добыча сырья, первичная переработка, доставка к пункту производства, реализация готовой продукции, доставка стройматериалов, снос зданий, перевозка отходов и другие процессы, которые повторяются постоянно. С этой точки зрения эффективное использование строительного

сырья, повторное использование отходов и переход на циркулярную экономику является важным условием.

2. Являясь энергоёмкой отраслью для сокращения эмиссии CO₂, для роста производительности и энергетической эффективности необходимо применять передовые технологии.

3. Строительная отрасль является как производственной, так и отраслью услуг. В процессе строительства зданий принимают участие разные группы специалистов. Для эффективного и успешного развития строительства, где сотрудничают разные группы специалистов, необходимо вместе работать и совместно решать проблемы. С целью роста инноваций в отрасли строительных материалов Азербайджана иностранные компании, вкладывая инвестиционные вложения в развитие производства, должны привлекать к сотрудничеству талантливые кадры. Естественно, очень важна поддержка инвесторов.

4. В привлечении талантливых кадров в отрасль строительных материалов очень важна государственная поддержка. В обучении кадров для работы в разных отраслях строительной промышленности и обеспечении их сертификатом необходимо при совместном сотрудничестве Министерства науки и образования и Министерства экономики составить план и программу.

5. В решении проблем в развитии промышленности строительных материалов важным является секторальное сотрудничество. Для развития этих отраслей при совместном сотрудничестве Министерства экологии и природных ресурсов, Министерства энергетики, Министерства экономики, Министерства труда и социальной защиты составить и представить план и программу. Это сотрудничество наряду с решением проблем в отрасли будет способствовать росту конкурентной способности.

Список цитированных источников

1. Абдуллаева, Н. К. Территориальная организация производства бетона и бетонных изделий в Бакинском экономическом районе / Н. К. Абдуллаева // Научно-практический журнал молодого исследователя. – 2023. – № 2. – С. 54–62.
2. Антропогенная геоморфология большого Баку : монография. / Э. К. Ализаде, С. А. Тарихазер, С. Г. Мамедов [и др.]. – Баку : Национальная академия наук Азербайджана, 2017. – 304 с.
3. Богатырева, И. В. Система мотивации и материального стимулирования как источник трудовой активности персонала компании / И. В. Богатырева, Л. А. Илюхина // Экономика труда. – 2022. – Том 9, № 5. – С. 955–970. – DOI: 10.18334/et.9.5.114737.
4. Гаджизаде, А. М. Природные ресурсы и естественные условия развития промышленности Азербайджанской ССР / А. М. Гаджизаде. – Баку : Азернешр, 1989. – 171 с.
5. Геология Азербайджана / гл. ред. А. Ализаде. – Баку : Нафта Пресс, 2003. – Т. 6. – 576 с.
6. Гурова, И. М. Зарубежный опыт мотивации и стимулирования трудовой деятельности / И. М. Гурова, О. В. Гурова // Экономика и социум: современные модели развития. – 2017. – Том 7, № 4. – С. 106–121.
7. Иванов, М. Ф. Актуальные проблемы мотивации персонала в строительной отрасли с точки зрения работников и пути их решения / М. Ф. Иванов, А. О. Петрунько // Актуальные проблемы экономики и управления в строительстве : материалы Национальной (всероссийской) науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 6–7 апреля 2023 г. – СПб., 2023. – С. 135–140.
8. Квашнина, К. А. Формирование маркетинга взаимоотношений в строительной отрасли России / К. А. Квашнина // Актуальные проблемы экономики и управления в строительстве : материалы Национальной (всероссийской) науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 6–7 апреля 2023 г. – СПб., 2023. – С. 119–122.
9. Кохно, П. А. Уровень высокотехнологичного производства определяется человеческим капиталом / П. А. Кохно // Экономика высокотехнологичных производств. – 2021. – № 3. – С. 169–180. – DOI: 10.18334/evp.2.3.112357.
10. Кохно, П. А. Взаимосвязь высокопроизводительного производства с материальной мотивацией персонала / П. А. Кохно, А. П. Кохно // Экономика высокотехнологичных производств. – 2023. – Том 4, № 3. – С. 205–218. – DOI: 10.18334/evp.4.3.116897.

11. Кукин, Л. А. Специфические особенности управления инновациями в сфере производства строительных материалов / Л. А. Кукин // Экономика, предпринимательство и право. – 2023. – Том 13, № 12. – С. 5869–5884. – DOI: 10.18334/ep.13.12.120075.
12. Макаренко, О. И. Особенности развития производства строительных материалов в зарубежной практике / О. И. Макаренко, В. Г. Севка // Экономика, предпринимательство и право. – 2023. – Том 13, № 2. – С. 413–426. – DOI: 10.18334/ep.13.2.117109.
13. Мелехин, В. Б. Оценка и управление использованием мощности производственного потенциала строительного предприятия / В. Б. Мелехин, А. Я. Гамзатов // Экономика и предпринимательство. – 2015. – № 10–2(63). – С. 745–750.
14. Морозова, В. С. Транспортные и погрузочно-разгрузочные средства : учебное пособие / В. С. Морозова, В. Л. Полячко. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 96 с.
15. Набиев, Н. Экономика, общество и экологическая среда / Н. Набиев. – Баку : Агрыдаг, 2000. – 696 с.
16. Регионы Азербайджана. – Баку : Материалы СКАР, 2023. – 865 с.
17. Романец, И. И. Стратегический нематериальный ресурс современного развития: новые компетентностные ценности / И. И. Романец // Креативная экономика. – 2023. – Том 17, № 3. – С. 1003–1012. – DOI: 10.18334/ce.17.3.117458.
18. Строительные материалы и изделия : учебное пособие / В. С. Руднов, Е. В. Владимирова, И. К. Доманская, Е. С. Герасимова ; под общ. ред. И. К. Доманской. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 203 с.
19. Строительство в Азербайджане. – Баку, 2023. – 249 с.
20. Шумаев, В. А. Основы логистики : учеб. пособие / В. А. Шумаев. – М. : Юридический институт МИИТ, 2016. – 314 с.
21. Чмышенко, Е. Г. Экономика промышленности строительных материалов: конспект лекций / Е. Г. Чмышенко, Л. В. Солдатенко ; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2012. – 339 с.
22. Экономика строительного предприятия : учеб. пособие / М. А. Королева, Е. С. Кондюкова, Л. В. Дайнеко [и др.]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 202 с.
23. Экономика строительства : учеб. пособие / И. В. Брянцева, Н. В. Воронина, З. Г. Любанская [и др.]. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – 212 с.
24. Birol, F. A bright future / F. Birol ; European Investment Bank. – 2018. – 28 p. – DOI: 10.2867/67846.
25. Czarniecki, L. Innovation in construction materials engineering versus sustainable development / L. Czarniecki, D. A. Van Gemert // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. – 2017. – № 6. – P. 765–771. – DOI: 10.1515/bpasts-2017-0083.
26. Francesco, P. Circular economy for the built environment: a research framework / P. Francesco, M. Alice // Journal of Cleaner Production. – 2017. – № 143. – P. 710–718.
7. Ivanov, M. F. Aktual'nye problemy motivacii personala v stroitel'noj otrasli s točki zreniya rabotnikov i puti ih resheniya / M. F. Ivanov, A. O. Petrun'ko // Aktual'nye problemy ekonomiki i upravleniya v stroitel'stve : materialy Nacional'noj (vserossijskoj) nauchno-prakticheskoj konferencii, Sankt-Peterburg, 6–7 aprelya 2023 g. – SPb., 2023. – S. 135–140.
8. Kvashnina, K. A. Formirovanie marketinga vzaimootnoshenij v stroitel'noj otrasli Rossii / K. A. Kvashnina // Aktual'nye problemy ekonomiki i upravleniya v stroitel'stve : materialy Nacional'noj (vserossijskoj) nauchno-prakticheskoj konferencii, Sankt-Peterburg, 6–7 aprelya 2023 g. – SPb., 2023. – S. 119–122.
9. Kohno, P. A. Uroven' vysokotekhnologichnogo proizvodstva opredelyaetsya chelovecheskim kapitalom / P. A. Kohno // Ekonomika vysokotekhnologichnyh proizvodstv. – 2021. – № 3. – S. 169–180. – DOI: 10.18334/evp.2.3.112357.
10. Kohno, P. A. Vzaimosvyaz' vysokoproduktivnogo proizvodstva s material'noj motivaciej personala / P. A. Kohno, A. P. Kohno // Ekonomika vysokotekhnologichnyh proizvodstv. – 2023. – Том 4, № 3. – S. 205–218. – DOI: 10.18334/evp.4.3.116897.
11. Kikin, L. A. Specificheskie osobennosti upravleniya innovacijami v sfere proizvodstva stroitel'nyh materialov / L. A. Kikin // Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo. – 2023. – Том 13, № 12. – S. 5869–5884. – DOI: 10.18334/ep.13.12.120075.
12. Makarenko, O. I. Osobennosti razvitiya proizvodstva stroitel'nyh materialov v zarubezhnoj praktike / O. I. Makarenko, V. G. Sevka // Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo. – 2023. – Том 13, № 2. – S. 413–426. – DOI: 10.18334/ep.13.2.117109.
13. Melekhin, V. B. Ocenka i upravlenie ispol'zovaniem moshchnosti proizvodstvennogo potentsiala stroitel'nogo predpriyatiya / V. B. Melekhin, A. YA. Gamzatov // Ekonomika i predprinimatel'stvo. – 2015. – № 10–2(63). – S. 745–750.
14. Morozova, V. S. Transportnye i pogruzochno-razgruzochnye sredstva : uchebnoe posobie / V. S. Morozova, V. L. Polyacko. – Chelyabinsk : Izdatel'skij centr YUUrGU, 2010. – 96 s.
15. Nabiev, N. Ekonomika, obshchestvo i ekologicheskaya sreda / N. Nabiev. – Baku : Agrydag, 2000. – 696 s.
16. Regiony Azerbajdzhana. – Baku : Materialy SKAR, 2023. – 865 s.
17. Romanec, I. I. Strategicheskij nematerial'nyj resurs sovremenno razvitiya: novye kompetentnostnye cennosti / I. I. Romanec // Kreativnaya ekonomika. – 2023. – Том 17, № 3. – S. 1003–1012. – DOI: 10.18334/ce.17.3.117458.
18. Stroitel'nye materialy i izdeliya : uchebnoe posobie / V. S. Rudnov, E. V. Vladimirova, I. K. Domanskaya, E. S. Gerasimova ; pod obshch. red. I. K. Domanskoj. – Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2018. – 203 s.
19. Stroitel'stvo v Azerbajdzhanе. – Baku, 2023. – 249 s.
20. SHumaev, V. A. Osnovy logistiki : ucheb. posobie / V. A. SHumaev. – M. : YUridicheskij institut MIIT, 2016. – 314 s.
21. CHmyshenko, E. G. Ekonomika promyshlennosti stroitel'nyh materialov: konспект лекций / E. G. CHmyshenko, L. V. Soldatenko ; Orenburgskij gos. un-t. – Orenburg : OGU, 2012. – 339 s.
22. Ekonomika stroitel'nogo predpriyatiya : ucheb. posobie / M. A. Koroleva, E. S. Kondyukova, L. V. Dajneko [i dr.]. – Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2019. – 202 s.
23. Ekonomika stroitel'stva : ucheb. posobie / I. V. Bryanceva, N. V. Voronina, Z. G. Lyubanskaya [i dr.]. – Habarovsk : Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2013. – 212 s.
24. Birol, F. A bright future / F. Birol ; European Investment Bank. – 2018. – 28 p. – DOI: 10.2867/67846.
25. Czarniecki, L. Innovation in construction materials engineering versus sustainable development / L. Czarniecki, D. A. Van Gemert // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. – 2017. – № 6. – P. 765–771. – DOI: 10.1515/bpasts-2017-0083.
26. Francesco, P. Circular economy for the built environment: a research framework / P. Francesco, M. Alice // Journal of Cleaner Production. – 2017. – № 143. – P. 710–718.

References

1. Abdullaeva, N. K. Territorial'naya organizaciya proizvodstva betona i betonnyh izdelij v Bakinskom ekonomicheskom rajone / N. K. Abdullaeva // Nauchno-prakticheskij zhurnal mladogo issledovatelya. – 2023. – № 2. – S. 54–62.
2. Anropogennaya geomorfologiya bol'shogo Baku : monografiya. / E. K. Alizade, S. A. Tarihazer, S. G. Mamedov [i dr.]. – Baku : Nacional'naya akademiya nauk Azerbajdzhana, 2017. – 304 s.
3. Bogatyreva, I. V. Sistema motivacii i material'nogo stimulirovaniya kak istochnik trudovoj aktivnosti personala kompanii / I. V. Bogatyreva, L. A. Ilyuhina // Ekonomika truda. – 2022. – Том 9, № 5. – S. 955–970. – DOI: 10.18334/et.9.5.114737.
4. Gadzhizade, A. M. Prirodnye resursy i estestvennye usloviya razvitiya promyshlennosti Azerbajdzhanskoj SSR / A. M. Gadzhizade. – Baku : Azerneshr, 1989. – 171 s.
5. Geologiya Azerbajdzhana / gl. red. A. Alizade. – Baku : Nafta Press, 2003. – Т. 6. – 576 s.
6. Gurova, I. M. Zarubezhnyj opyt motivacii i stimulirovaniya trudovoj deyatel'nosti / I. M. Gurova, O. V. Gurova // Ekonomika i sotsium: sovremennye modeli razvitiya. – 2017. – Том 7, № 4. – S. 106–121.

Материал поступил 23.07.2024, одобрен 23.07.2024, принят к публикации 23.07.2024

УДК 331.5.024.52

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБНОСТИ В КАДРАХ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА: ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ

Ю. А. Баканова

Аспирант, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: jy1977@tut.by

Реферат

В данной статье рассматриваются разнообразные подходы и практики применения методов прогнозирования потребности экономики в квалифицированных кадрах. Актуальность данной темы обусловлена необходимостью постоянного обновления и адаптации кадрового состава в условиях динамично развивающегося рынка труда и изменяющихся технологических процессов. В современном мире важность высококвалифицированных специалистов, обладающих уникальными знаниями и навыками, становится все более очевидной. Современные технологии требуют от специалистов специализированных знаний, что увеличивает спрос на подготовленных кадров. Таким образом, процесс прогнозирования потребностей в кадрах становится важным механизмом для сокращения дисбаланса на рынке труда.

Проведен сравнительный анализ различных подходов к прогнозированию потребности в кадрах, что позволяет выявить сильные и слабые стороны каждой из методик. В результате анализа сделан вывод о преимуществах комбинированного метода прогнозирования, который интегрирует качественные и количественные аспекты. Этот метод существенно расширяет возможности анализа инвестиционных проектов, планируемых к реализации, а также позволяет более точно оценивать характеристики работников, необходимых строительному комплексу Республики Беларусь.

Предложен алгоритм прогнозирования потребности в кадрах для строительной отрасли с использованием указанного комбинированного подхода. Алгоритм учитывает как текущие тенденции на рынке труда, так и прогнозируемые изменения в экономике. Это делает его максимально адаптированным к запросам строительного комплекса. Предложенный подход может служить основой для разработки эффективных стратегий управления кадрами, что в свою очередь будет способствовать повышению конкурентоспособности и устойчивости строительного сектора в стране. Подобные методологии имеют большое значение не только для Беларуси, но и для других стран с аналогичными экономическими условиями.

Ключевые слова: методы прогнозирования, потребность в кадрах, дополнительная потребность в кадрах.

METHODOLOGY FOR FORECASTING THE NEED FOR PERSONNEL FOR CONSTRUCTION: THE BASICS OF FORMATION

Yu. A. Bakanova

Abstract

This article discusses a variety of approaches and practices for the application of methods for forecasting the need of the economy for qualified personnel. The relevance of this topic is due to the need for constant updating and adaptation of personnel in a dynamically developing labor market and changing technological processes. In the modern world, the importance of highly qualified specialists with unique knowledge and skills is becoming more and more obvious. Modern technologies require specialized knowledge from specialists, which increases the demand for trained personnel. Thus, the process of forecasting human resources needs becomes an important mechanism for reducing the imbalance in the labor market.

A comparative analysis of various approaches to forecasting the need for personnel has been carried out, which allows us to identify the strengths and weaknesses of each of the methods. As a result of the analysis, the conclusion is made about the advantages of the combined forecasting method, which integrates qualitative and quantitative aspects. This method significantly expands the possibilities of analyzing investment projects planned for implementation, and also allows for a more accurate assessment of the characteristics of workers needed by the construction complex of the Republic of Belarus.

An algorithm for predicting the need for personnel for the construction industry using this combined approach is proposed. The algorithm takes into account both current trends in the labor market and projected changes in the economy. This makes it maximally adapted to the needs of the construction complex. The proposed approach can serve as a basis for the development of effective HR management strategies, which in turn will contribute to improving the competitiveness and sustainability of the construction sector in the country. Such methodologies are of great importance not only for Belarus, but also for other countries with similar economic conditions.

Keywords: forecasting methods, the need for personnel, additional need for personnel.

Введение

В условиях быстро меняющихся экономической ситуации и технологических процессов проблемы сбалансированности на рынке труда в строительстве становятся все более актуальными и значимыми. Сложившийся в настоящее время дефицит рабочих и специалистов в строительстве, особенно в узкоспециализированных профессиях, ставит под угрозу выполнение запланированных проектов в срок, что может привести к увеличению стоимости проектов, нежелательным задержкам и снижению их общего качества.

На фоне растущей конкуренции и необходимости соблюдения высоких стандартов качества нехватка кадров становится особенно ощутимой, что требует от работодателей не только поиска новых решений для привлечения и удержания профессионалов, но и пересмотра своих подходов к организации труда и обучению новых специалистов.

Методы прогнозирования потребности в кадрах

Важны специалисты, обладающие знаниями и навыками. Так, Г. Ш. Карабаева отмечает в своей работе: «Во многих сферах появляются гибридные профессии. Высококвалифицированный труд более востребован. «Инновационного» работника отличает более высокий уровень образования, ответственности и компетентности, широкий общекультурный кругозор, новые ценности, ориентация на профессионализм, новаторство, творчество и саморазвитие в труде, это коллективно и индивидуально развитая личность» [1]. Недостаток квалифицированных кадров не только замедляет темпы строительства, но и приводит к росту затрат, что в свою очередь негативно сказывается на финансовых показателях организаций.

Необходима активизация программ обучения и переквалификации, которые помогут привлекать в строительство людей, обладающих необходимыми компетенциями. С. Н. Леонович, В. М. Трепачко

Экономика

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-136-1-177-182>

и С. В. Харитончик утверждают, что «комплексное решение указанных и других задач рассматривается в проекте Стратегии развития строительной отрасли Республики Беларусь на 2018–2025 годы. В ней важная роль отводится кадровому обеспечению строительной отрасли и формированию ее кадровой политики в контексте стоящих задач. Следует особое внимание акцентировать на совершенствовании подготовки кадров как на главном способе и инструменте достижения прогресса строительной отрасли Республики Беларусь» [2].

Ф. Ф. Дудырев и О. А. Романова утверждают «важное значение приобретает изучение специфических компетенций, навыков и умений работников, необходимых для быстрой смены видов профессиональной деятельности и безболезненной адаптации на новом рабочем месте, для эффективного выполнения сотрудниками трудовых функций в условиях постоянно меняющегося технологического процесса» [3].

Современные технологии и методы работы предполагают применение специализированных знаний, что создает дополнительный спрос на квалифицированные кадры. Важно, чтобы учебные заведения и предприятия сотрудничали в рамках реализации актуальных образовательных программ.

Современные технологии стремительно меняют рынок труда, поэтому прогнозирование потребности экономики в кадрах становится особенно актуальным. Учитывая динамичное развитие экономики, необходимо осуществлять регулярный анализ профессионально-квалификационных групп. Это позволит на этапе подготовки специалистов учитывать требования работодателей и адаптировать образовательные программы к реалиям рынка. Как утверждают С. Г. Кузнецов и И. И. Мухина, «инновационный путь развития экономики ставит в число основных приоритетов формирование адекватной и эффективной структуры занятости населения, основанной на принципиально новом качестве работника, рост человеческого капитала как основного фактора развития» [4].

О. А. Колесникова, Е. В. Маслова и И. В. Окопелых отмечают «в условиях последней НТР и цифровизации экономики остро стоит проблема возрастающего несоответствия профессионально-квалификационной структуры трудовых ресурсов новым потребностям рынка труда, усиления угроз недоиспользования имеющейся рабочей силы при постоянном дефиците кадров» [5]. Поэтому прогнозирование потребности экономики в кадрах по профессионально-квалификационным группам в условиях инновационного развития экономики является основным механизмом сокращения профессионально-квалификационного и территориального дисбаланса спроса и предложения рабочей силы на рынке труда, оперативного реагирования системы высшего, среднего специального и профессионально-технического образования на подготовку кадров в разрезе профессий и специальностей в соответствии с запросами экономики.

Государственная программа «Рынок труда и содействие занятости» на 2021–2025 гг., совместно с постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 28 декабря 2017 г. № 1016, направлены на создание новых условий для адаптации рынка труда к современным требованиям экономики. Важнейшей целью реализации этой программы является повышение уровня занятости населения и обеспечение соответствия квалификаций работников потребностям работодателей. Реализация данной программы требует разработки нового подхода к прогнозированию потребности экономики в трудовых ресурсах. «Имеющиеся методы прогнозирования потребности отдельных отраслей экономики и их предприятий в специалистах с высшим образованием могут быть использованы только при интеграции их положительных сторон, учитывая особенности функционирования современной экономики знаний и подключением в окончательную модель прогноза конечных результатов, показателей конкурентоспособности и эффективности отдельных отраслей» [6].

Г. И. Сидуновой отмечается, что «насчитывается несколько десятков методов прогнозирования на рынке труда. Среди них: экспертный метод, основанный на выявлении субъективных мнений специалистов; экстраполяционный метод, базирующийся на прогнозировании тенденций по отдельным составляющим рынка труда; методы, основанные на корреляционных связях; аналитический метод, объединяющий широкий класс разнообразных приемов» [7].

Интерес представляет «прогнозирование потребности в кадрах на основе опросной методики», которую в свое время применяли С. Ю. Алашеев и Н. Ю. Посталюк [8]. Данная методика показала хорошие результаты в краткосрочном периоде планирования потребности. Но в то же время она имеет недостатки. Так, М. А. Седнина отмечает, что «опрашиваемые эксперты определяют потребности в кадрах для своего предприятия, своей текущей сферы деятельности. Реалии появления в прогнозном периоде инновационных технологий и товаров, которые обуславливают появление новых производств, рынков, видов деятельности и целых новых отраслей могут упускаться из виду. В условиях государственного сектора не исключается возможность того, что в ответ на запрос о перспективной потребности в кадрах для инновационного развития конкретного предприятия и отрасли в целом эксперты могут подавать сведения, основываясь на уже сформированных и утвержденных ранее для исполнения планов и стратегиях развития предприятий и отрасли» [9].

С. Ю. Алашеев и Н. Ю. Посталюк пришли к выводу, что «сочетание опроса нанимателей и определение глобальной потребности национальной экономики в кадрах исходя из перспектив экономического роста, спроса и предложения на рынке труда, изменения профессиональной структуры занятости населения и других макроэкономических факторов является наиболее эффективным в прогнозировании потребности в кадрах» [10].

В совокупности можно утверждать, что существующее многообразие методов прогнозирования можно условно подразделить на две основные категории: качественные и количественные. Сравнительный анализ различных подходов к прогнозированию потребности в кадрах представляется в таблице 1.

Выбор метода прогнозирования потребности в кадрах зависит от характера деятельности организации, её стратегии, доступных ресурсов и данных, а также от специфики рынка труда. Часто комбинирование нескольких методов может привести к более точным и обоснованным прогнозам.

Сочетание опроса нанимателей (метод экспертных оценок), анализа прогнозных показателей с построением трендов (метод Сано-Форарда) и создание различных сценариев будущего (метод сценариев) позволит расширить возможности анализа количественных и качественных характеристик списочной численности работников и ее прогнозной численности на предстоящее пятилетие, а также даст возможность расширить анализ проектов, планируемых к реализации субъектами хозяйствования, в процедурах закупок которых они участвуют.

В рамках углубленного опроса конкретных организаций появится возможность получить информацию не только о количестве инвестиционных проектов, но и их содержании в контексте обеспечения кадрами. Весьма ценной будет информация как о количестве новых (вводимых) рабочих мест, так и о количестве сокращаемых рабочих мест.

Кроме того, увеличение объема информации о будущих инвестиционных проектах позволит связать ее с прогнозной динамикой основных экономических показателей в обследуемых организациях. Результаты такого аналитического подхода послужат дополнительным подтверждением прогнозной динамики так называемой «потребности на создание».

Углубленное обследование конкретных организаций в рамках комбинированного опроса предоставит возможность анализа: возможного спроса на привлечение иностранных работников; подготовки рабочих кадров на производстве; повышения квалификации, переподготовки служащих; реализации в организациях практики наставничества.

Алгоритм прогнозирования потребности в трудовых ресурсах с использованием комбинированного подхода выглядит следующим образом.

1. Формирование входных параметров.

Определяем объемы подрядных работ на текущий и в прогнозном периодах, а также численность занятых в строительстве на текущий период.

Для количественных прогнозных расчетов объема подрядных работ учитываются как внутренние показатели страны, так и выполнении подрядных работ за рубежом и оказании услуг на экспорт.

Таблица 1 – Сравнительный анализ методов прогнозирования потребности в кадрах

Название метода, основоположник	Описание	Плюсы	Минусы	Тип
Экспертные оценки [Д. Гордон и О. Хелмер, США]	Сбор мнений экспертов по вопросу потребности в кадрах	Быстрое получение данных, учитываются мнения людей с реальным опытом	Субъективность и возможная предвзятость оценок	Качественные методы
Метод Дельфи [О. Хелмер, США]	Опрос группы экспертов с несколькими раундами анонимных отзывов для достижения консенсуса	Снижает влияние доминирующих мнений, позволяет учитывать разнообразные точки зрения	Длительный процесс, сложен в организации	
Фокус-группы [Р. Мертон, США]	Обсуждения с небольшими группами сотрудников или экспертов для выявления потребностей	Дает возможность глубже понять мнение группы	Может быть подвержен влиянию более активных участников	
Математическое моделирование [А. О. Курно, Франция]	Использование статистических моделей для прогнозирования на основе исторических данных	Высокая точность и возможность анализа различных сценариев	Требует больших объемов корректных данных, сложность в моделировании	Количественные методы
Регрессионный анализ [К. Гаусс, Германия и А. Лежандр, Франция]	Определение зависимости между переменными (например, между объемом подрядных работ и числом необходимых рабочих)	Может выявить взаимосвязи и тенденции	Не всегда учитываются структурные и экономические факторы	
Сано-Форарда (Trend Analysis) [Япония]	Анализ существующих трендов для прогнозирования будущих нужд	Простота и наглядность, возможность применения к разнообразным данным.	Потенциал для ошибок в случае изменений условий (например, экономический кризис)	
Метод сценариев [Герман Кан, США]	Создание различных сценариев будущего развития ситуации для определения потребностей	Учитывает неопределенность и разнообразие возможных исходов	Сложность в разработке и анализе сценариев	

Примечание – Источник: собственная разработка на основании [11, 12, 13, 14, 15]

Динамика объема подрядных работ и количество занятых в строительстве за период с 2012 по 2022 год представлены на рисунке 1.

За последнее десятилетие мы наблюдаем неустойчивую динамику изменения объема подрядных работ с высокой амплитудой

колебаний, в среднем за анализируемый период составляющей 13,5 % годовых, рассчитанного в белорусских рублях и 17,5 % годовых, пересчитанного в доллары США, что свидетельствует о высокой неустойчивости рынка.

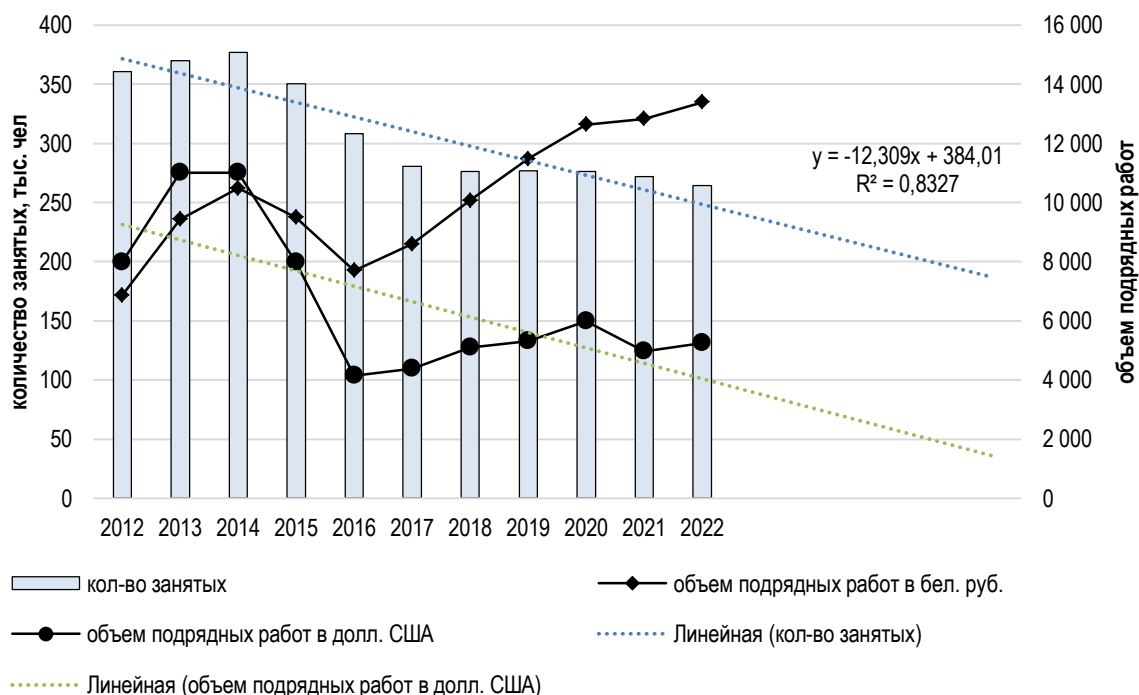


Рисунок 1 – Количество занятых (тыс. человек), объем подрядных работ (млн руб. и в млн долларов США) в строительстве Республики Беларусь

Примечание – Источник: собственная разработка на основании [16, 17, 18]

Изменение объемов подрядных работ оказывает непосредственное влияние на количество занятых в строительстве. Тенденция сокращения численности занятых в строительстве продолжается по 2022 г., несмотря на увеличение объемов подрядных работ как в белорусских рублях, так и в долларах США. Линия тренда показателя количества занятых показывает, что если такая тенденция сохранится, то к 2027 году в строительстве количество занятых будет менее 200 тысяч человек. Таким образом, анализ этих показателей свидетельствует о том, что рынок труда в строительстве в целом отражает тенденции изменения объемов подрядных работ, но гораздо более инертен по отношению к рынку и его динамике [19].

Производительность труда является характеристикой эффективности управления трудовыми ресурсами. Она также существенно зависит от количества выполняемых подрядных работ. Повышение объемов строительства зачастую связано с внедрением новых технологий и методов управления проектами, что позволяет увеличить эффективность работы и улучшить качество выполняемых задач. Показателем, используемым для оценки производительности труда, является показатель валовой добавленной стоимости.

Производительность труда рассчитывается по формуле

$$ПТ = \frac{ВДС}{ЧЛ}, \quad (1)$$

где ПТ – производительность труда, руб. на человека;

ВДС – валовая добавленная стоимость в текущих ценах, руб.;

ЧЛ – численность работников, занятых в строительстве, человек.

2. Определение численности трудовых ресурсов в прогнозном периоде:

$$ЧТР_t = \frac{ВДС_t}{ПТ_t \cdot Кпр}, \quad (2)$$

где ЧТР_t – численность трудовых ресурсов в t-м прогнозируемом году, человек;

ВДС_t – валовая добавленная стоимость в строительстве в t-м прогнозируемом году, руб.;

ПТ_t – производительность труда в строительстве в t-м прогнозируемом году, руб. на человека;

Кпр – коэффициент, учитывающий увеличение производительности труда.

Согласно утвержденной Указом Президента Республики Беларусь от 29 июля 2021 г. № 292 Программе социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы основные прогнозные показатели следующие (таблица 2).

Определение численности рекомендуется выполнять по трем сценариям: оптимистический, вероятностный и пессимистический.

3. Определение ежегодной дополнительной потребности в кадрах в строительстве.

Она представляет собой сумму потребности в кадрах «на создание» рабочих мест и потребности «на выбытие».

Потребность «на создание» – обеспечение кадрами новых рабочих мест в связи с реализацией инвестиционных проектов.

Потребность «на выбытие» связана с естественно-возрастным выбытием работников с предприятия за рассматриваемый период времени (пенсия, нетрудоспособность и т. д.).

Таким образом, дополнительная потребность рассчитывается по формуле

$$ДТР_t = L_t^B + L_t^C, \quad (3)$$

где ДТР_t – ежегодная дополнительная потребность в трудовых ресурсах в строительстве в t-м прогнозируемом году, человек;

L_t^B – потребность «на выбытие» в строительстве в t-м прогнозируемом году, человек;

L_t^C – потребность «на создание» в t-м прогнозируемом году, человек.

Потребность «на выбытие» в строительстве в t-м прогнозируемом году – это количество выбывающих работников, связанное с естественно-возрастными причинами.

Потребность «на выбытие» рассчитывается с помощью коэффициента естественного выбытия (КЕВ) для мезоуровня или с помощью коэффициента возрастного выбытия (КВВ) для микроуровня, человек:

$$L_t^B = L_{t-1} \cdot КЕВ (КВВ), \quad (4)$$

где L_{t-1} – численность трудовых ресурсов в строительстве в предыдущем периоде.

Коэффициент естественного выбытия оценивается на основе статистических данных. Он рассчитывается по формуле

$$КЕВ = \frac{\text{число смертей} - \text{число рождений}}{\text{средняя численность населения}} \cdot 1000. \quad (5)$$

Этот показатель показывает, сколько людей на 1000 населения умирает или рождается в результате естественных процессов (без учета миграции).

Коэффициент возрастного выбытия (КВВ) корректируется по результатам анкетного опроса работодателей.

Коэффициент возрастного выбытия (КВВ) рассчитывается по формуле

$$КВВ = \frac{\text{число смертей в возрастной группе}}{\text{средняя численность данной возрастной группы}} \cdot 1000. \quad (6)$$

Потребность «на создание» в t-м прогнозируемом году – это планируемое ежегодное изменение списочной численности в строительстве, которое необходимо прибавить к фактической численности работников L_t в t-м прогнозируемом году, чтобы достичь в следующем t+1 году желаемой численности работников L_{t+1} вследствие расширения имеющихся производств, реконструкции, модернизации, создания инвестиционных проектов и т. д.:

$$L_t^C = L_{t+1} - L_t. \quad (7)$$

4. Определение дополнительной потребности в кадрах по профессионально-квалификационным группам, которую предлагается рассчитывать по формуле:

$$\Delta D_{i,t}^I = S_{i,t}^{AD} \sum \Delta D_t, \quad (8)$$

где ΔD_{i,t}^I – дополнительная потребность в кадрах в i-м виде строительства в t-м году прогнозного периода, человек;

S_{i,t}^{AD} – матрица профессионально-квалификационной структуры потребности в кадрах в i-м виде строительства в t-м году прогнозного периода, где каждый коэффициент S_{i,t}^{AD} = $\frac{\Delta D_{i,t}^I}{\Delta D_t^I}$ – доля работников i-й

профессионально-квалификационной группы, которые необходимы дополнительно к имеющимся работникам в i-м виде строительства в t-м году прогнозного периода.

Формирование матриц профессионально-квалификационной структуры дополнительной потребности в кадрах происходит путем определения коэффициентов соответствия профессионально-квалификационных групп, при этом в каждой ячейке матрицы на пересечении строки i – профессионально-квалификационная группа и столбца l – вид строительства присваивается вес (доля до 1 или до 100 в процентах).

t ∈ [t₀, t_f] – прогнозный период, где t₀ – текущий год (оценка); t_f определяет прогнозный период от первого прогнозного года до пятого, f = (1, 5);

i = 1, 18; l = 1, 5 – вид строительства в соответствии с постановлением Минстройархитектуры от 30.06.2022 г. № 66 «Об утверждении инструкции о порядке определения вида строительной деятельности и наименования объекта строительства».

Таблица 2 – Основные прогнозные показатели социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы (процентов)

Наименование показателей	2021 г. к 2020 г.	2022 г. к 2021 г.	2023 г. к 2022 г.	2024 г. к 2023 г.	2025 г. к 2024 г.
ВВП	101,8	102,9	103,8	105,4	106,0
Темп роста производительности труда по ВВП	101,9	103,0	104,2	105,6	106,1

Примечание – Источник: собственная разработка на основании [20]

Для определения дополнительной потребности в кадрах по профессиям необходимо использовать результаты опроса нанимателей о наиболее востребованных профессиях. При обработке анкет формируется общий перечень уникальных востребованных профессий/специальностей на всех предприятиях строительного комплекса.

Заключение

Таким образом, на основе прогноза потребности в кадрах с распределением по профессионально-квалификационным группам формируется прогноз по выпуску специалистов различного уровня образования. Сравнивая количество выпущенных специалистов с потребностями рынка труда, можно судить об равновесии на рынке труда в строительстве (по каким специальностям существует избыток предложения, по каким – недостаток) и своевременно корректировать цифры приема в учебные заведения согласно потребностям строительного комплекса.

Комбинированный метод прогнозирования потребности в кадрах в строительном комплексе Республики Беларусь предполагает интеграцию различных методов и подходов для более точной оценки количественных и качественных характеристик трудовых ресурсов, необходимых для реализации инвестиционных проектов. Предложенный алгоритм прогнозирования потребности в кадрах, который включает несколько этапов, поможет повысить качество и точность прогнозов. Это позволит более эффективно планировать кадровые ресурсы и создавать соответствующие образовательные программы для подготовки нужных специалистов.

Список цитированных источников

1. Карабаева, Г. Вопросы регулирования потребности рынка труда в образованных кадрах / Г. Карабаева // *Iqtisodiyot va ta'lim*. – 2022. – № 4. – С. 143–149.
2. Леонович, С. Н. Кадры для строительной отрасли: образовательный аспект / С. Н. Леонович, В. М. Трепачко, С. В. Харитончик // *Архитектурно-строительный комплекс : проблемы, перспективы, инновации : электронный сборник статей II Международной научной конференции, Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. Л. М. Парфеновой. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – С. 546–559.*
3. Дудырев, Ф. Ф. Международный опыт прогнозирования потребностей экономики в компетенциях и квалификациях / Ф. Ф. Дудырев, О. А. Романова // *Эффективные методы прогнозирования кадровых потребностей рынка труда для формирования регионального заказа на подготовку кадров: сб. докл. / предисл. А. Н. Лейбовича. – М. : Федеральный институт развития образования, 2016. – С. 7–11.*
4. Кузнецов, С. Г. Методология прогнозирования эффективной структуры занятости в условиях инновационного сценария макроэкономического развития / С. Г. Кузнецов, И. И. Мухина // *Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. – 2008. – № 6. – С. 806–831.*
5. Колесникова, О. А. Проблемы трудовых ресурсов: дефицит, сдвиги в структуре, парадоксы старения / О. А. Колесникова, Е. В. Маслова, И. В. Окопных // *Социально-трудовые исследования. – 2022. – № 2 (47). – С. 42–55.*
6. Головачев, А. С. Развитие методов прогнозирования потребности экономики в специалистах и планирования их подготовки / А. С. Головачев, Н. В. Юрова // *Научно-практический журнал «Новости науки и технологий». – 2019. – № 2 (49). – С. 53–63.*
7. Сидунова, Г. И. Инновационная стратегия формирования кадровой политики социально-экономических систем : автореф. дис. ... д-ра экон. наук : 08.00.05 / Г. И. Сидунова ; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград, 2004. – 44 с.
8. Алашеев, С. Ю. Методика среднесрочного прогнозирования кадровых потребностей экономики региона / С. Ю. Алашеев, Т. Г. Кутемина, Н. Ю. Посталюк // *Федер. ин-т развития образования, Приволж. фил. – Самара : ЦПО, 2014. – 84 с.*
9. Седнина, М. А. Мировой опыт организации и методы прогнозирования потребности в кадрах для инновационной экономики / М. А. Седнина // *Философско-гуманитарные науки : сб. науч. ст. / РИВШ. – Минск, 2023. – С. 360–368.*
10. Алашеев, С. Ю. Всё ли решают кадры: методики прогнозирования кадровых потребностей экономики / С. Ю. Алашеев, Н. Ю. Посталюк // *Образовательная политика. – 2010. – № 7–8 (45–46). – С. 121–124.*
11. Гуртов, В. А. Прогнозирование потребностей экономики в квалифицированных кадрах: обзор подходов и практик применения / В. А. Гуртов, Е. А. Питухин // *Университетское управление: практика и анализ. – 2017. – № 4 (110). – С. 130–161.*
12. Русина, А. Н. Моделирование сценарных условий прогнозирования кадровой потребности экономики региона / А. Н. Русина, О. В. Карпычева // *Экономика труда. – 2017. – Том 4, № 4. – С. 309–322.*
13. Антонова, Г. В. Зарубежный опыт прогнозирования потребностей экономики в квалифицированных кадрах / Г. В. Антонова, С. Е. Пашкова, И. Б. Омельченко // *Экономика труда. – 2023. – Том 10, № 8. – С. 1199–1218.*
14. Льюис, К. Д. Методы прогнозирования экономических показателей. / К. Д. Льюис, пер. с англ. и предисл. Е. З. Демиденко. – М. : Финансы и статистика, 1986. – 133 с.
15. Горохова, И. В. Актуальные вопросы применения зарубежного опыта прогнозирования потребности экономики в квалифицированных кадрах в практике государственного управления в Российской Федерации / И. В. Горохова, Е. Ф. Никитская, Н. Ю. Сорокина // *Вестник ГУУ. – 2018. – № 6. – С. 21–27.*
16. Беларусь в цифрах: статистический справочник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2016. – 72 с.
17. Беларусь в цифрах: статистический справочник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2020. – 72 с.
18. Беларусь в цифрах: статистический справочник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2023. – 61 с.
19. Голубова, О. С. Анализ кадрового потенциала строительного комплекса Республики Беларусь / О. С. Голубова, Ю. А. Баканова // *Новая экономика. – 2024. – № 1 (83). – С. 188–199.*
20. Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы : Указ Президента Респ. Беларусь, 29 июля 2021 г., № 292 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P32100292> (дата обращения: 12.11.2024).

References

1. Karabaeva, G. Voprosy regulirovaniya potrebnosti rynka truda v obrazovannykh kadrah / G. Karabaeva // *Iqtisodiyot va ta'lim*. – 2022. – № 4. – S. 143–149.
2. Leonovich, S. N. Kadry dlya stroitel'noy otrasli: obrazovatel'nyy aspekt / S. N. Leonovich, V. M. Trepachko, S. V. Haritonchik // *Arhitekturo-stroitel'nyy kompleks : problemy, perspektivy, innovatsii : elektronnyy sbornik statej II Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Novopolock, 28–29 noyab. 2019 g. / Polockiy gosudarstvennyy universitet ; pod red. L. M. Parfenovoj. – Novopolock : Poloc. gos. un-t, 2020. – S. 546–559.*
3. Dudyrev, F. F. Mezhdunarodnyy opyt prognozirovaniya potrebnostej ekonomiki v kompetentsiyah i kvalifikatsiyah / F. F. Dudyrev, O. A. Romanova // *Effektivnye metody prognozirovaniya kadrovyyh potrebnostej rynka truda dlya formirovaniya regional'nogo zakaza na podgotovku kadrov: sb. dokl. / predisl. A. N. Lejbovicha. – M. : Federal'nyy institut razvitiya obrazovaniya, 2016. – S. 7–11.*
4. Kuznecov, S. G. Metodologiya prognozirovaniya effektivnoy struktury zanyatosti v usloviyah innovatsionnogo scenariya makroekonomicheskogo razvitiya / S. G. Kuznecov, I. I. Muxina // *Nauchnye trudy: Institut narodnohozyajstvennogo prognozirovaniya RAN. – 2008. – № 6. – S. 806–831.*

5. Kolesnikova, O. A. Problemy trudovyh resursov: deficit, sdvigi v strukture, paradoksy stareniya / O. A. Kolesnikova, E. V. Maslova, I. V. Okolelyh // *Social'no-trudovye issledovaniya*. – 2022. – № 2 (47). – S. 42–55.
6. Golovachev, A. S. Razvitie metodov prognozirovaniya potrebnosti ekonomiki v specialistah i planirovaniya ih podgotovki / A. S. Golovachev, N. V. YUrova // *Nauchno-prakticheskij zhurnal «Novosti nauki i tekhnologii»*. – 2019. – № 2 (49). – S. 53–63.
7. Sidunova, G. I. Innovacionnaya strategiya formirovaniya kadrovoj politiki social'no-ekonomicheskikh sistem : avtoref. dis. ... d-ra ekon. nauk : 08.00.05 / G. I. Sidunova ; Volgogradskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. – Volgograd, 2004. – 44 s.
8. Alasheev, S. YU. Metodika srednesrochnogo prognozirovaniya kadrovyyh potrebnostej ekonomiki regiona / S. YU. Alasheev, T. G. Kutejnicina, N. YU. Postalyuk // *Feder. in-t razvitiya obrazovaniya, Privolzh. fil.* – Samara : CPO, 2014. – 84 s.
9. Sednina, M. A. Mirovoj opyt organizacii i metody prognozirovaniya potrebnosti v kadrah dlya innovacionnoj ekonomiki / M. A. Sednina // *Filosofsko-gumanitarnye nauki : sb. nauch. st. / RIVSH.* – Minsk, 2023. – S. 360–368.
10. Alasheev, S. YU. Vsy li reshayut kadry: metodiki prognozirovaniya kadrovyyh potrebnostej ekonomiki / S. YU. Alasheev, N. YU. Postalyuk // *Obrazovatel'naya politika*. – 2010. – № 7–8 (45–46). – S. 121–124.
11. Gurtov, V. A. Prognozirovaniye potrebnostej ekonomiki v kvalificirovannyh kadrah: obzor podhodov i praktik primeneniya / V. A. Gurtov, E. A. Pituhin // *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz*. – 2017. – № 4 (110). – S. 130–161.
12. Rusina, A. N. Modelirovaniye scenaryh uslovij prognozirovaniya kadrovoj potrebnosti ekonomiki regiona / A. N. Rusina, O. V. Karpycheva // *Ekonomika truda*. – 2017. – Tom 4, № 4. – S. 309–322.
13. Antonova, G. V. Zarubezhnyj opyt prognozirovaniya potrebnostej ekonomiki v kvalificirovannyh kadrah / G. V. Antonova, S. E. Pashkova, I. B. Omel'chenko // *Ekonomika truda*. – 2023. – Tom 10, № 8. – S. 1199–1218.
14. L'yuis, K. D. Metody prognozirovaniya ekonomicheskikh pokazatelej. / K. D. L'yuis, per. s angl. i predisl. E. Z. Demidenko. – M. : Finansy i statistika, 1986. – 133 c.
15. Gorohova, I. V. Aktual'nye voprosy primeneniya zarubezhnogo opyta prognozirovaniya potrebnosti ekonomiki v kvalificirovannyh kadrah v praktike gosudarstvennogo upravleniya v Rossijskoj Federacii / I. V. Gorohova, E. F. Nikitskaya, N. YU. Sorokina // *Vestnik GUU*. – 2018. – № 6. – S. 21–27.
16. Belarus' v cifrah: statisticheskij spravochnik / Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – Minsk, 2016. – 72 s.
17. Belarus' v cifrah: statisticheskij spravochnik / Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – Minsk, 2020. – 72 s.
18. Belarus' v cifrah: statisticheskij spravochnik / Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – Minsk, 2023. – 61 s.
19. Golubova, O. S. Analiz kadrovogo potentsiala stroitel'nogo kompleksa Respubliki Belarus' / O. S. Golubova, YU. A. Bakanova // *Novaya ekonomika*. – 2024. – № 1 (83). – S. 188–199.
20. Programma social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na 2021–2025 gody : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus', 29 iyulya 2021 g., № 292 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P32100292> (data obrashcheniya: 12.11.2024).

Материал поступил 18.11.2024, одобрен 24.12.2024,
принят к публикации 24.12.2024

УДК 338.486

МЕДИЦИНСКИЙ ТУРИЗМ И ФАКТОРЫ ЕГО РАЗВИТИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**С. А. Бунько¹, Е. А. Никонова²**¹ К. э. н., доцент, заместитель декана экономического факультета УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: swetlanabunko@mail.ru² Студент 3 курса специальности «Электронный маркетинг» УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: em000507@g.bstu.by**Реферат**

В статье проведен критический анализ подходов к определению медицинского туризма, в результате которого сделан вывод о целесообразности разграничения медицинского, лечебно-оздоровительного и оздоровительного туризма. Выполнен анализ динамики мирового рынка медицинских услуг, с учетом прогнозов его развития до 2029 года, на основе которого дана оценка привлекательности данного рынка в связи с его быстрым ростом, и отставании Республики Беларусь от общемировых трендов. В целях поиска драйверов роста доли Беларуси в обслуживании мирового спроса на медицинские услуги в статье исследован опыт стран, демонстрирующих наибольший рост экспорта медицинских услуг в последние годы. Выявлены факторы, которые способствовали повышению привлекательности этих стран как объектов медицинского туризма, такие как высокий уровень качества медицинских услуг в отдельных направлениях; конкурентоспособные цены; возможность совмещения лечения с отдыхом и развлечениями. Определено, что одним из важнейших драйверов является активное продвижение национальных клиник на зарубежных рынках, в том числе при участии государственных органов управления. Это, в свою очередь, предопределило необходимость анализа продвижения услуг белорусской медицины в сети Интернет, который показал его недостаточность, а также такие черты, как использование в продвижении медицинского туризма внутренних посредников и ограниченное предложение услуг, связанных с проведением досуга. На основе проведенных исследований даны рекомендации по развитию медицинского туризма в Республике Беларусь, прежде всего посредством формирования единой маркетинговой стратегии для продвижения медицинского туризма при непосредственном государственном участии.

Ключевые слова: медицинский туризм, маркетинг здравоохранения, экспорт медицинских услуг.**MEDICAL TOURISM AND FACTORS OF ITS DEVELOPMENT IN THE REPUBLIC OF BELARUS****S. A. Bunko, E. A. Nikonova****Abstract**

The article provides a critical analysis of approaches to the definition of medical tourism, as a result of which it is concluded that it is expedient to distinguish between medical, health-improving and health-improving tourism. An analysis of the dynamics of the global market of medical services is carried out, taking into account the forecasts of its development until 2029, on the basis of which an assessment of the attractiveness of this market is given due to its rapid growth and the lag of the Republic of Belarus from global trends. In order to search for drivers of growth in the share of Belarus in serving the global demand for medical services, the article examines the experience of countries that have shown the largest growth in the export of medical services in recent years. The factors that contributed to increasing the attractiveness of these countries as medical tourism destinations are identified, such as the high level of quality of medical services in certain areas; competitive prices; the possibility of combining treatment with rest and entertainment. It was determined that one of the most important drivers is the active promotion of national clinics in foreign markets, including with the participation of state authorities. This, in turn, predetermined the need to analyze the promotion of Belarusian medicine services on the Internet, which showed its insufficiency, as well as such features as the use of domestic intermediaries in the promotion of medical tourism and a limited offer of services related to leisure. On the basis of the research, recommendations are given for the development of medical tourism in the Republic of Belarus, primarily through the formation of a unified marketing strategy for the promotion of medical tourism with direct state participation.

Keywords: medical tourism, healthcare marketing, export of medical services.**Введение**

Туризм в сфере здравоохранения способствует не только росту экспорта услуг, но также развитию системы здравоохранения страны, повышению ее конкурентоспособности. Как следствие, развитию этого вида туризма во многих странах уделяется значительное внимание, что нашло отражение в Государственной программе Республики Беларусь «Здоровье народа и демографическая безопасность» на 2021–2025 гг. В этом документе отмечен рост экспорта медицинских услуг и поставлена задача увеличить за 5 лет экспорт услуг в сфере здравоохранения на 44,7 % по отношению к 2020 году на основе реализации мероприятий современного маркетинга, ценовой политики и подходов к популяризации медицинского туризма. Пандемия COVID-19 и современная геополитическая ситуация внесли коррективы в страновую направленность входящих потоков иностранных пациентов в Беларусь, что актуализует решение управленческих проблем, сдерживающих реализацию стратегических задач, заложенных в вышеупомянутом документе и требует адаптации под новые зарубежные направления.

Исследованию различных аспектов медицинского туризма посвящены работы зарубежных исследователей D. Béland и A. Zarzec-

zny [1], R. Johnston, V. A. Crooks и M. Ormond [2], С. А. Ефимова и А. С. Ефимовой [3], В. Д. Иванова и О. В. Марандыкиной [4], Н. А. Савельевой и Р. В. Колесниковой [5], А. С. Соколова [6], а также белорусских исследователей А. А. Гаврилика и С. Л. Бойко [7], Д. В. Калистратова [8], В. А. Максименюка [9], Е. А. Милашевич [10].

Несмотря на то, что количество научных публикаций по рассматриваемой тематике растет, отметим наличие методических проблем, таких как определение места «медицинского туризма» в классификации туризма в целом и его сущностной трактовки. В связи с этим считаем необходимым исследовать сущность медицинского туризма как экономической категории, а также выполнить анализ мировых трендов развития рынка въездного медицинского туризма, маркетинговых стратегий привлечения иностранных пациентов и роли государства в этих процессах.

Критический анализ подходов к определению категории «медицинский туризм»

Для определения категории «медицинский туризм» нами выполнен критический анализ научных публикаций по данной тематике. Проведенные исследования показали, что в экономической литера-

туре выделяют два вида туризма, связанных с целями, направленными на улучшение здоровья и лечения заболеваний: оздоровительный и медицинский туризм. Нередко два этих вида объединяют в общую категорию «лечебно-оздоровительный».

Так, С. А. Ефимов и А. С. Ефимова считают, что «лечебно-оздоровительный туризм – сочетанная форма туризма, в структуру туристического продукта которого входят как элементы медицинского (лечебного) туризма, так и элементы оздоровительного» [1].

Согласно определению, данному Всемирной туристской организацией, лечебно-оздоровительный туризм включает в себя разнообразные услуги, начиная от посещения спа-центров, заканчивая посещением центров, где проводятся хирургические операции. Нам представляется целесообразным разделение этих видов туризма, мы более склонны согласиться с исследователями, которые разделяют лечебно-оздоровительный туризм (healthtourism) и медицинский туризм (medicaltourism). При этом под медицинским туризмом понимается оказание медицинских услуг зарубежным пациентам с

заболеваниями разной степени тяжести, которые нуждаются в оперативном клиническом вмешательстве.

Кроме того, считаем необходимым выделить еще одного вида туризма, связанного со здоровьем, – оздоровительного, основанного на wellness-концепции, согласно которой здоровье человека зависит от его самочувствия, гармонии тела и разума, физического и психоэмоционального состояния. При такой оздоровительной поездке туристы получают процедуры, главное отличие которых заключается в цели получения услуг: сохранение и укрепление здоровья, профилактика развития заболеваний, а не лечение уже имеющихся патологий [6].

Чтобы более четко разграничить выделенные нами виды туризма в сфере здравоохранения, сведем полученные в ходе исследования данные в таблицу 1.

Таким образом, под медицинским туризмом мы будем понимать случаи, когда люди путешествуют с целью лечения имеющейся патологии (заболевания) или для проведения других медицинских мероприятий.

Таблица 1 – Сравнительный анализ видов туризма, связанных со здоровьем человека

Вид туризма	Цель	Процедуры
Лечебно-оздоровительный	сохранение и укрепление физического здоровья	– лечебные, – лечебно-реабилитационные; – оздоровительные
Оздоровительный	– сохранение здоровья; – профилактика заболеваний; – процедуры, которые помимо медицинских результатов приносят приятные ощущения	– комплексы физических упражнений; – здоровое питание; – фитотерапия; – SPA-процедуры; – медитации; – водные процедуры
Медицинский	лечение заболеваний	– медицинские, оперативные вмешательства в организм человека

Примечание – Источник: собственная разработка на основе [3–6, 8].

Мировой рынок медицинского туризма и развитие медицинского туризма в Беларуси

В Беларуси, как упоминалось выше, придается особое значение развитию медицинского туризма. К настоящему времени официальные статистические данные по объему экспорта и импорта услуг в сфере здравоохранения Республики Беларусь опубликованы лишь по 2021 год включительно (рисунок 2), что затрудняет оценку динамики показателей с учетом изменившейся в последние годы геополитической обстановки.

Вместе с тем имеющиеся данные позволяют сделать следующие выводы: во-первых, экспорт услуг в сфере здравоохранения значительно превышает импорт; во-вторых, после обвала рынка в год пандемии начался быстрый восстановительный рост; в-третьих, объем

экспорта медицинских услуг значительно отстает от стран, лидирующих в данной сфере. По данным аналитической компании Mordorintelligence, в 2024 году объем мирового рынка медицинских услуг составил 84,92 млрд долларов США. Основываясь на этих данных, можно утверждать, что доля Республики Беларусь на этом рынке составляет менее 0,05 %. На наш взгляд, потенциал белорусской медицины гораздо выше, кроме того прогнозируемая динамика актуализует развитие данной отрасли в Беларуси. Данный рынок оценивается компанией Mordorintelligence как быстрорастущий, с темпом роста в 23,03 % в год в следующем пятилетнем периоде (рисунок 2). Как следствие, прогнозируется увеличение мирового рынка медицинских услуг к 2029 году до 239,37 млрд долларов США.

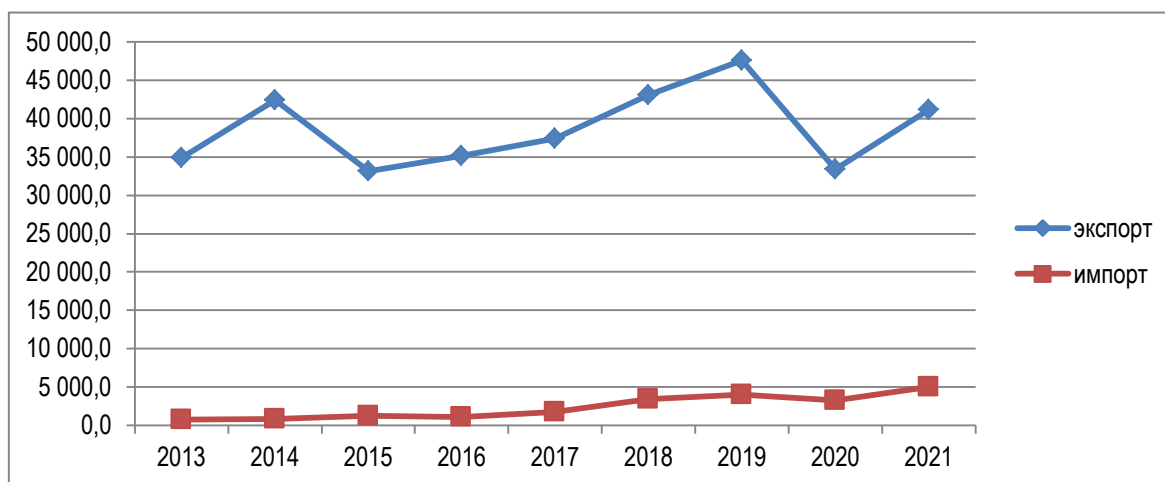


Рисунок 1 – Динамика экспорта и импорта услуг в сфере здравоохранения Республики Беларусь, тыс. долл. США

Примечание – Источник: составлено автором на основе [11].

Medical Tourism Market

Market Size in USD Billion

CAGR 23.03%



Рисунок 2 – Объем и прогнозируемая динамика мирового рынка медицинского туризма, долл. США [12]

Такой прогноз роста мирового рынка является, по нашему мнению, чрезмерно оптимистическим, вместе с тем следует признать, что для такой оценки существует целый ряд объективных причин:

- высокие темпы коммерциализации здравоохранения, что приводит к поиску лучших вариантов лечения (при замещении бесплатной медицины коммерческой);
- рост реальных доходов населения и, как следствие, требований к качеству жизни, в том числе изменение отношения людей к своему здоровью;
- значительное расширение ассортимента услуг коммерческого характера (пластическая хирургия, косметическая стоматология, искусственное оплодотворение, психотерапия и другие) с одновременным усилением дифференциации качества оказываемых медицинских услуг;

Таблица 2 – Анализ мирового опыта развития медицинского туризма

Страна	Факторы развития туризма	Стратегия продвижения
Таиланд	– высокий уровень развития туризма; – умеренные цены; – высокое качество услуг; – наличие аккредитации JCI у 37 клиник страны; – наличие эксклюзивных услуг	– сопровождение медицинских услуг сервисными; – венчурное партнерство с поставщиками медицинских услуг из-за рубежа
Южная Корея	– высокий уровень развития здравоохранения; высокотехнологичное оборудование – эффект Hallyu (мода на все корейское); – частные и государственные инвестиции; – специалисты с международной репутацией; – комплексность услуг	– продвижение бренда MedicalKorea; – облегчение визового режима организация лечения через туристические фирмы
Испания	– государственная поддержка медицинской отрасли; – низкие цены и высокое качество медицинских услуг; – наличие международных отделов в клиниках страны	– стратегия продвижения оздоровительного туризма на основе уникальных климатических условий
Япония	– передовые технологии медицинское оборудование; – имидж системы здравоохранения с учетом одного из самых высоких уровней продолжительности жизни населения на планете	– активное участие государства в продвижении (программа «Visit Japan Medical»), укреплении международного сотрудничества и упрощения въезда для иностранных пациентов

Примечание – Источник: собственная разработка на основе [1–2, 13–17].

Так, Министерство здравоохранения и Управление по туризму Таиланда в качестве приоритетных задач по развитию медицинского и оздоровительного туризма в стране, наряду с развитием материальной базы медицинских центров, внедрением новых технологий, качеством медицинских услуг и подготовкой кадров, ставит разра-

- рост заболеваемости населения из-за ухудшения экологии, повышенного фона радиации, роста стрессогенных факторов;
- рост продолжительности жизни населения.

Кроме того, востребованность лечения за рубежом может быть вызвана такими причинами:

- долгий период ожидания определенных видов медицинских услуг (ввиду высокой загруженности клиник в стране проживания, что особенно актуально для хирургии);
- отсутствие возможности пройти необходимое лечение / медицинские процедуры ввиду их запрета в стране проживания (по религиозным, этическим либо другим причинам);
- необходимость сохранения анонимности прохождения лечения / медицинской процедуры.

Анализ мировых практик формирования национальных систем медицинского туризма

Поскольку приток иностранных туристов в страну с целью лечения в значительной степени будет зависеть не только от уровня развития здравоохранения и предлагаемых в стране медицинских услуг, но также от уровня их продвижения и обеспечения логистики, считаем необходимым рассмотреть модели развития медицинского туризма с участием основных категорий посредников:

- медицинский туризм без посредников, предусматривающий прямой контакт пациента с иностранной больницей;
- медицинский туризм, организованный внутренними или иностранными посредниками (туристскими агентствами, которые специализируются на поиске клиник и могут сформировать медицинский турпакет по организации не только лечения, но также транспортировки и размещения на период оказания медицинских услуг);
- медицинский туризм как часть государственной политики в сфере здравоохранения, при этом иностранные поставщики медицинских услуг становятся уполномоченными поставщиками медицинских услуг государственных или частных компаний в стране;
- медицинский туризм, основанный на партнерстве внутренних поставщиков медицинских услуг с зарубежными.

В целях выявления эффективных стратегий по развитию медицинского туризма рассмотрим опыт стран, добившихся весомых результатов в данной сфере в последние годы (таблица 2).

ботку эффективной маркетинговой стратегии. Медицинские услуги входят в комплекс сервисных услуг в сочетании с широким спектром услуг культурного и развлекательного характера на основе природно-климатических преимуществ географического расположения Таиланда, яркости городской жизни, экзотической кухни и богатой куль-

туры. Одним из значимых мероприятий в сфере продвижения тайского медицинского туризма можно назвать мероприятие Health&WealthExpo, которое проводится ежегодно и направлено на демонстрацию преимуществ Таиланда в области медицинского туризма и укреплению позиций страны в этой отрасли. Так, в 2023 году в рамках данного мероприятия была представлена панельная дискуссия «Стратегический план Таиланда как медицинского центра»; экспозиция, секции которой были посвящены траволечению, актуальным тенденциям в здравоохранении на 2024 год, комплексные дискуссии на тему рака молочной железы. Активное участие в данном мероприятии приняли официальные представители системы здравоохранения Таиланда, что является немаловажным в продвижении медицинского туризма за рубежом.

Подводя итог анализа стратегии продвижения медицинского туризма в Таиланде, можно отметить, что интеграция медицинского туризма с традиционными видами туризма позволяет пациентам совмещать лечение, оздоровление с досугом, способствуя усилению лечебного эффекта благодаря положительным эмоциям.

Значительный рост демонстрирует рынок медицинского туризма в Южной Корее, на рисунке 3 представлена его динамика с 2009 по 2022 год. Базовый период выбран не случайно, именно с 2009 года страна начала развивать медицинский туризм, в первую очередь, принятием Закона о медицинском обслуживании, позволившем медицинским учреждениям официально предоставлять услуги иностранным пациентам. В последующие годы Южной Кореей предпринимались усилия по развитию законодательства, целью которых было развитие данной отрасли.

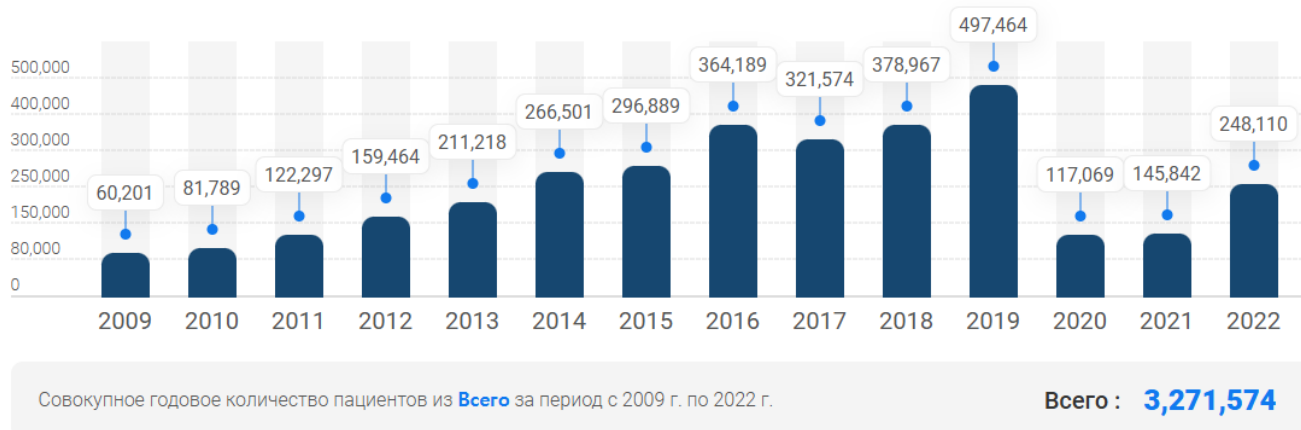


Рисунок 3 – Динамика рынка медицинского туризма в Южной Корее [16]

В допандемийный период, как видно из рисунка, рынок экспорта медицинских услуг Южной Кореи демонстрировал устойчивую тенденцию к росту и с 2021 году наметился восстановительный рост. В Южной Корее заметно внимание, уделяемое со стороны правительства развитию медицинского туризма. В 2013 году правительство этой страны первым в мире ввело международную систему координаторов медицинских туров, чтобы иностранные пациенты могли с комфортом посещать Корею для получения медицинских услуг, и внедрило систему стимулирования профессиональных инструкторов образовательных программ для получения ими лицензии координатора медицинских туров на основе системы сертификации координаторов международного медицинского туризма, утвержденной правительством. Также правительство поощряет существование корейских программ аккредитации больниц, обслуживающих иностранных пациентов, такие как KAHF (система оценки и сертификации медицинских учреждений по привлечению иностранных пациентов). Благодаря этой системе строго оценивается качество медицинских услуг: лечение, инфекционный контроль и предотвращение медицинских споров.

Среди векторов стратегии продвижения, на наш взгляд, основными являются такие, как облегчение визового режима (в том числе возможность получения визы онлайн); повышение осведомленности о корейской медицинской помощи путем продвижения бренда MedicalKorea, который позиционируется как национальный бренд, основой которого являются качественное обслуживание клиентов в сфере здравоохранения, глубокие медицинские знания и высокий профессионализм, присущие Кореи. Вместе с тем следует признать, что для Южной Кореи существуют объективные предпосылки динамичного развития медицинского туризма, а именно нахождение в непосредственной близости от густонаселенных азиатских регионов.

Еще одной страной, опыту развития медицинского туризма которой следует уделить внимание, является Испания. Благодаря выгодному географическому положению Испании медицинская отрасль этой страны предоставляет возможность совмещать отдых с медицинскими обследованиями (чекапами), что подчеркивается при продвижении

медицинского туризма. Испания входит в тройку самых популярных туристических направлений и занимает седьмую позицию в рейтинге мировых систем здравоохранения. Одним из конкурентных преимуществ является то, что средняя стоимость чекап-программ испанских клиник на 50 % ниже, чем в аналогичных по уровню обслуживания клиниках США. Кроме того, чекап-программы включают не только проводимые в краткий срок индивидуально подобранные обследования, но и программы проживания и питания, а по желанию клиента клиники также трансфер аэропорт/клиника, услуги переводчика и другие сопутствующие услуги. То есть акцент делается на обеспечение полного комфорта, освобождение от всех хлопот, связанных с переездом, проживанием, питанием, языковым барьером, что усиливает положительные эмоции, создавая подлинные ощущения отдыха.

Одним из государств, занимающих доминирующее положение на рынке медицинского туризма в Азиатско-Тихоокеанском регионе, является Япония. Отметим, что для данной страны также характерно активное участие государства в продвижении медицинского туризма. Эти усилия подчеркивают приверженность Японии предоставлению высококачественных медицинских услуг, а также развитию партнерских отношений и инноваций в области медицины.

Таким образом, по результатам анализа опыта успешных в сфере медицинского туризма стран можно сделать выводы, что эти страны демонстрируют высокий уровень качества медицинских услуг в отдельных направлениях, конкурентоспособные цены, возможность совмещения лечения с отдыхом и развлечениями. Особо выделим такую характеристику, как преобладание прямого маркетинга и маркетинга как части государственной политики продвижения медицинских услуг.

Анализ продвижения медицинского туризма в Беларуси

Маркетинговая стратегия развития медицинского туризма Республики Беларусь базируется на высокой квалификации врачей, хорошем оснащении медицинских центров, а также умеренных ценах на медицинские услуги. Наиболее востребованными иностранными пациентами медицинскими услугами являются кардиохирур-

гия, пластическая хирургия, репродуктивные технологии, трансплантология и косметическая стоматология.

Несмотря на предпринимаемые шаги по развитию медицинского туризма в Беларуси, считаем, что эта сфера развивается низкими темпами и одной из причин является отсутствие опыта продвижения за рубежом. С целью выявления недостатков и преимуществ продвижения медицинского туризма в Беларуси нами рассмотрены сайты наиболее популярных в поиске медицинских операторов.

Отметим сайт компании Триостайл (<https://triostylemed.com/>), который информативен, понятен, содержит опцию расчета стоимости, а также отзывы реальных пациентов, датированные 2024 годом (в то время как большинство белорусских сайтов по запросу медицинского туризма содержат отзывы 2015–2018 гг.).

Одним из операторов медицинских услуг в Беларуси, который откликается на поиск при запросе «Лечение в Беларуси», является сайт Medtravelbelarus (<https://medtravelbelarus.com/>). Таким образом, можно констатировать, что у сайта хорошее продвижение, однако отметим устаревший дизайн, отзывы клиентов, датированные не позднее 2014 г., неудобный интерфейс, низкая информативность.

На наш взгляд, одним из наиболее удачных с маркетинговой точки зрения и удобных для пользователей сайтов является сайт «Доктор Анна» (<https://www.doctoranna.by/>). Демонстрация конкурентных преимуществ Беларуси как зеленой страны с хорошей экологией сочетается с персонализацией сайта. Клиенты обращаются к конкретному человеку, что создает в самом начале контакта ощущение индивидуального подхода и персональную ответственность конкретного человека за организацию предоставления услуги. Кроме того, данный оператор предлагает потенциальным клиентам дополнительные услуги, в том числе экскурсионные, представленные в удобной для восприятия форме.

Таким образом, продвижение медицинских услуг белорусских клиник учреждений не носит системного характера, не имеет общей стратегии, что негативно сказывается на привлекательности Беларуси как объекта медицинского туризма. Кроме того, для Беларуси более характерно использование в продвижении медицинского туризма внутренних посредников и ограниченное предложение услуг, связанных с проведением досуга. Еще одним серьезным упущением, на наш взгляд, является отсутствие продвижения конкретных специалистов. Персонализация врачей в социальных сетях чрезвычайно важна, чтобы «...медицинское учреждение было с «человеческим лицом», а не просто обезличенная организация» [18]. Пациенты хотят видеть тех, к кому они пойдут потом лечиться. Однако в медицинских учреждениях Беларуси также не наблюдается тенденции выделения специалистов, в функциональные обязанности которых входила бы поддержка продвижения личных брендов врачей, имидж и репутация абсолютного большинства медицинских учреждений формируется стихийно, хотя сам рынок медицинских услуг испытывает явную нехватку специалистов в данной области [19, 20]. Следует учитывать, что применение информационно-коммуникационных технологий, повлекшее информационное восприятие современного общества, требует институциональных изменений [21], в связи с чем необходимо создавать государственные институты поддержки продвижения медицинских услуг белорусских клиник за рубежом на основе информационно-коммуникационных технологий.

Заключение

Проведенные исследования показали недостаточную разработанность как терминологии медицинского туризма, так и вопросов методического обеспечения управления развитием данной сферы. Это предопределило решение задач по уточнению классификации видов медицинского туризма, обосновано введение наряду с медицинским и лечебно-оздоровительным туризмом, понятия «оздоровительного туризма», целями которого является не лечение, а сохранение здоровья, профилактика заболеваний, а также прохождение процедур, которые помимо медицинских результатов приносят приятные ощущения.

Оценка перспектив развития рассматриваемого рынка позволила обосновать необходимость усиления внимания к реализации поставленных в Государственной программе Республики Беларусь «Здоровье народа и демографическая безопасность» на 2021–2025 гг. целей по наращиванию экспорта медицинских услуг.

Для разработки путей наращивания объема экспорта медицинских услуг в статье проведен анализ успешного опыта по развитию медицинского туризма зарубежных стран, на основе которого предложены следующие рекомендации по развитию медицинского туризма в Республике Беларусь:

- формирование единой маркетинговой стратегии для продвижения медицинского туризма при непосредственном государственном участии и поддержке;
- развитие туристических программ, объединяющих в себе медицинский и традиционные виды туризма, в том числе, экотуризма;
- разработка методического сопровождения продвижения экспорта медицинских услуг;
- содействие государства в организации работы белорусских клиник с иностранными посредниками, специализирующимися на организации медицинских туров для лечения за рубежом;
- проектирование траектории внедрения маркетинга в медицинское образование, направленного на гармонизацию практики в области медицины с современными требованиями рыночной среды.

Развитие медицинского туризма будет способствовать росту экспорта медицинских услуг, увеличению доли вклада в ВВП медицинской отрасли, развитию здравоохранения Республики Беларусь и, как следствие, росту качества жизни населения.

Список цитированных источников

1. Beland, D. Medical tourism and national health care systems: an institutionalist research agenda / D. Béland, A. Zarzeczny // *Globalization and Health*. – 2018. – URL: <https://globalizationandhealth.biomedcentral.com/counter/pdf/10.1186/s12992-018-0387-0.pdf> (date of access: 17.02.2025).
2. Johnston, R. Policy implications of medical tourism development in destination countries: revisiting and revising an existing framework by examining the case of Jamaica / R. Johnston, V. A. Crooks, M. Ormond // *Globalization and Health*. – 2015. – URL: <https://globalizationandhealth.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s12992-015-0113-0> (date of access: 17.02.2025).
3. Ефимов, С. А. Лечебно-оздоровительный, лечебный и оздоровительный туризм: уточняем понятийно-терминологический аппарат / С. А. Ефимов, А. С. Ефимова // *Вестник физиотерапии и курортологии*. – 2017. – № 4. – С. 155–160.
4. Иванов, В. Д. Специальные виды туризма: лечебный туризм / В. Д. Иванов, О. В. Марандыкина. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/spetsialnye-vidy-turizma-lechebnyy-turizm> (дата обращения: 21.08.2024).
5. Савельева, Н. А. Медицинский туризм: вопросы терминологии / Н. А. Савельева, Р. В. Колесникова. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoretiko-metodologicheskie-aspekty-meditsinskogo-turizma> (дата обращения: 21.08.2024).
6. Соколов, А. С. Теоретико-методологические аспекты медицинского туризма / А. С. Соколов, Н. П. Манько, В. Г. Гуляев. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoretiko-metodologicheskie-aspekty-meditsinskogo-turizma> (дата обращения: 18.06.2024).
7. Гаврилик, А. А. Социально-маркетинговые исследования для поиска путей повышения экспорта медицинских услуг / А. А. Гаврилик // *Вопросы организации и информатизации здравоохранения*. – 2020. – № 2. – С. 68–71.
8. Калистратов, Д. В. Экспорт медицинских услуг: отечественный опыт и мировые тренды / Д. В. Калистратов, О. А. Кульпанова, М. В. Щавелева. – URL: https://rncmt.by/files/00106/obj/110/72173/doc/1_Probl_3_23-29.pdf (дата обращения: 18.02.2025).
9. Максименюк, В. В. Правовая характеристика и соотношение лечебно-оздоровительного и медицинского видов туризма / В. В. Максименюк. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pravovaya-harakteristika-i-sootnoshenie-lechebno-ozdorovitel'nogo-i-meditsinskogo-vidov-turizma-v-respublike-belarus> (дата обращения: 18.02.2025).
10. Милашевич, Е. А. Выявление перспективных направлений специализации Республики Беларусь на мировом рынке медицинских услуг / Е. А. Милашевич. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vyyavlenie-perspektivnyh-napravleniy-spetsializatsii-respubliki-belarus-na-mirovom-rynke-meditsinskih-uslug> (дата обращения: 18.02.2025).

11. Внешняя торговля услугами // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/vneshnyaya-torgovlya/vneshnyaya-torgovlya-uslugami> (дата обращения: 18.02.2025).
12. Анализ размера и доли рынка медицинского туризма - тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.). – URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/medical-tourism-market> (дата обращения: 18.02.2025).
13. На лечение в Корею: зачем, как и сколько стоит // Health travel. – Алматы, 2016. – URL: <https://health-travel.kz/na-lechenie-v-koreyu-zachem-kak-i-skolko-stoit/?ysclid=ldcmdtcnv1519931820> (дата обращения: 18.06.2024).
14. Health&Wealth Expo–2023. – URL: www.nationtv.tv/pr-news/lifestyle/378937007#google_vignette (дата обращения: 18.06.2024).
15. Medical Tourism: Travel to Another Country for Medical Care // Centers for Disease Control and Prevention. – URL: wwwnc.cdc.gov/travel/page/medical-tourism# (дата обращения: 21.04.2024).
16. Медикал Korea. – URL: www.medicalkorea.or.kr/ru/medicalkorea (дата обращения: 21.04.2024).
17. VALENIA HEALTH SERVICES. – URL: <https://valeniahs.com/en> (date of access: 21.08.2024).
18. Цветкова, А. Б. Влияние репутации медицинского учреждения на выбор потребителя / А. Б. Цветкова, А. В. Шишкин // Российское предпринимательство. – 2018. – № 11. – С. 3381–3390.
19. Бунько, С. А. Личный бренд врача как фактор повышения привлекательности медицинского учреждения / С. А. Бунько, Е. А. Дворак // Science and innovation. – 2024. – URL: <https://ilmiyanjumanlar.uz/uploads/conferences/0026/4.8%20Bunko%20S.pdf> (дата обращения: 21.04.2024).
20. Бунько, С. А. Исследование целей и эффективности создания личного бренда врача в среде Интернет / С. А. Бунько, Е. А. Дворак // Актуальные проблемы современных экономических систем – 2024 : сборник научных трудов / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет ; редкол.: А. Г. Проровский [и др.]. – Брест, 2024. – С. 43–46.
21. Зазерская, В. В. Факторы устойчивого экономического роста в условиях цифровой экономики / В. В. Зазерская // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Экономика. – 2020. – № 3. – С. 27–29.
6. Sokolov, A. S. Teoretiko-metodologicheskie aspekty medicinskogo turizma / A. S. Sokolov, N. P. Man'ko, V. G. Gulyaev. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoretiko-metodologicheskie-aspekty-meditsinskogo-turizma> (data obrashcheniya: 18.06.2024).
7. Gavrilik, A. A. Social'no- marketingovye issledovaniya dlya poiska putej povysheniya eksporta medicinskih uslug / A. A. Gavrilik // Voprosy organizatsii i informatizatsii zdavoohraneniya. – 2020. – № 2. – С. 68–71.
8. Kalistratov, D. V. Eksport medicinskih uslug: otechestvennyy opyt i mirovye trendy / D. V. Kalistratov, O. A. Kul'panova, M. V. SHCHaveleva. – URL: https://mpcmt.by/files/00106/obj/11072173/doc/1_Probl_3_23-29.pdf (data obrashcheniya: 18.02.2025).
9. Maksimenyuk, V. V. Pravovaya karakteristika i sootnoshenie lechbeno-ozdorovitel'nogo i medicinskogo vidov turizma / V. V. Maksimenyuk. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pravovaya-karakteristika-i-sootnoshenie-lechbeno-ozdorovitel'nogo-i-meditsinskogo-vidov-turizma-v-respublike-belarus> (data obrashcheniya: 18.02.2025).
10. Milashevich, E. A. Vyyavlenie perspektivnyh napravlenij specializatsii Respubliki Belarus' na mirovom rynke medicinskih uslug / E. A. Milashevich. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vyyavlenie-perspektivnyh-napravlenij-spetsializatsii-respubliki-belarus-na-mirovom-rynke-meditsinskih-uslug> (data obrashcheniya: 18.02.2025).
11. Vneshnyaya trgovlya uslugami // Nacional'nyy statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/vneshnyaya-torgovlya/vneshnyaya-torgovlya-uslugami> (data obrashcheniya: 18.02.2025).
12. Analiz razmera i doli rynka medicinskogo turizma - tendencii rosta i prognozy (2024–2029 gg.). – URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/medical-tourism-market> (data obrashcheniya: 18.02.2025).
13. Na lechenie v Koreyu: zachem, kak i skol'ko stoit // Health travel. – Алматы, 2016. – URL: <https://health-travel.kz/na-lechenie-v-koreyu-zachem-kak-i-skolko-stoit/?ysclid=ldcmdtcnv1519931820> (data obrashcheniya: 18.06.2024).
14. Health&Wealth Expo–2023. – URL: www.nationtv.tv/pr-news/lifestyle/378937007#google_vignette (data obrashcheniya: 18.06.2024).
15. Medical Tourism: Travel to Another Country for Medical Care // Centers for Disease Control and Prevention. – URL: wwwnc.cdc.gov/travel/page/medical-tourism# (data obrashcheniya: 21.04.2024).
16. Medikal Korea. – URL: www.medicalkorea.or.kr/ru/medicalkorea (data obrashcheniya: 21.04.2024).
17. VALENIA HEALTH SERVICES. – URL: <https://valeniahs.com/en> (date of access: 21.08.2024).
18. Cvetkova, A. B. Vliyanie reputatsii medicinskogo uchrezhdeniya na vybor potrebitelya / A. B. Cvetkova, A. V. SHishkin // Rossijskoe predprinimatel'stvo. – 2018. – № 11. – С. 3381–3390.
19. Bun'ko, S. A. Lichnyy brend vracha kak faktor povysheniya privlekatel'nosti medicinskogo uchrezhdeniya / S. A. Bun'ko, E. A. Dvorak // Science and innovation. – 2024. – URL: <https://ilmiyanjumanlar.uz/uploads/conferences/0026/4.8%20Bunko%20S.pdf> (data obrashcheniya: 21.04.2024).
20. Bun'ko, S. A. Issledovanie celej i effektivnosti sozdaniya lichnogo brenda vracha v srede Internet / S. A. Bun'ko, E. A. Dvorak // Aktual'nye problemy sovremennyh ekonomicheskikh sistem – 2024 : sbornik nauchnyh trudov / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet ; redkol.: A. G. Prorovskij [i dr.]. – Brest, 2024. – С. 43–46.
21. Zazerskaya, V. V. Faktory ustojchivogo ekonomicheskogo rosta v usloviyah cifrovoj ekonomiki / V. V. Zazerskaya // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika. – 2020. – № 3. – С. 27–29.

References

1. Beland, D. Medical tourism and national health care systems: an institutionalist research agenda / D. Béland, A. Zarzeczny // Globalization and Health. – 2018. – URL: <https://globalizationandhealth.biomedcentral.com/counter/pdf/10.1186/s12992-018-0387-0.pdf> (date of access: 17.02.2025).
2. Johnston, R. Policy implications of medical tourism development in destination countries: revisiting and revising an existing framework by examining the case of Jamaica / R. Johnston, V. A. Crooks, M. Ormond // Globalization and Health. – 2015. – URL: <https://globalizationandhealth.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s12992-015-0113-0> (date of access: 17.02.2025).
3. Efimov, S. A. Lechbeno-ozdorovitel'nyj, lechbenyj i ozdorovitel'nyj turizm: utochnyaem ponyatijno-terminologicheskij apparat / S. A. Efimov, A. S. Efimova // Vestnik fizioterapii i kurortologii. – 2017. – № 4. – С. 155–160.
4. Ivanov, V. D. Special'nye vidy turizma: lechbenyj turizm / V. D. Ivanov, O. V. Marandykina. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/spetsialnye-vidy-turizma-lechbenyj-turizm> (data obrashcheniya: 21.08.2024).
5. Savel'eva, N. A. Medicinskij turizm: voprosy terminologii / N. A. Savel'eva, R. V. Kolesnikova. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoretiko-metodologicheskie-aspekty-meditsinskogo-turizma> (data obrashcheniya: 21.08.2024).

Материал поступил 24.03.2025, одобрен 27.03.2025, принят к публикации 27.03.2025

УДК 339.9

ТАМОЖЕННАЯ ЗАЩИТА ПРАВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ ЕВРАЗИЙСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОЮЗА

Э. Э. Ермакова¹, М. П. Мишкова²

¹ М. э. н., старший преподаватель кафедры экономической теории и логистики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ermakova.eleonora@gmail.com

² К. э. н., доцент кафедры менеджмента УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: mishkova69@yandex.by

Реферат

Совершенствование качества таможенных услуг определяет новые институциональные условия в развитии таможенной службы Республики Беларусь. Это влечет необходимость разработки и внедрения современных подходов и методов повышения эффективности таможенного администрирования [1, с. 74].

Таможенное регулирование перемещения товаров, содержащих объекты интеллектуальной собственности (ОИС), является одним из основных направлений деятельности таможенных органов Республики Беларусь на современном этапе. Системная работа по борьбе с незаконным перемещением товаров, содержащих ОИС, является актуальной задачей для таможенных органов Беларуси, реализация которой необходима для обеспечения экономической безопасности страны.

Статья посвящена исследованию механизма правового регулирования деятельности таможенных органов по защите прав на ОИС. Особое внимание уделено роли таможенных реестров ОИС в системе защиты интеллектуальных прав. Ведение единого унифицированного таможенного реестра объектов интеллектуальной собственности дает возможность таможенным органам осуществлять защиту прав правообладателей на всей территории Евразийского экономического союза, правообладателям избежать финансовых и временных издержек, затрачиваемых при внесении объекта интеллектуальной собственности в национальные таможенные реестры.

Рассмотрены вопросы правового регулирования ограничения исключительных прав интеллектуальной собственности в условиях действующих в отношении Беларуси санкций, что выступает одновременно вызовом мировому сообществу и дополнительными возможностями для национальной экономики.

По результатам исследования проведена систематизация проблем таможенного регулирования перемещения товаров, содержащих ОИС через таможенную границу Евразийского экономического союза, дана оценка эффективности применения Закона от 3 января 2023 г. № 241-З «Об ограничении исключительных прав на объекты интеллектуальной собственности».

Ключевые слова: таможенное регулирование, таможенный кодекс, таможенная граница, экономическая интеграция, объекты интеллектуальной собственности, контрафактная продукция, экономическая безопасность, таможенный реестр объектов интеллектуальной собственности, санкции, цифровая трансформация.

CUSTOMS PROTECTION OF INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS IN THE CONTEXT OF THE DEVELOPMENT OF THE EURASIAN ECONOMIC UNION

E. E. Ermakova, M. P. Mishkova

Abstract

Improving the quality of customs services determines new institutional conditions in the development of the customs service of the Republic of Belarus. This entails the need to develop and implement modern approaches and methods to improve the efficiency of customs administration [1, p. 74].

Customs regulation of the movement of goods containing intellectual property (IPO) is one of the main areas of activity of the customs authorities of the Republic of Belarus at the present stage. Systematic work to combat the illegal movement of goods containing IPO is an urgent task for the customs authorities of Belarus, the implementation of which is necessary to ensure the economic security of the country.

The article is devoted to the study of the mechanism of legal regulation of the activities of customs authorities to protect rights to IPO. Particular attention is paid to the role of customs registers of IPO in the system of protection of intellectual property. Maintaining a single unified customs register of intellectual property allows customs authorities to protect the rights of copyright holders throughout the territory of the Eurasian Economic Union, and allows copyright holders to avoid financial and time costs incurred when entering an intellectual property object into national customs registers. The article examines the issues of legal regulation of the restriction of exclusive intellectual property rights in the context of sanctions against Belarus, which is both a challenge to the world community and additional opportunities for the national economy. Based on the results of the study, the problems of customs regulation of the movement of goods containing intellectual property rights across the customs border of the Eurasian Economic Union were systematized, and an assessment was made of the effectiveness of the application of the Law of January 3, 2023 No. 241-Z «On the Limitation of Exclusive Rights to Intellectual Property Objects».

Keywords: customs regulation, customs code, customs border, economic integration, intellectual property objects, counterfeit products, economic security, customs register of intellectual property objects, sanctions, digital transformation.

Введение

Развитие Евразийского экономического союза (ЕАЭС) предусматривает установление новой экономической модели, преобразование принципов ведения бизнеса, цифровую трансформацию и регулирование рынка интеллектуальной собственности [2, с. 18]. Нормативно-правовое регулирование функционирования рынка интеллектуальной собственности осуществляется как на национальном, так и на международном уровне и одним из важнейших элементов сотрудничества государств в рамках ЕАЭС, является таможенная защита объектов интеллектуальной собственности (ОИС).

Ввиду того, что рынок интеллектуальной собственности не ограничен пределами одной страны, а носит в большей степени масштабный характер, актуальными выступают вопросы таможенной защиты прав на ОИС. Необходимость таможенной защиты определяется повышением уровня технических возможностей передачи информации, использованием методов недобросовестной конкуренции, что приводит к увеличению случаев фальсификации изделий и сбыта контрафактной продукции. Актуальность исследования обусловлена необходимостью решения современных вызовов, связанных с защитой прав ИС в условиях развития ЕАЭС, а также важно-

стью создания эффективных механизмов таможенного контроля для поддержки экономического роста и интеграционных процессов.

Новая экономика основана на знаниях и передовых технологиях, ставших основой функционирования и развития современного общества. Сегодня даже традиционные товары насыщены интеллектуальной составляющей [3, с. 80].

Таможенная защита исключительных прав позволяет создавать условия для плодотворного сотрудничества, обеспечивать возможности для развития бизнеса и гарантировать экономическую безопасность на рынке ЕАЭС. Кроме этого, защита исключительных прав таможенными органами выступает одним из видов ограничений оборота контрафактной продукции.

Цель исследования заключается в определении места таможенных органов в системе защиты прав интеллектуальной собственности в условиях действующих в отношении Беларуси санкций и законодательных ограничений исключительных прав ИС.

Научная новизна исследования состоит в комплексном рассмотрении актуальных проблем защиты прав интеллектуальной собственности в контексте развития Евразийского экономического союза, включая влияние цифровизации и трансграничной торговли. Предложены новые подходы к совершенствованию таможенного контроля и защиты ИС, включая внедрение современных технологий, таких как блокчейн, искусственный интеллект для выявления контрафактной продукции.

Основные проблемы защиты прав на ОИС при перемещении товаров через таможенную границу Евразийского экономического союза

Таможенный кодекс Евразийского экономического союза устанавливает основы таможенного регулирования, включая права и обязанности таможенных органов по защите интеллектуальной собственности. В соответствии с Таможенным кодексом стран ЕАЭС одной из основных задач таможенных органов является обеспечение защиты прав интеллектуальной собственности на таможенной территории таможенного союза, а также контроль за правильностью определения таможенной стоимости товара и взимание таможенных платежей [4].

Закон Республики Беларусь «О таможенном регулировании в Республике Беларусь» детализирует нормы, касающиеся таможенной защиты интеллектуальной собственности [5]. Постановления и инструкции Государственного таможенного комитета конкретизируют процедуры, которые применяются при выявлении и приостановлении выпуска товаров, подозреваемых в нарушении прав на интеллектуальную собственность.

В Беларуси таможенная защита сегодня осуществляется в рамках таможенного законодательства Евразийского экономического союза (ЕАЭС), а также регулируется межгосударственными и национальными нормами.

При исследовании вопроса таможенной защиты продуктов, содержащих интеллектуальную собственность, рассматриваются такие объекты, как объекты авторского права и смежных прав, товарные знаки и наименования мест происхождения товара [6].

На сегодняшний день контрафакт представляет серьезную угрозу для экономических интересов государств – членов Евразийского экономического союза [7, с. 135]. Не требует подтверждения тот факт, что нарушения прав на объекты интеллектуальной собственности оказывают крайне негативное влияние на экономику: страдают правообладатели и производители, товары которых не могут составить ценовую конкуренцию с их нелегальными аналогами, бюджеты государств недополучают таможенные платежи и налоги. Более того, ощутимо страдают потребители некачественных, а порой и опасных товаров, способных нанести существенный вред жизни и здоровью населения.

При международной экономической интеграции государствам необходимо обеспечить высокий уровень защиты прав на ОИС при перемещении товаров, в связи с чем приходится сталкиваться с рядом проблем, среди которых:

- гармонизация законодательств [8, с. 4], т. е. сближение национальных законов государств-членов, направленное на установление сопоставимого нормативного правового регулирования в области интеллектуальной собственности;

- создание единой базы данных, предусматривающей ведение реестра объектов интеллектуальной собственности для упрощения управления правами и предотвращения их нарушений;

- упрощение процедур регистрации и защиты прав путем введения электронных платформ для подачи и обработки заявок на регистрацию прав;

- обеспечение прозрачности и безопасности [9, с. 46] – использование современных технологий, таких как блокчейн, для защиты информации и обеспечения ее подлинности;

- сотрудничество между странами – членами ЕАЭС, обмен информацией и опытом для более эффективной борьбы с нарушениями прав интеллектуальной собственности.

Гармонизация законодательств в сфере интеллектуальной собственности в рамках ЕАЭС является важным инструментом для углубления экономической интеграции и упрощения международного сотрудничества.

Несмотря на наличие общих норм, регулирующих вопросы таможенного контроля ОИС, в каждой стране ЕАЭС действуют свои национальные законы, что создает правовые разночтения и сложности при реализации единых процедур [10, с. 105].

На сегодняшний день национальные законодательства стран ЕАЭС демонстрируют как унифицированные положения, так и расхождения различной степени значительности, вопрос гармонизации которых поднимается [11]. Гармонизация не означает, что законодательство всех государств – членов ЕАЭС должно быть абсолютно идентичным в сфере интеллектуальной собственности [12, с. 198]. Однако очевидно, что по ряду положений возможно и желательно сближение подходов [13, с. 28].

Сотрудничество между странами в сфере правового регулирования предусматривает разработку общих подходов защиты прав ИС, снижение барьеров для перемещения товаров и услуг, введение механизма региональной регистрации товарных знаков. Договор «О товарных знаках, знаках обслуживания и наименованиях мест происхождения товаров Евразийского экономического союза» от 3 февраля 2020 г. позволил признавать зарегистрированные ОИС на всей территории ЕАЭС [14].

Одним из определяющих механизмов защиты прав интеллектуальной собственности таможенными органами является реестр. Таможенные органы каждого государства – члена ЕАЭС имеют национальные таможенные реестры ОИС. **Таможенный реестр ОИС** – это официальный список, который ведется таможенными органами для защиты прав интеллектуальной собственности на границе, основными задачами которого является:

- защита рынка от контрафактной продукции [15], предотвращая незаконное использование интеллектуальной собственности;
- мониторинг перемещения товаров через границу и обеспечение контроля соблюдения прав интеллектуальной собственности;
- информирование правообладателей интеллектуальной собственности о нарушении их прав [16, с. 91].

Внесение в таможенный реестр объектов интеллектуальной собственности (ТРОИС) в Беларуси является основополагающим инструментом таможенной защиты на национальном уровне. В национальный таможенный реестр объектов интеллектуальной собственности включаются товары, имеющие соответствующие права. Реестр позволяет правообладателям защищать свои интересы на уровне таможенных органов. Таможенная защита объектов интеллектуальной собственности осуществляется через систему, которая позволяет правообладателям защищать свои товарные знаки и другие объекты интеллектуальной собственности от контрафактного импорта и нарушений исключительных прав правообладателей.

К числу нарушений исключительных прав относят: незаконное использование товарных знаков (контрафактная продукция); нарушение авторских и смежных прав (пиратские копии книг, фильмов, программного обеспечения); несанкционированное применение промышленных образцов; ввоз и вывоз товаров, имитирующих оригинальную продукцию без разрешения правообладателя.

Очевидно, что защита прав осуществляется только в отношении тех объектов, которые зарегистрированы в таможенном реестре.

Расширение таможенных реестров стран ЕАЭС различно, наполнение происходит неравномерно. Динамика процесса внесения объектов интеллектуальной собственности, содержащихся в таможенном реестре Республики Беларусь и Российской Федерации, представлена на рисунке 1.

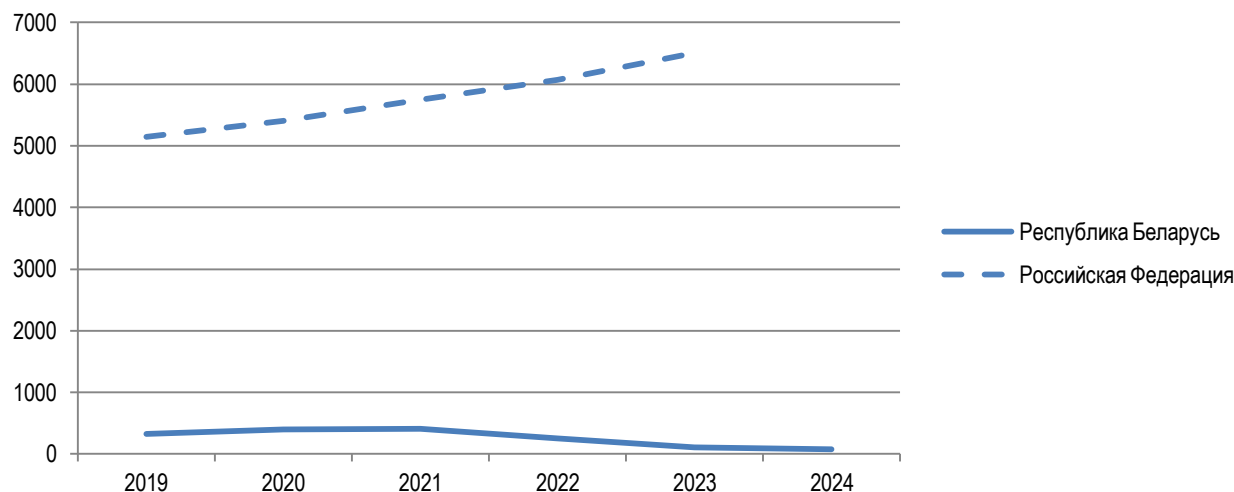


Рисунок 1 – Динамика процесса внесения ОИС в таможенный реестр, ед. [17]

Снижение количества ОИС в таможенном реестре Беларуси может быть связано с несколькими причинами. Во-первых, компании могут переориентироваться на другие рынки в связи с санкциями и общего сокращения взаимодействия с белорусским рынком. Во-вторых, по причине выбора других способов защиты интеллектуальной собственности, например судебные разбирательства или внесение ОИС в реестр других стран. В-третьих, в связи с изменениями в законодательстве. Если санкции за нарушение прав в сфере ИС стали менее строгими, мотивация для регистрации в реестре снижается.

Разница в динамике количества ОИС в таможенных реестрах Беларуси и России может быть обусловлена совокупностью экономических, юридических и геополитических факторов. Иностранные компании снизили интерес к защите своих прав в Республике Беларусь, многие бренды покинули рынок или сократили свое присутствие, тем самым снизилась потребность в защите ОИС на границе. В то же время Российская Федерация – это крупный и привлекательный рынок, несмотря на санкции. Многие компании продолжают защищать свои бренды, чтобы сохранить позиции на рынке.

В Республике Беларусь в условиях санкционного давления и экономической изоляции в 2023 году принят Закон от 3 января 2023 г. № 241-З «Об ограничении исключительных прав на объекты интеллектуальной собственности», основной целью которого выступает минимизация последствий недоступности определенных товаров, технологий и услуг, защищенных правами интеллектуальной собственности.

Изменения, регулирующие вопросы авторских прав и прав промышленной собственности, выступили в качестве основных антикризисных мер, направленных на смягчение ограничений, связанных с использованием ОИС, принадлежащих недружественным странам. Согласно закону, допускается использовать объекты интеллектуальной собственности без согласия правообладателя или организации по коллективному управлению имущественными правами из иностранных государств, совершающих недружественные действия, которые запретили или не дали разрешение использовать данные объекты на территории Республики Беларусь [18].

Экономический эффект от введения закона, ограничивающего исключительные права интеллектуальной собственности, может проявляться в различных аспектах и иметь как положительные, так и отрицательные последствия.

Потребители получили возможность приобретать ранее недоступные товары и услуги. Появился доступ к товарам, ушедшим с рынка из-за ограничений со стороны правообладателей. Отсутствует дефицит определенных категорий товаров, таких как электроника, бытовая техника, автозапчасти и др.

Национальным производителям созданы условия для развития собственного производства. Бизнес получил возможность расширения использования технологий, программного обеспечения и других продуктов интеллектуальной собственности, снизил зависимость от официальных дистрибьюторов. Предпринимателям созданы условия для торговли без ограничений со стороны правообладателей.

Свободный доступ к технологиям и интеллектуальной собственности может стимулировать развитие отечественного производства. Ограничение исключительных прав может мотивировать национальных производителей разрабатывать собственные технологии и изобретения, снижая технологическую зависимость страны. Это особенно актуально для таких сфер, как фармацевтика, информационные технологии, программное обеспечение.

Национальная экономика имеет возможность временной стабилизации рынка товаров и потребительского рынка.

Наряду с имеющимися преимуществами следует отметить повышение степени риска в международной торговле. Беларусь может столкнуться с претензиями со стороны других государств или международных организаций, таких как Всемирная торговая организация и Всемирная организация интеллектуальной собственности в связи с противоречием международных соглашений, что может повлиять на деловую репутацию Беларуси в международной системе защиты интеллектуальной собственности.

Иностранные компании могут отказаться от ведения бизнеса в Беларуси, что в свою очередь приведет к сокращению прямых иностранных инвестиций в высокотехнологичных отраслях. Однако в условиях санкционного давления правообладатели из недружественных стран имеют ограниченные возможности для защиты своих прав.

В долгосрочной перспективе Беларусь может столкнуться с необходимостью урегулирования споров и восстановления нормального режима защиты интеллектуальной собственности.

Закон носит временный характер, действует в условиях санкционного давления и ограничен периодом, в течение которого сохраняются «недружественные» действия иностранных государств. На сегодняшний день срок действия закона продлен до 31 декабря 2026 года.

Несмотря на легализацию параллельного импорта, контроль качества импортируемых товаров остается в Беларуси важной задачей. Правительство принимает меры минимизации риска ввоза некачественной или контрафактной продукции для обеспечения безопасности потребителей. Для контроля качества импортируемых товаров в Беларуси применяются строгие механизмы, включая обязательную сертификацию, таможенный контроль и другие меры защиты. Органы государственного контроля осуществляют надзор за качеством товаров на рынке.

Цифровая трансформация рынка интеллектуальной собственности выступает одним из направлений совершенствования таможенной защиты прав на объекты интеллектуальной собственности в рамках ЕАЭС, в связи с чем проблема формирования единого цифрового рынка интеллектуальных прав становится наиболее значимой.

Формирование единого цифрового рынка интеллектуальных прав включает создание условий для свободного и безопасного обмена цифровыми продуктами и услугами, защищенными правами интеллектуальной собственности, на территории Евразийского эко-

номического союза. Основные аспекты цифровой трансформации таможенной сферы в рамках формирования цифрового пространства ЕАЭС включают:

- автоматизацию процессов, предусматривающую повышение скорости таможенных операций и снижение ошибок, связанных с человеческим фактором;
- ведение электронного документооборота, снижающего издержки для бизнеса и ускоряющего таможенные процедуры;
- создание единых платформ для обмена данными между странами ЕАЭС, обеспечивающих прозрачность, согласованность и оперативность взаимодействия таможенных служб и мгновенной проверки товаров;
- введение электронных платежных систем для возможной онлайн оплаты таможенных пошлин и налогов через интегрированные платформы, что ускорит расчеты и повысит удобство для участников внешнеэкономической деятельности.

В 2023 году вступила в силу новая редакция Таможенного кодекса ЕАЭС, в том числе новые механизмы защиты прав на ОИС. Это упростило процесс подачи заявлений на внесение ОИС в реестр.

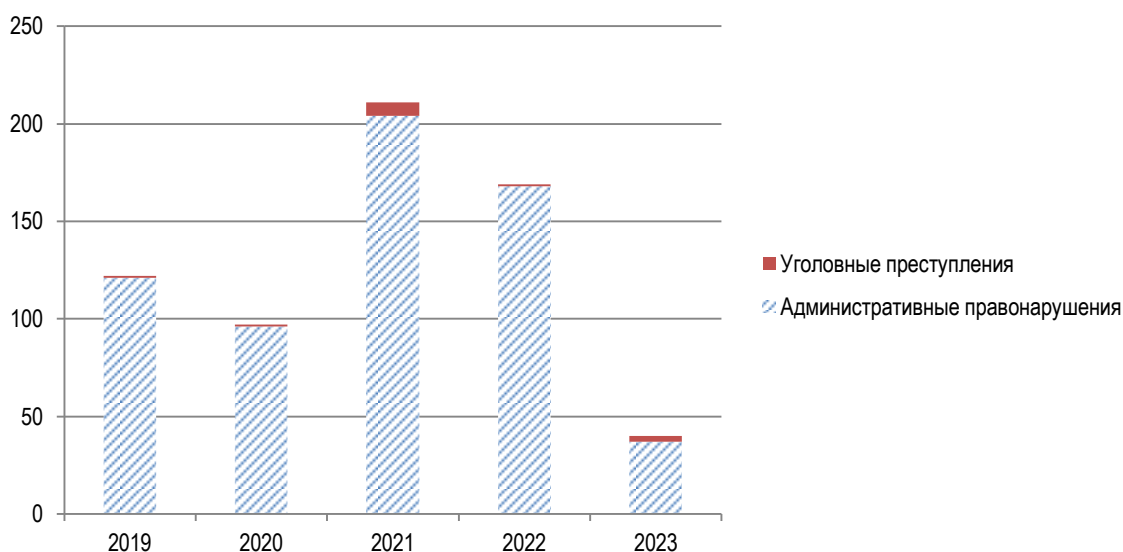


Рисунок 2 – Количество выявленных нарушений прав на объекты интеллектуальной собственности в Республике Беларусь с 2019 по 2023 годы [17]

Предметами правонарушений чаще всего являлись права на товарные знаки:

- продуктов питания – 57,5 %;
- товаров, относящихся к эксплуатации автомобилей (автоаксессуары, ГСМ) – 20 %;
- изоляционных материалов – 18 % [17].

Наибольшее количество контрафактных товаров, выявленных таможенными органами при ввозе в Республику Беларусь (около 66 % нарушений), зафиксировано с территории Польши, а также из Китая (около 31,5 %) и Литвы (около 2,4 %) [17].

Снижение показателей в целом по Республике Беларусь может являться в том числе результатом запущенного в 2023 году механизма ограничения исключительных прав в соответствии с Законом Республики Беларусь «Об ограничении исключительных прав на объекты интеллектуальной собственности».

Заключение

Незаконная торговля продолжает представлять значительную угрозу глобальной безопасности, экономической стабильности и благополучию общества. Поставка контрафактной продукции и иная преступная деятельность подрывает экономику, подпитывает сети организованной преступности и ставит под угрозу здоровье и безопасность людей по всему миру.

Сотрудничество государств – членов ЕАЭС в сфере интеллектуальной собственности необходимо для защиты интересов обладателей прав на объекты интеллектуальной собственности. Поэтому гар-

Для упрощения процедур торговли и обеспечения безопасности таможенными органами могут быть использованы такие передовые технологии, как блокчейн; интернет вещей; большие данные, аналитика данных, искусственный интеллект и машинное обучение. Следует подчеркнуть, что несмотря на то, что данные технологии рассматриваются по отдельности, они не являются взаимоисключающими и обычно применяются в сочетании друг с другом [19, с. 55].

Использование технологии блокчейн для таможенной защиты ОИС позволит отслеживать цепочки поставок, создавая прозрачную и неизменяемую запись о происхождении и движении товаров. Блокчейн может использоваться для управления и контроля лицензиями, предотвращая незаконное использование интеллектуальной собственности.

На сегодняшний день использование технологии блокчейн таможенными органами находится на экспериментальной стадии и полноценное развертывание этой технологии принесет преимущества в будущем.

Таможенными органами в 2023 году выявлено 40 нарушений прав на объекты интеллектуальной собственности, из них 37 административных правонарушений и 3 уголовных преступления, что составило около 24 % от уровня 2022 года (рисунок 2).

монизация национальных законодательств направлена на создание совместной эффективной системы защиты интеллектуальных прав.

Действующая система регистрации интеллектуальной собственности в таможенном реестре имеет ряд преимуществ:

- пресечение ввоза контрафактной продукции, что защищает как интересы производителей, так и потребителей от продукции низкого качества;
- увеличение доли легальных товаров на рынке, что способствует укреплению имиджа компаний, обладающих средствами индивидуализации бизнеса и их продуктов на рынке;
- снижение степени риска финансовых потерь из-за снижения прибыли от продаж владельцев интеллектуальной собственности;
- получение дополнительных доходов владельцами имущественных прав в виде роялти от лицензионных соглашений с импортерами.

Выступая важным и полезным инструментом в системе защиты ИС, таможенный реестр не является единственным механизмом регулирования отношений в сфере защиты интеллектуальной собственности. Он работает в связке с национальными законами, международными нормами, судебными и технологическими механизмами.

Технологическая защита на границе не заменяет правовые инструменты, но значительно повышает их эффективность и предусматривает использование цифровых меток, голограмм, QR-кодов, технологии блокчейн для идентификации оригинальной продукции [20, с. 159].

Экономический эффект Закона № 241-З «Об ограничении исключительных прав интеллектуальной собственности» в Беларуси будет зависеть от его конкретных положений, а также от текущей экономиче-

ской и политической ситуации. Такие меры могут предоставить краткосрочные преимущества в виде снижения издержек и повышения доступности технологий, но в долгосрочной перспективе могут снизить инвестиционную привлекательность страны, замедлить развитие инноваций и создать проблемы в международной торговле. Для минимизации негативных последствий важно обеспечить баланс между интересами местного бизнеса и международных партнеров.

Таможенным органам государств-членов важно совершенствовать меры, принимаемые в целях выявления контрафактных товаров, в том числе при проведении таможенной экспертизы товаров, содержащих объекты интеллектуальной собственности в случае, если это предусмотрено национальным законодательством, а также оптимизировать таможенные стандарты с точки зрения улучшения взаимодействия со всеми заинтересованными участниками.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки и внесения изменений в нормативно-правовые акты ЕАЭС и национальные законодательства стран-участниц, направленных на усиление защиты прав ИС на таможенной территории. Практические рекомендации могут включать предложения по использованию цифровых технологий для автоматизации процессов идентификации контрафакта и мониторинга товарных потоков. Практика развития сотрудничества между таможенными органами стран ЕАЭС должна способствовать развитию отношений с другими странами и международными организациями, такими как Всемирная организация интеллектуальной собственности и Всемирная торговая организация для обмена опытом и лучшими практиками.

Список цитированных источников

- Довженко, П. В. Совершенствование таможенных услуг по защите интеллектуальной собственности / П. В. Довженко, В. А. Останин // Таможенная политика России на Дальнем Востоке. – 2022. – № 2 (99). – С. 73–82.
- Ермакова, Э. Э. Роль интеллектуальной собственности в развитии общества / Э. Э. Ермакова // Вестник БрГТУ. Серия: Экономика. – 2010. – № 3 – С. 17–21.
- Ермакова, Э. Э. Изобретательская активность в инновационной деятельности / Э. Э. Ермакова // Перспективы развития инвестиционно-строительного комплекса в странах Восточной Европы: сборник научных трудов. – Брест : БрГТУ, 2016. – С. 79–84.
- Таможенный кодекс Евразийского экономического союза : ред. от 29.05.2019 (приложение № 1 к Договору о Таможенном кодексе Евразийского экономического союза // КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_215315 (дата обращения: 10.02.2025).
- О таможенном регулировании в Республике Беларусь : Закон Респ. Беларусь от 10 янв. 2014 г. № 129-З. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H11400129> (дата обращения: 09.02.2025).
- Гражданский Кодекс Республики Беларусь от 07.12.1998 г. № 218-З (ред. от 31.12.2021) // *ilex*. – URL: <https://ilex-private.ilex.by/view/document> (дата обращения: 16.02.2024).
- Куган, С. Ф. Информационные технологии и перспективы их развития в национальной экономике Беларуси / С. Ф. Куган, М. П. Мишкова // Вычислительные методы, модели и образовательные технологии : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 21 окт. 2016 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; под общ. ред. О. В. Матысика. – Брест : БрГУ, 2016. – С. 135–136.
- Ермакова, Э. Э. Основы управления интеллектуальной собственностью : электронный учебно-методический комплекс / Э. Э. Ермакова. – Брест : БрГТУ. – 2022. – 128 с.
- Мишкова, М. П. Проблемы развития информационных технологий на современном экономическом этапе / М. П. Мишкова // Инновации: от теории к практике : сб. науч. ст. 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.
- Ермакова, Э. Э. Оценка эффективности научных исследований и разработок / Э. Э. Ермакова, М. П. Мишкова // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 1 (124). – С. 104–106.
- Отчет о состоянии правоприменительной практики в сфере защиты прав на объекты интеллектуальной собственности в государствах – членах Евразийского экономического союза за 2023 год / Департамент развития предпринимательской деятельности Евразийской экономической комиссии – Москва 2024. – URL: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/d43/mn55bun d7f1e00v5cf81236g3cygy4c/Otchet-PP-po-IS_2023-god.pdf (дата обращения: 10.02.2025).
- Иванова, Д. В. Система права интеллектуальной собственности / Д. В. Иванова // Управление наукой и наукометрия. – 2023. – Т. 18, № 2. – С. 186–307.
- Сорокин, А. М. Таможенный контроль товаров, содержащих объекты интеллектуальной собственности, как государственная услуга / А. М. Сорокин // Право интеллектуальной собственности. – 2019. – № 3 (57). – С. 25–30.
- Договор о товарных знаках, знаках обслуживания и наименованиях мест происхождения товаров Евразийского экономического союза : 3 февраля 2020 г., 14.01.2021, № 3/3853 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=F02000435> (дата обращения: 10.02.2025).
- Обзор «Передовые цифровые технологии, реализуемые в сфере внешнеэкономической деятельности, в контексте совершенствования механизма «единого окна» Евразийская экономическая комиссия Москва 2023. – URL: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/8dd/2023_11_16_Obzor.pdf (дата обращения: 10.02.2025).
- Медведева, Г. Б. / Эффективность логистических процессов в условиях цифровизации: теоретические и практические аспекты / Г. Б. Медведева, Л. А. Захарченко, Э. Э. Ермакова // Актуальные проблемы коммерции, логистики и маркетинга в условиях трансформации современной экономики : сб. науч. статей Между. науч.-практ. конф., 20 окт. 2022 г. – Гомель : Бел. торгово-экономич. ун-т. потребительской кооперации, 2022. – С. 89–92.
- Аналитический обзор в сфере интеллектуальной собственности в государствах – членах Евразийского экономического союза за период с 2019 по 2023 год Москва 2024 – URL: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/1d3/ohzkc5xk49ghd1v3ig67r1 h4dz7kag1/Analiticheskiy-obzor-v-sfere-IS-v-g_ch-EAES_2019_2023.pdf (дата обращения 10.02.2025).
- Об ограничении исключительных прав на объекты интеллектуальной собственности : Закон Республики Беларусь от 3 января 2023 г. № 241-З. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H12300241> (дата обращения: 10.02.2025).
- Мишкова, М. П. Развитие информационных экономических технологий на современном этапе / М. П. Мишкова, Э. Э. Ермакова // Вестник БрГУ. Серия 2: История. Экономика. Право. – 2024. – № 2. – С. 53–61.
- Ермакова, Э. Э. Цифровая трансформация экономики Беларуси / Э. Э. Ермакова // Инновации: от теории к практике: коллективная монография / под ред.: А. М. Омелянюка [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2019. – С. 157–161.

References

- Dovzhenko, P. V. Sovershenstvovanie tamozhennyh uslug po zashchite intellektual'noj sobstvennosti / P. V. Dovzhenko, V. A. Ostanin // Tamozhennaya politika Rossii na Dal'nem Vostoke. – 2022. – № 2 (99). – S. 73–82.
- Ermakova, E. E. Rol' intellektual'noj sobstvennosti v razviti obshchestva / E. E. Ermakova // Vestnik BrGTU. Seriya: Ekonomika. – 2010. – № 3 – S. 17–21.
- Ermakova, E. E. Izobretatel'skaya aktivnost' v innovacionnoj deyatel'nosti / E. E. Ermakova // Perspektivy razvitiya investicionno-stroitel'nogo kompleksa v stranah Vostochnoj Evropy: sbornik nauchnyh trudov. – Brest : BrGTU, 2016. – S. 79–84.
- Tamozhennyj kodeks Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza : red. ot 29.05.2019 (prilozhenie № 1 k Dogovoru o Tamozhennom kodekse Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza // KonsultantPlyus. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_215315 (data obrashcheniya: 10.02.2025).

5. O tamozhennom regulirovanii v Respublike Belarus' : Zakon Resp. Belarus' ot 10 yanv. 2014 g. № 129-Z. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H11400129> (data obrashcheniya: 09.02.2025).
6. Grazhdanskij Kodeks Respubliki Belarus' ot 07.12.1998 g. № 218-Z (red. ot 31.12.2021) // ilex. – URL: <https://ilex-private.ilex.by/view-document> (data obrashcheniya: 16.02.2024).
7. Kugan, S. F. Informacionnye tekhnologii i perspektivy ih razvitiya v nacional'noj ekonomike Belarusi / S. F. Kugan, M. P. Mishkova // Vychislitel'nye metody, modeli i obrazovatel'nye tekhnologii : sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 21 okt. 2016 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; pod obshch. red. O. V. Matysika. – Brest : BrGU, 2016. – S. 135–136.
8. Ermakova, E. E. Osnovy upravleniya intellektual'noj sobstvennost'yu : elektronnyj uchebno-metodicheskij kompleks / E. E. Ermakova. – Brest : BrGTU. – 2022. – 128 s.
9. Mishkova, M. P. Problemy razvitiya informacionnyh tekhnologij na sovremennom ekonomicheskom etape / M. P. Mishkova // Innovacii: ot teorii k praktike : sb. nauch. st. IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 19–20 okt. 2023 g. : v 2 ch. / Brest. gos. tekhn. un-t. – Brest, 2023. – CH. 2. – C. 44–48.
10. Ermakova, E. E. Ocenka effektivnosti nauchnyh issledovanij i razrabotok / E. E. Ermakova, M. P. Mishkova // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – № 1 (124). – S. 104–106.
11. Otchet o sostoyanii pravoprimenitel'noj praktiki v sfere zashchity prav na ob"ekty intellektual'noj sobstvennosti v gosudarstvakh – chlenah Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza za 2023 god / Departament razvitiya predprinimatel'skoj deyatel'nosti Evrazijskoj ekonomicheskoy komissii – Moskva 2024. – URL: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/d43/mn55bund7f1e0ov5cf81236g3cygy4c/Otchet-PP-po-IS_2023-god.pdf (data obrashcheniya: 10.02.2025).
12. Ivanova, D. V. Sistema prava intellektual'noj sobstvennosti / D. V. Ivanova // Upravlenie naukoy i naukometriya. – 2023. – T. 18, № 2. – S. 186–307.
13. Sorokin, A. M. Tamozhennyj kontrol' tovarov, soderzhashchih ob"ekty intellektual'noj sobstvennosti, kak gosudarstvennaya usluga / A. M. Sorokin // Pravo intellektual'noj sobstvennosti. – 2019. – № 3 (57). – S. 25–30.
14. Dogovor o tovarnyh znakah, znakah obsluzhivaniya i naimenovaniyah mest proiskhozhdeniya tovarov Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza: 3 fevralya 2020 g., 14.01.2021, № 3/3853 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=F02000435> (data obrashcheniya: 10.02.2025).
15. Obzor «Peredovye cifrovye tekhnologii, realizuemye v sfere vneshneekonomicheskoy deyatel'nosti, v kontekste sovershenstvovaniya mekhanizma «edinogo okna»» Evrazijskaya ekonomicheskaya komissiya Moskva 2023. – URL: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/8dd/2023_11_16_Obzor.pdf (data obrashcheniya: 10.02.2025).
16. Medvedeva, G. B. / Effektivnost' logisticheskikh processov v usloviyah cifrovizacii: teoreticheskie i prakticheskie aspekty / G. B. Medvedeva, L. A. Zaharchenko, E. E. Ermakova // Aktual'nye problemy kommercii, logistiki i marketinga v usloviyah transformacii sovremennoj ekonomiki : sb. nauchn. statej Mezhd. nauch.-prakt. konf., 20 okt. 2022 g. – Gomel' : Bel. torgovo-ekonomich. un-t. potrebitel'skoj kooperacii, 2022. – S. 89–92.
17. Analiticheskij obzor v sfere intellektual'noj sobstvennosti v gosudarstvakh – chlenah Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza za period s 2019 po 2023 god Moskva 2024 – URL: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/1d3/ohzikc5xk49ghd1v3ig67r1h4dz7kag1/Analiticheskij-obzor-v-sfere-IS-v-g_ch-EAES_2019_2023.pdf (data obrashcheniya 10.02.2025).
18. Ob ogranichenii iskluchitel'nyh prav na ob"ekty intellektual'noj sobstvennosti : Zakon Respubliki Belarus' ot 3 yanvarya 2023 g. № 41-Z. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H12300241> (data obrashcheniya: 10.02.2025).
19. Mishkova, M. P. Razvitiye informacionnyh ekonomicheskikh tekhnologij na sovremennom etape / M. P. Mishkova, E. E. Ermakova // Vestnik BrGU. Seriya 2: Istoriya. Ekonomika. Pravo. – 2024. – № 2. – S. 53–61.
20. Ermakova, E. E. Cifrovaya transformaciya ekonomiki Belarusi / E. E. Ermakova // Innovacii: ot teorii k praktike: kolektivnaya monografiya / pod red.: A. M. Omel'yanyuka [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2019. – S. 157–161.

Материал поступил 22.02.2025, одобрен 11.03.2025,
принят к публикации 19.03.2025

УДК 338.2

РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА СТРАН СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА**Л. А. Захарченко¹, Г. Б. Медведева²**¹ К. э. н., доцент, доцент кафедры экономической теории и логики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: lazaharchenko@g.bstu.by² К. э. н., доцент, доцент кафедры экономической теории и логики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gbmedvedeva@g.bstu.by**Реферат**

Актуальность проблемы технологического суверенитета стран обусловлена тем, что доступ к новым технологиям имеет решающее значение для устойчивого экономического роста и обеспечения национальной безопасности страны. Задача обеспечения технологического суверенитета стала актуальной в сфере российских и белорусских приоритетов и нашла свое отражение государственной политики союзного государства и в принятых программных документах. В условиях глобальных вызовов и меняющейся геополитической ситуации, санкционного давления на экономику, Беларусь и Россия добились определенных успехов в реализации совместных проектов в области импортозамещения, но сейчас актуальной задачей является создание собственной технологической основы с целью снижения рисков взаимозависимости в области научно-технических инноваций.

В статье технологический суверенитет рассматривается как способность государства контролировать и развивать ключевые технологии, при этом подчеркивается, что технологический суверенитет не может быть абсолютным, его достижение сводится к некоему оптимальному уровню технологий, что дает возможность эффективного противодействия со стороны государства внешним угрозам, направленным на критически важные отрасли.

Технологический суверенитет рассматривается с позиций его элементов и с точки зрения определенных технологий. Выделены приоритетные совместные проекты Беларуси и России, в различных отраслях экономики, прежде всего в микроэлектронике, машиностроении, IT-отрасли, реализация которых способствует достижению технологической независимости этих стран.

Сотрудничество между Беларусью и Россией в области технологий может стать важным шагом к достижению технологического суверенитета. Создание совместных исследовательских центров, обмен опытом и ресурсами позволят странам более эффективно развивать свои технологические возможности.

Ключевые слова: технология, технологический суверенитет, сотрудничество, Союзное государство, угрозы, риски.

REALIZATION OF TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY OF THE UNION STATE COUNTRIES**L. A. Zakharchenko, G. B. Medvedeva****Abstract**

The relevance of the problem of technological sovereignty of countries is due to the fact that access to new technologies is crucial for sustainable economic growth and national security of a country. The task of ensuring technological sovereignty has become relevant in the sphere of Russian and Belarusian priorities and has been reflected in the state policy of the Union State and in the adopted programme documents. In the context of global challenges and changing geopolitical situation, sanctions pressure on the economy, Belarus and Russia have achieved some success in the implementation of joint projects in the field of import substitution, but now the urgent task is to create their own technological basis in order to reduce the risks of interdependence in the field of scientific and technological innovation.

The article considers technological sovereignty as the ability of the state to control and develop key technologies, emphasising that technological sovereignty cannot be absolute, its achievement is reduced to some optimal level of technology, which makes it possible for the state to effectively counter external threats directed at critical industries.

Technological sovereignty is considered in terms of its elements and in terms of certain technologies. Priority joint projects between Belarus and Russia in various sectors of the economy, primarily in microelectronics, mechanical engineering, and IT-industry, are highlighted.

Keywords: technology, technological sovereignty, cooperation, Union State, threats, risks.

Введение

В современных условиях продолжается процесс нарастающих внешних вызовов и угроз, что актуализирует необходимость выработки государственной политики, оперативно реагирующей на эти изменения. Запрет экспорта ряда товаров и технологий и ограничение доступа к результатам исследований мирового уровня приводит к сдерживанию технологического развития страны и рассматривается на уровне государства как внешняя угроза национальной безопасности в научно-технологической сфере [1].

Технологический суверенитет в странах Союзного государства: концепция и реализация

Зависимость от импорта высокотехнологичной продукции создает значительные риски для стран Союзного государства. В Республике Беларусь импортоемкость экономики превышает 60 % ВВП, а в России общая импортоемкость примерно вдвое ниже, но импортозависимость ее промышленного комплекса находится на весьма ощутимом уровне около 40 % [2]. Для Беларуси это может означать уязвимость к внешним шокам, таким как изменения в торговых отношениях или колебания цен на сырьевые товары, для России это может

привести к проблемам в промышленности, т. к. снижаются возможности для развития и модернизации производств.

Таким образом, для обеих стран важно развивать внутренние производственные мощности и технологии, чтобы снизить зависимость от импорта и повысить экономическую устойчивость.

Достижение технологического суверенитета является неотъемлемой частью национальной безопасности и рассматривается наравне с продовольственным, финансовым, образовательным и иными суверенитетами страны. Технологическому суверенитету отводится значительная роль в обеспечении стабильности и ускорении экономического развития [3–5].

Быстро меняющиеся внешние условия заставляют менять задачи и мотивы развития экономики, которые находят отражение в государственной политике. В 2022 году первоочередной задачей стала политика импортозамещения, которая была направлена на поиск специфических резервов производства товаров и услуг, заменяющих их зарубежные аналоги, и которая была ориентирована на инновации. Реализация этой политики в Беларуси и России дала свои результаты. Так, из перечня продукции, целесообразной для импортозамещения, страны ЕАЭС по 59 позициям обладают сравнительным преимуществом,

т. е. эта продукция конкурентоспособна на мировом рынке. Белорусские производители единолично или наряду с другими государствами союза способны производить 27 из 59 товаров [6, 7].

На сегодняшний день Беларусь и Россия продолжают совместную работу в области импортозамещения и она будет активизирована. Завершен подбор импортозамещающих проектов для реализации за счет средств российского госкредита на сумму 105 миллиардов рублей (3,65 млрд руб. Республики Беларусь), утверждены 27 паспортов проектов по импортозамещению, 19 из них уже в стадии реализации [7].

Но по мере ее развития становится понятно, что нельзя ограничиться импортозамещением, необходимо создание собственной технологической основы с целью снижения рисков взаимозависимости в области НТИ и ограничения международных потоков технологий, поскольку доступ к новым технологиям имеет решающее значение для суверенитета страны в целом. Таким образом необходим переход от импортозамещения к стратегии технологического развития с целью достижения технологического суверенитета. Достижение технологического суверенитета – это стратегическая задача экономической политики текущей реальности и обозримого будущего, решение которой предполагает владение определенным набором критических технологий. В стратегических документах стран Союзного государства определены приоритеты, направления и инструменты достижения поставленных задач.

За последние годы приняты ряд важнейших документов как на уровне стран, так и на межгосударственном уровне. Так, например в постановлении от 29 января 2024 г. № 2 "О Стратегии научно-технологического развития Союзного государства на период до 2035 года" определена цель: структурировать российско-белорусское научно-техническое сотрудничество и сформировать общий подход к созданию компетенций полного цикла: от подготовки студентов до коммерциализации технологий [8, 9]. Такая стратегия станет фундаментом для обеспечения конкурентоспособности Беларуси и России, технологического суверенитета двух стран.

Касательно технологического суверенитета, то сначала Россия в 2023 году приняла Концепцию технологического развития страны до 2030 года, а затем и Республика Беларусь разработала комплексный прогноз научно-технического прогресса на 2026–2030 годы и на период до 2045 года.

Многие исследователи согласны с мнением, что в научной литературе нет единого определения «технологического суверенитета», что наполнение содержания этого понятия сильно разнится от страны к стране и постоянно меняется в динамике. Продолжаются дискуссии о конкретизации как понятийного аппарата, так и способов его измерения, целей и инструментов по ее решению.

В российском нормативно-правовом поле, согласно Концепции технологического развития до 2030 года, технологический суверенитет определяется как «наличие в стране (под национальным контролем) критических и сквозных технологий собственных линий разработки и условий производства продукции на их основе, обеспечивающих устойчивую возможность государства и общества достигать собственные национальные цели развития и реализовывать национальные интересы».

Согласно постановлению Совета министров Республики Беларусь от 1 декабря 2023 г. № 855 «Об обеспечении технологического суверенитета» под технологическим суверенитетом Республики Беларусь понимается «способность Республики Беларусь располагать важными для обеспечения благосостояния населения и конкурентоспособности критическими технологиями (товарами), а также возможность их самостоятельно разрабатывать или получать от экономик других стран без односторонней структурной зависимости». В Концепции национальной безопасности (2024 год) сформулировано понятие научно-технологической безопасности как «состояние защищенности научно-технологического и образовательного потенциалов от угроз, препятствующих развитию научной деятельности, созданию и внедрению инноваций и передовых технологий в реальный сектор экономики и другие сферы» [1].

В российской научной литературе всё чаще звучит трактовка технологического суверенитета как «обменного фонда» технологий. Многие из авторов приводят определение Д. Эдлера, которое считают более полным определением. По его мнению, технологический суверенитет – это «способность государства или национального сообщества обладать технологиями, которые считаются критически важными для благосостояния, конкурентоспособности и иметь возможность разрабатывать или получать из других экономических регионов без односторонней структурной зависимости» [4].

Несмотря на различия в существующих трактовках технологического суверенитета, все они сходятся по двум позициям. Первая – технологический суверенитет обеспечивается как разработкой критических и сквозных технологий, так и производственными процессами на основе результатов этих НИОКР, что дает возможность эффективного противодействия со стороны государства внешним угрозам, направленным на критически важные отрасли. Вторая – технологический суверенитет не может быть абсолютным, его достижение сводится к некоему оптимальному уровню, когда технологическое взаимодействие с иностранными партнерами носит скорее вспомогательный характер или в ближайшей перспективе может быть существенно уменьшено.

Эффективно решить задачу достижения технологического суверенитета возможно только совместно со странами партнерами. Это, прежде всего, Союзное государство, ЕАЭС и в перспективе региональные союзы и площадки (ШОС, БРИКС). Направления реализации самые разнообразные: создание совместных научных лабораторий и центров, что не только улучшит качество исследований, но и создаст платформу для привлечения талантов и обмена опытом с международными партнерами; упрощение административных процедур; создание новых инновационных предприятий и другие [10].

Одним из ключевых инструментов для выполнения этой задачи является единая промышленная политика Союзных государств, зафиксированная Соглашением о единой промышленной политике от 15.02.2023 года и Соглашением между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Беларусь о научно-техническом и инновационном сотрудничестве от 27 марта 2023 года [11]. Особенно это важно в промышленном секторе, поскольку она дает возможность развивать собственные критически важные технологии и снижать зависимость от иностранных технологических решений на основе объединения научных исследований, технологических разработок и производственных мощностей двух стран. При этом страны могут избежать дублирования усилий, уменьшить издержки, рационально использовать трудовые ресурсы и повысить эффективность инвестиций за счет обмена технологиями и создания совместных предприятий.

В современных условиях большой объем необходимых материалов и технологий полностью способны производить и потреблять на своем рынке только немногие крупные страны (например, такие как США и Китай) или глобальные транснациональные корпорации. Все остальные страны участвуют в конкурентной борьбе за критически важные технологии. Даже максимально изолированные страны, такие как КНДР и Иран, активно эксплуатируют зарубежные технологии в стратегически важных для этих стран отраслях.

На современном этапе развития международной экономики промышленное господство Китая усилило стратегическую конкуренцию, особенно в критически важных технологиях, и вызвало растущую технологическую зависимость между экономикой Китая и странами ОЭСР. Промышленная переориентация России и Беларуси на Китай решает возникшие проблемы лишь частично. Во-первых, возникает риск оказаться в зависимости уже от КНР, а во-вторых, экономика КНР сильно зависит от западных рынков и не может игнорировать санкции в полном объеме. Примером может служить экспансия восточных партнеров и на белорусском, и на российском рынке автомобилей и грузовой техники. Динамика пугающая: за три месяца 2022 года доля брендов в сегменте грузовой техники из Китая в Россию составляла всего 9,5 %, за три месяца 2023 года увеличилась до 58 %. При этом рынок теряют как российские, так и белорусские производители.

Технологический суверенитет – это не изоляция экономики и государства в целом, а состояние, при котором обеспечивается высокий уровень национальной безопасности даже в условиях развития и углубленных интеграционных процессов, самостоятельное технологическое развитие с учетом международного баланса технологий и открытости к мировому банку науки и техники.

С точки зрения элементов технологического суверенитета выделяют, как правило, несколько направлений. Во-первых, все, что связано с производством вооружений, средств обороны; во-вторых, это энергетическая независимость, способность на территории страны производить необходимый объем электрической энергии; в-третьих, обеспечение продовольственной безопасности. Важными направлениями являются оказание качественной медицинской помощи и обладание медицинскими технологиями, также логистическая независимость, то есть свои технологии в транспортной отрасли, в пассажиро- и грузоперевозках [13]. По этим направлениям основные зада-

чи решены, но есть два важных направления, с которыми Беларуси надо действительно серьезно поработать. Первое – информационные технологии, которые дают возможность обладать высоким уровнем информационного развития, являющееся сегодня залогом глобальной конкурентоспособности, и второе направление – это владение технологиями в области создания средств производства уровне V–VI технологического уклада [14].

Если рассматривать процесс формирования и поддержания технологического суверенитета с точки зрения определенных технологий, здесь можно выделить так же три основных направления. Во-первых, разработка собственных или глубокая адаптация зарубежных технологий для производства продукции на территории страны. Во-вторых, максимизация роли разработанных или адаптированных технологий в производстве продукции или, иными словами, максимизация внутренней добавленной стоимости. В-третьих, насыщение внутреннего рынка технологичной продукцией отечественного производства или с высоким уровнем локализации производственных процессов. Таким образом, использование приоритетных, критических, сквозных или любых других технологий особой важности обеспечит создание конкурентоспособную продукцию, которая востребована как на внутреннем рынке, так в глобальной экономике. Множество аналитических и экспертных организаций (и международных, и национальных) стараются определить самые перспективные направления, на которых и необходимо сконцентрировать усилия. В каких-то деталях эти прогнозы отличаются, но в общем и целом вырисовался мировой консенсус: самые приоритетные векторы – нанотехнологии и новые материалы, микроэлектроника, прорывные алгоритмы работы с большими данными (BigData), биотехнологии, искусственный интеллект.

С точки зрения обеспечения технологического суверенитета наибольший интерес вызывает реализация проектов в области микроэлектроники и машиностроения, в частности станкостроения. Особое место в создании технологического суверенитета экономики занимает микроэлектроника, которая является одной из стратегических направлений развития любой страны. Об этом может свидетельствовать тот факт, что ведущие страны мира в ближайшие пять лет инвестируют в эту отрасль на локализацию производств огромные средства. Китай инвестирует в эту отрасль до 1,4 трлн долларов, Южная Корея – 112 млрд долларов, США – 52 млрд долларов, Европа – 47 млрд долларов, Индия – не менее 30 млрд долларов [15].

Это базовая особо наукоемкая отрасль для всего промышленного комплекса, включающая производство материалов для технологий и машин (от сверхчистых полупроводников до специфических резисторов – более 7000 наименований), электронное машиностроение и др. Она носит системообразующий характер для достижения всеобъемлющего технологического суверенитета. В Республике Беларусь утверждена программа развития микроэлектронной промышленности на период до 2030 года, на реализацию которой будет направлено более 1 млрд рублей (около 327 млн долларов). Суммарный объем выручки от реализации продукции отечественной микроэлектроники и электронного машиностроения в 2025 году вырастет до 200 миллионов долларов. К 2030 году достигнет 330–350 миллионов долларов и увеличится по сравнению с 2021 годом в 3,3 раза. Главным партнером в этой сфере выступает Россия, совместно с которой сформирован перечень критически важной компонентной базы, которая будет производиться на белорусских суперсовременных предприятиях ("Планар" и "Интеграл") и уже согласована дорожная карта развития [20].

Совместная работа в данных областях не только повысит конкурентоспособность созданной продукции на мировом рынке, позволит добиться эффективного импортозамещения и технологического суверенитета государств, но и будет иметь мультипликационные эффекты на все сферы экономики и жизни граждан наших стран.

Особой место в создании технологического суверенитета занимают IT-отрасли, задачей которых стоит замещения программного обеспечения из недружественных стран на предприятиях Беларуси и России и создание IT-ландшафт на основе программного обеспечения, используемого основными белорусскими и российскими промышленными предприятиями, что создаст возможность для бесперебойного функционирования критической инфраструктуры Союзного государства (промышленности, банковского сектора, энергетики, органов государственной власти) и обеспечения [16, 17]. Данное направление способствует выстраиванию собственной научно-технологической цепочки во всех производственно-технологических сферах Союзного государства.

Заключение

Успешное сотрудничество между Беларусью и Россией в области технологий является важным шагом к достижению технологического суверенитета. Создание совместных исследовательских центров, обмен опытом и ресурсами позволят странам более эффективно развивать свои технологические возможности.

Технологический суверенитет стран Союзного государства является необходимым условием для обеспечения устойчивого экономического роста. Инвестирование в собственные технологии, поддержка инновационного сектора и стратегическое сотрудничество между странами помогут минимизировать риски и повысить конкурентоспособность на международной арене. В условиях быстро меняющегося мира важно не только развивать технологии, но и обеспечивать их защиту, что станет залогом стабильности.

Список цитированных источников

1. Концепция национальной безопасности Республики Беларусь / Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 26.04.2024, 1/21360. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=P924v0005> (дата обращения: 09.10.2024).
2. Импортзамещение активно вводится в Беларуси / Экономическая газета. – № 35 (2631) от 12.05.2023. – URL: <https://neg.by/novosti/otkryti/i> (дата обращения: 01.10.2024).
3. Афанасьев, А. А. Технологический суверенитет: варианты подходов к рассмотрению проблемы / А. А. Афанасьев // Вопросы инновационной экономики. – 2023. – Том 13, № 2. – С. 689–706.
4. Хмелева, Г. А. Технологический суверенитет как инструмент обеспечения устойчивого развития экономики региона в условиях санкций / Г. А. Хмелева // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 3. – URL: <https://esj.today/PDF/64ECVN323.pdf> (дата обращения: 12.10.2024). – DOI: 10.15862/64ECVN323.
5. Петров, М. Н. Технологический суверенитет: основные принципы концепции национальной научно-технологической безопасности / М. Н. Петров, Я. С. Филиппов // Вопросы инновационной экономики. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 1185–1198.
6. Медведева, Г. Б. Промышленная кооперация в интеграционных процессах регионов России и Беларуси / Г. Б. Медведева, Л. А. Захарченко // Фотинские чтения – 2023 (осеннее собрание) : Сборник материалов X Международной научно-практической конференции, Ижевск, 23–25 ноября 2023 года. – Ижевск : Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова, 2024. – С. 59–65. – EDN: SMUWEJ.
7. Гриц, Г. Экономическая безопасность: от импортозамещения – к технологическому суверенитету. – URL: <https://belta.by/comments/view/ekonomicheskaja...> (дата обращения: 27.09.2024).
8. О Стратегии научно-технологического развития Союзного государства на период до 2035 года : постановление от 29 января 2024 г. № 2 / Информационно аналитический портал союзного государства. – URL: <https://soyuz.by> (дата обращения: 09.10.2024).
9. Об обеспечении технологического суверенитета : постановление Совета Министров Республики Беларусь 1 декабря 2023 г. № 855 / Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 06.12.2023, 5/52473. – URL: <https://pravo.by/document> (дата обращения: 09.10.2024).
10. Медведева, Г. Б. Реализация цифровой стратегии стран ЕАЭС: опыт и проблемы / Г. Б. Медведева, Л. А. Захарченко // Фотинские чтения – 2023 (весеннее собрание) : сборник материалов юбилейной, X Междунар. науч.-практ. конф., Ижевск, 23–25 марта 2023 года. – Ижевск : Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2023. – С. 64–71. – EDN: BSFAYW.
11. Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Беларусь о научно-техническом и инновационном сотрудничестве от 27 марта 2023 года. / Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=A02300002> (дата обращения: 09.10.2024).

12. Медведева, Г. Б. Цифровизация как фактор развития трансграничных автомобильных перевозок стран ЕАЭС: опыт и проблемы / Г. Б. Медведева, В. В. Зазерская, Л. А. Захарченко // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сборник научных трудов : в 2 т. / Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет ; редкол.: Т. В. Матюшинец (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2023. – Т. 2. – С. 247–255.
13. Богдан, Н. И. Особенности формирования технологического суверенитета на современном этапе развития / Н. И. Богдан // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2023. – № 3 (46). – С. 124–132. – DOI: 10.24412/2079-7958-2023-3-124-132. – EDN: IZPQOT.
14. Горячева, Т. В. Роль и место технологического суверенитета в обеспечении устойчивости экономики России / Т. В. Горячева, О. А. Мызрова // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Экономика. Управление. Право. – 2023. – Т. 23, Вып. 2. – С. 134–145. – DOI: 10.18500/1994-2540-2023-23-2-134-145. – EDN: GHNDZK.
15. Ермакова, Э. Э. Активность интеллектуальной деятельности в инновационной сфере Беларуси / Э. Э. Ермакова, Г. Б. Медведева, Л. А. Захарченко // Решетневские чтения : материалы XXVI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 09–11 ноября 2022 года / под общей ред. Ю. Ю. Логинова. – Ч. 2. – Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, 2022. – С. 474–476. – EDN: XWZABY.
16. Медведева, Г. Б. Влияние цифровых инструментов на интеграцию бизнес-процессов в цепях поставок / Г. Б. Медведева, Л. А. Захарченко // Логистика: современные тенденции развития : Материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 04–05 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург : Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2024. – С. 51–59. – EDN: NOFWWY.
17. Сморгун, Л. В. Доказательная политика технологического суверенитета и ее дизайн / Л. В. Сморгун // Южно-российский журнал социальных наук. – 2022. – Т. 23, № 3. – С. 6–19.
18. Астахова, С. Белоруссия: сотрудничество с Россией в условиях санкций / С. Астахова. – DOI: 10.20542/2073-4786-2023-2-103-11.
19. Добрынина, Е. Досье: космические проекты России и Беларуси / Е. Добрынина // Евразия.Эксперт. – URL: <https://eurasia.expert/dose-kosmicheskieproekty-rossii-i-belarusi> (дата обращения: 12.10.2024).
20. Петров, М. Н. Технологический суверенитет: эволюция Российских и зарубежных экономических моделей / М. Н. Петров, Я. С. Филиппов // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2023. – Том 13, № 5А. – С. 305–314. – DOI: 10.34670/AR.2023.38.40.116.
7. Gric, G. Ekonomicheskaya bezopasnost': ot importozameshcheniya – k tekhnologicheskomu suverenitetu. – URL: <https://belta.by/comments/view/ekonomicheskaja-...> (data obrashcheniya: 27.09.2024).
8. O Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Soyuznogo gosudarstva na period do 2035 goda : postanovlenie ot 29 yanvarya 2024 g. № 2 / Informacionno analiticheskij portal soyuznogo gosudarstva. – URL: <https://soyuz.by> (data obrashcheniya: 09.10.2024).
9. Ob obespechenii tekhnologicheskogo suvereniteta : postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' 1 dekabrya 2023 g. № 855 / Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus', 06.12.2023, 5/52473. – URL: <https://pravo.by/document> (data obrashcheniya: 09.10.2024).
10. Medvedeva, G. B. Realizaciya cifrovoy strategii stran EAES: opyt i problemy / G. B. Medvedeva, L. A. Zaharchenko // Fotinskie chteniya – 2023 (vesennee sobranie) : sbornik materialov yubilejnoy, X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Izhevsk, 23–25 marta 2023 goda. – Izhevsk : Izhevskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni M. T. Kalashnikova, 2023. – S. 64–71. – EDN: BSFAWY.
11. Soglasenie mezhdru Pravitel'stvom Rossijskoj Federacii i Pravitel'stvom Respubliki Belarus' o nauchno-tekhnicheskome i innovacionnom sotrudnichestve ot 27 marta 2023 goda. / Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=A02300002> (data obrashcheniya: 09.10.2024).
12. Medvedeva, G. B. Cifrovizaciya kak faktor razvitiya transgranichnyh avtomobil'nyh perevozok stran EAES: opyt i problemy / G. B. Medvedeva, V. V. Zazerskaya, L. A. Zaharchenko // Avtotraktorostroenie i avtomobil'nyj transport : sbornik nauchnyh trudov : v 2 t. / Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet, Avtotraktornyj fakul'tet ; redkol.: T. V. Matyushinec (otv. red.) [i dr.]. – Minsk : BNTU, 2023. – T. 2. – S. 247–255.
13. Bogdan, N. I. Osobennosti formirovaniya tekhnologicheskogo suvereniteta na sovremennom etape razvitiya / N. I. Bogdan // Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2023. – № 3 (46). – S. 124–132. – DOI: 10.24412/2079-7958-2023-3-124-132. – EDN: IZPQOT.
14. Goryacheva, T. V. Rol' i mesto tekhnologicheskogo suvereniteta v obespechenii ustojchivosti ekonomiki Rossii / T. V. Goryacheva, O. A. Myzrova // Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Ekonomika. Upravlenie. Pravo. – 2023. – T. 23, Vyp. 2. – S. 134–145. – DOI: 10.18500/1994-2540-2023-23-2-134-145. – EDN: GHNDZK.
15. Ermakova, E. E. Aktivnost' intellektual'noj deyatel'nosti v innovacionnoj sfere Belarusi / E. E. Ermakova, G. B. Medvedeva, L. A. Zaharchenko // Reshetnevskie chteniya : materialy XXVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoj pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M. F. Reshetneva. V 2-h chastyah, Krasnoyarsk, 09–11 noyabrya 2022 goda / pod obshchej red. YU. YU. Loginova. – CH. 2. – Krasnoyarsk : Sibirskij gosudarstvennyj universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M. F. Reshetneva, 2022. – S. 474–476. – EDN: XWZABY.
16. Medvedeva, G. B. Vliyaniye cifrovyyh instrumentov na integraciyu biznes-processov v cepyah postavok / G. B. Medvedeva, L. A. Zaharchenko // Logistika: sovremennyye tendencii razvitiya : Materialy XXIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Sankt-Peterburg, 04–05 aprelya 2024 goda. – Sankt-Peterburg : Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo floty im. admirala S. O. Makarova, 2024. – S. 51–59. – EDN: NOFWWY.
17. Smorgunov, L. V. Dokazatel'naya politika tekhnologicheskogo suvereniteta i ee dizajn / L. V. Smorgunov // YUzhno-rossijskij zhurnal social'nyh nauk. – 2022. – T. 23, № 3. – S. 6–19.
18. Astahova, S. Belorussiya: sotrudnichestvo s Rossiej v usloviyah sankcij / S. Astahova. – DOI: 10.20542/2073-4786-2023-2-103-11.
19. Dobryrina, E. Dos'e: kosmicheskie proekty Rossii i Belarusi / E. Dobryrina // Evraziya.Ekspert. – URL: <https://eurasia.expert/dose-kosmicheskieproekty-rossii-i-belarusi> (data obrashcheniya: 12.10.2024).
20. Petrov, M. N. Tekhnologicheskij suverenitet: evolyuciya Rossijskikh i zarubezhnyh ekonomicheskikh modelej / M. N. Petrov, YA. S. Filippov // Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra. – 2023. – Tom 13, № 5A. – S. 305–314. – DOI: 10.34670/AR.2023.38.40.116.

References

1. Konceptiya nacional'noj bezopasnosti Respubliki Belarus' / Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus', 26.04.2024, 1/21360. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=P924v0005> (data obrashcheniya: 09.10.2024).
2. Importozameshchenie aktivno vvoditsya v Belarusi / Ekonomicheskaya gazeta. – № 35 (2631) ot 12.05.2023. – URL: <https://neg.by/novosti/otkryti/i> (data obrashcheniya: 01.10.2024).
3. Afanas'ev, A. A. Tekhnologicheskij suverenitet: varianty podhodov k rassmotreniyu problemy / A. A. Afanas'ev // Voprosy innovacionnoj ekonomiki. – 2023. – Tom 13, № 2. – S. 689–706.
4. Hmeleva, G. A. Tekhnologicheskij suverenitet kak instrument obespecheniya ustojchivogo razvitiya ekonomiki regiona v usloviyah sankcij / G. A. Hmeleva // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2023. – T. 15, № 3. – URL: <https://esj.today/PDF/64ECVN323.pdf> (data obrashcheniya: 12.10.2024). – DOI: 10.15862/64ECVN323.
5. Petrov, M. N. Tekhnologicheskij suverenitet: osnovnye principy koncepcii nacional'noj nauchno-tekhnologicheskoy bezopasnosti / M. N. Petrov, YA. S. Filippov // Voprosy innovacionnoj ekonomiki. – 2023. – T. 13, № 3. – S. 1185–1198.
6. Medvedeva, G. B. Promyshlennaya kooperaciya v integracionnyh processah regionov Rossii i Belarusi / G. B. Medvedeva, L. A. Zaharchenko // Fotinskie chteniya – 2023 (osennee sobranie) : Sbornik materialov X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Izhevsk, 23–25 noyabrya 2023 goda. – Izhevsk : Izhevskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. M. T. Kalashnikova, 2024. – S. 59–65. – EDN: SMUWEJ.

Материал поступил 12.10.2024, одобрен 18.10.2024, принят к публикации 18.10.2024

УДК 331.101

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ДВИЖЕНИЕ ТРУДОВЫХ РЕСУРСОВ РЕГИОНА: МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ

Т. Д. Захарчук

Аспирант, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: tdzaharchuk@bstu.by

Реферат

В статье дан обзор исследований зарубежных и отечественных ученых по проблемам рационального использования трудовых ресурсов. Рассмотрены основные определения понятия «трудовые ресурсы» и представлены основные фазы движения трудовых ресурсов в регионе: фаза формирования трудовых ресурсов, фаза распределения, фаза обмена, фаза использования. Проанализированы и рассмотрены основные черты движения трудовых ресурсов, характеристики и факторы, влияющие на циркуляцию трудовых ресурсов в регионе (социально-экономические, социально-структурные, институциональные), а также особенности механизма управления этими процессами. Уделено внимание естественным и миграционным факторам, влияющим на процесс движения рабочей силы. На основе проведенного анализа выявлен основной механизм управления процессами движения трудовых ресурсов в регионе. Проведен сводный анализ трудовых ресурсов на основе статистических данных Брестской области. На рынок труда региона в настоящее время оказывают сильное влияние два фактора: отток специалистов и высококвалифицированных рабочих в соседние страны, где заработная плата по их специальностям существенно выше, и отток работников с низкооплачиваемых должностей.

Для обеспечения рациональной полной занятости трудоспособного населения и соответствия рабочих мест общей численности рабочей силы и ее качественному составу необходим соответствующий механизм управления. Выявлены проблемы управления человеческими ресурсами и представлен механизм управления человеческими ресурсами в регионе. Рациональное использование трудовых ресурсов на предприятии оказывает существенное влияние на эффективность производственного процесса и на качественные показатели выпускаемой продукции.

Формирование трудовых ресурсов в ближайшей перспективе столкнется с абсолютным сокращением численности трудовых ресурсов, вызванным ростом естественной убыли населения. Все это говорит о необходимости продуманной демографической политики, которую следует рассматривать как часть социально-экономической политики.

Ключевые слова: трудовые ресурсы, механизм управления трудовыми ресурсами, движение, воспроизводство, трудовая мобильность, трудоспособность, производительность труда.

USE AND MOVEMENT OF LABOR RESOURCES IN THE REGION: MANAGEMENT MECHANISM

T. D. Zakharchuk

Abstract

The article provides an overview of the research of foreign and domestic scientists on the problems of rational use of labor resources. The main definitions of the concept of "labor resources" are considered and the main phases of the movement of labor resources in the region are presented: the phase of formation of labor resources, the phase of distribution, the phase of exchange, the phase of use. The main features of the movement of labor resources, the characteristics and factors influencing the circulation of labor resources in the region (socio-economic, socio-structural, institutional), as well as the features of the mechanism for managing these processes are analyzed and considered. Attention is paid to natural and migration factors influencing the process of labor movement. Based on the analysis, the main mechanism for managing the processes of labor force movement in the region is identified. A consolidated analysis of labor resources is carried out based on statistical data of the Brest region. The labor market of the region is currently strongly influenced by two factors: the outflow of specialists and highly skilled workers to neighboring countries, where wages for their specialties are significantly higher, and the outflow of workers from low-paid positions.

To ensure rational full employment of the working population and compliance of jobs with the total number of labor force and its qualitative composition, an appropriate management mechanism is required. The problems of human resource management are identified and a mechanism for human resource management in the region is presented. Rational use of labor resources at the enterprise has a significant impact on the efficiency of the production process and on the quality indicators of the manufactured products.

The formation of labor resources in the near future will face an absolute reduction in the number of labor resources caused by the growth of natural population decline. All this indicates the need for a well-thought-out demographic policy, which should be considered as part of the socio-economic policy.

Keywords: labor resources, labor resource management mechanism, movement, reproduction, labor mobility, working capacity, labor productivity.

Введение

В современном мире кадры становятся наиболее ценным активом предприятия. Это является закономерным следствием социальных трансформаций, происходящих в современном белорусском обществе. Особенно актуален вопрос эффективного использования трудовых ресурсов. В настоящее время человеческие ресурсы играют приоритетную роль в достижении конкурентных преимуществ как в рамках отдельных организаций, так и в национальной и региональной экономике, влияют на темпы экономического роста и возможности инновационного развития. Важным фактором повышения эффективности управления трудовым вкладом работника в хозяйственную деятельность организации является оценка персонала на основе научно обоснованных критериев [10].

Большое внимание исследованию вопросов, связанных с трудовыми ресурсами, уделяется в экономической науке. Вопросам рационального использования трудовых ресурсов, демографическим

аспектам занятости, эффективности использования трудовых ресурсов посвящены научные труды В. П. Крюкова, Б. Д. Бреева, А. Г. Коровкина, В. Г. Костакова [4].

Глубокое и всестороннее исследование процессов воспроизводства трудовых ресурсов было проведено рядом зарубежных ученых и отечественных: А. И. Воропаевым, А. И. Добрышиным, С. А. Дятловым, Т. И. Заславской, Е. Ф. Злобиным, М. М. Критским, Л. Г. Симкиной Ю. С. Шатовицкой, О. А. Пашкевич и др. Значительный вклад в разработку теоретических и методологических основ формирования и использования трудовых ресурсов в регионах внесли В. В. Гуров, Г. Г. Котов, Е. С. Русаев, В. В. Сафронов, Р. В. Смекалов и др. [1]. Проблемы формирования эффективного механизма воспроизводства и использования трудовых ресурсов нашли отражение в работах М. И. Иванова, Э. Н. Кузьбожева, Л. Г. Згонник, И. В. Мипаковой, С. В. Штразбург и других [2].

В некоторых исследованиях понятие «трудовые ресурсы» понималось как живая рабочая сила, т. е. происходило его отождествление. В настоящее время под трудовыми ресурсами понимается часть населения страны (региона), представленная физическими лицами, которые обладают необходимыми физическими и умственными способностями, профессиональной подготовкой и квалификацией для работы в общественном производстве [6].

На основе критического анализа различных взглядов на определение дефиниций «трудовые ресурсы», под ними будем понимать ресурсы, которые формируются и развиваются в определённых социально-экономических условиях, независимо от пола, возраста и других признаков, имеют способность к производству такого объёма товаров и услуг, необходимого для удовлетворения потребностей населения, его расширенного воспроизводства и обеспечения эффективного развития экономики региона, страны.

Первостепенную роль трудовые ресурсы играют в социально-экономическом развитии хозяйственной деятельности региона, а как экономическая категория выражают экономические отношения, складывающиеся в ходе формирования, распределения, перераспределения и использования трудоспособного населения. Традиционно в состав трудовых ресурсов включают население, занятое в экономике или способное трудиться, но не работающее по тем или иным причинам [9]. В состав трудовых ресурсов включается трудоспособное население в трудоспособном возрасте и работающие лица старше и младше трудоспособного возраста. Основное пополнение трудовых ресурсов происходит за счёт населения моложе трудоспособного возраста, и определяется оно в значительной степени демографическими процессами, происходящими в регионе и стране.

Движение трудовых ресурсов в регионе

Движение трудовых ресурсов – сложный социально-демографический и экономический процесс. Существует ряд форм движения трудовых ресурсов, в том числе их воспроизводство. Для выявления этой формы движения будем использовать «пофазный» подход. Задача – определить функции каждой фазы воспроизводства трудовых ресурсов, показать, как они реализуются в экономике, и на этой основе выявить закономерности движения трудовых ресурсов [4].

1. Фаза формирования трудовых ресурсов – это процесс постоянного обновления численности трудовых ресурсов. Изучение проблемы формирования трудовых ресурсов в региональных усло-

виях предполагает выявление закономерностей и особенностей, условий, тенденций и факторов, определяющих воспроизводство населения и трудовых ресурсов. Знание регионального механизма формирования трудовых ресурсов позволяет выяснить, в какой степени, какими средствами, какими методами можно улучшить региональную практику управления этой системой.

2. Фаза распределения – определяет размещение трудовых ресурсов по территориям, сферам деятельности, отраслям и предприятиям. Целью фазы распределения является соответствие общей численности рабочей силы потребностям экономики. На этой фазе управление состоит из следующих компонентов: управление занятостью, регулирование первичного распределения труда и управление перераспределением рабочей силы.

3. Фаза обмена – происходит на рынке труда, где трудовые ресурсы, поступая на стадию купли-продажи, становятся рабочей силой.

4. Фаза использования – является завершающей фазой воспроизводства трудовых ресурсов. Она осуществляется в процессе трудовой деятельности и реализации трудовой мощности, в процессе производства материальных и духовных благ и услуг. Целью этой фазы является обеспечение эффективной занятости и создание условий для ее рационального и высокопроизводительного использования.

Воспроизводство населения и его трудоспособной части неразрывно связано с его движением, под которым понимается любое количественное, качественное, структурное и пространственное изменение. Общая численность рабочей силы постоянно претерпевает такие изменения. Изменяются общая численность трудовых ресурсов и экономически активного населения, их социальная и профессионально-квалификационная структура. Происходит перемещение работников между сферами деятельности, регионами страны, отраслями, отдельными организациями и рабочими местами [3]. Готовность и способность населения менять социальный статус, профессиональную принадлежность и место жительства характеризуются понятием «мобильность населения» [11]. По отношению к рабочей силе, т. е. экономически активной части населения, употребляется термин «трудовая мобильность» [11]. Изучение мобильности позволяет выявить условия и факторы перемещения трудовых ресурсов в пределах региона.

Движение населения и трудовых ресурсов осуществляется в различных формах и имеет свои факторы.

Выделим ряд факторов, влияющих на движение рабочей силы (рисунок 1).



Рисунок 1 – Факторы, влияющие на движение трудовых ресурсов

На рисунке показано влияние факторов на движение трудовых ресурсов. Региональные особенности влияют на формирование и использование трудовых ресурсов. В первую очередь они связаны с влиянием демографических и социально-экономических факторов.

Рынок труда тесно связан с общей демографической динамикой. Республика Беларусь, как и большинство развитых стран, сталкивается с проблемой старения населения и, как следствие, сокращения численности занятых в экономике.

В Брестской области увеличивается доля населения трудоспособного возраста, а других категорий — уменьшается, что означает увеличение демографической нагрузки на трудоспособное население. Исходя из статистических данных, численность населения Брестской области существенно сократилась [15, 19].

На основе анализа основных показателей, характеризующих состояние и естественное движение населения региона за период 2019–2023 гг. (таблица 1), видно, что численность населения трудоспособного возраста за последний год сократилась, что вызвало дефицит рабочей силы в Брестской области [15, 16, 17, 18, 19, 20]. Анализ показателей социального движения населения (таблица 1) свидетельствует о снижении численности занятых в экономике и низком уровне безработицы в регионе.

Таблица 1 – Показатели социального движения населения Брестского региона за 2019–2023 гг.

Наименование показателя	Годы				
	2019	2020	2021	2022	2023
Занятые, тыс. человек	21,11	17,90	16,51	17,92	20,81
Безработные, тыс. человек	2,30	1,70	1,40	1,20	1,00
Численность безработных зарегистрированных в службах занятости, тыс. человек	1,42	1,19	0,95	0,84	0,76
Соотношение официально зарегистрированных безработных и занятых	6,73	6,64	5,77	4,69	3,64

В регионе на рынке труда в настоящее время сильное влияние оказывают два фактора: отток специалистов и высококвалифицированных рабочих в соседние страны, где уровень оплаты труда по их специальностям существенно выше, и отток работников с низкооплачиваемых должностей [20].

Основными причинами дефицита трудовых ресурсов региона на рынке труда являются:

- сокращение численности населения в целом и трудоспособного населения в частности. Отрицательное влияние оказывают как естественная убыль населения, так и миграция (прежде всего внутренняя — наиболее активная часть населения стремится переехать в столицу, что снижает потенциал региона в настоящее время и в перспективе);
- дисбаланс в подготовке специалистов, стремление молодежи получать обязательно высшее образование и по узкому спектру специальностей. В результате — на рынке труда уже несколько лет наиболее востребованными профессиями являются рабочие профессии;
- низкий интерес специалистов, особенно молодежи, к работе в сельской местности и малых городах;
- непривлекательные условия оплаты труда.

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы: показатели каждой из обозначенных групп, составляющих сущность трудовых ресурсов, существенно влияют на социально-экономическое развитие региона.

Механизм управления трудовыми ресурсами региона

Объектом управления трудовыми ресурсами региона являются отношения по поводу их формирования, распределения и использования. Роль субъектов управления играет определенная совокупность органов исполнительной власти, учебных заведений, предприятий и организаций региона. На современном этапе субъектом управления являются законодательные исполнительные органы

государства, профсоюзы, другие общественные организации и трудовые коллективы.

Администрация региона сосредоточена на стратегических вопросах: разработке нормативно-правовой базы и методических документов, координации действий всех подчиненных подразделений. Определен и разработан весь комплекс основных задач управления человеческими ресурсами.

Для полноценной реализации главной цели — обеспечения рациональной занятости активного населения и соответствия рабочих мест общей численности рабочей силы, ее качественному составу — необходим соответствующий механизм управления.

По мнению А. З. Дадашева: «Механизм управления трудовыми ресурсами представляет собой динамичную совокупность социальных, организационных, экономических мер, осуществление которых, во-первых, нацелено на производство и всестороннее развитие первой производительной силы — человека, формирование у него способностей к труду; во-вторых, направлено на обеспечение потребностей экономики в необходимой рабочей силе» [5].

Рыночная экономика предполагает развитие социально-экономического процесса, являющегося дополнительным органическим влиянием государственного управления, который является механизмом экономики.

Принципы работы механизма управления: направленность на систему, реализация тактики и стратегии; организационная интеграция механизма функционирования системы; комплексные и динамичные программы, ориентированные на формирование и развитие трудовых ресурсов их адаптации к изменяющимся условиям [12].

Механизм использования различных ресурсов для работы в регионе, включающий в себя обычные компоненты [7]:

- 1) субъект управления — органы, реализующие региональную политику;
- 2) объект управления — трудовые ресурсы региона и его элементы, на которые направлено управленческое воздействие;
- 3) содержание управления (региональная политика и др.);
- 4) ресурсы (финансовые, информационные, административные).

При создании механизма управления трудовыми ресурсами региона необходимо провести анализ условий и региональных факторов. Например, состав и структура ресурсов для работы продолжают работать в режиме многих внешних и внутренних факторов. Важную роль играют социально-экономическая ситуация в стране, политический курс и программы, проводимые государством [21]. Многие из них оказывают большее влияние на воспроизводство населения, создавая основу для воспроизводства трудовых ресурсов или проявления характеристик уровня труда, а также играют ключевую роль в социально-экономическом развитии региона.

Механизм управления и использования трудовых ресурсов на региональном рынке труда является причиной необходимости контроля и координации процессов изменения и состояния социально-экономического развития региона, своевременного определения рисков и принятия мер на повышение уровня использования трудовых ресурсов.

Комплексная целевая программа регулирования движения трудовых ресурсов в регионе должна включать сбалансированную систему мер по эффективному регулированию демографической ситуации. Мероприятия комплексной программы направляются на стабилизацию численности постоянного населения, улучшение здоровья населения, прежде всего детей, подростков, женщин репродуктивного возраста, снижение смертности мужчин в трудоспособном возрасте, создание оптимальных условий для укрепления семьи.

В предлагаемом механизме распределение трудовых ресурсов региона осуществляется по конкретным субъектам хозяйствования, причём определённые признаки этих субъектов хозяйствования (форма собственности, отрасль производства и др.) будут характеризовать и основные направления распределения трудовых ресурсов. Многосторонний учёт направлений и признаков распределения трудовых ресурсов играет огромную роль в построении механизма управления. В связи с этим при формировании механизма управления движением трудовых ресурсов особое внимание следует уделить вопросам построения целевой региональной комплексной программы развития трудовых ресурсов.

Заключение

Таким образом, формирование трудовых ресурсов в ближайшей перспективе столкнется с абсолютным снижением численности трудовых ресурсов, вызванным ростом естественной убыли населения. Все это говорит о том, что необходима продуманная демографическая политика, которую следует рассматривать как часть социально-экономической политики региона, страны. При этом управление человеческими ресурсами в регионе должно включать следующие направления: развитие методологии управления, углубление ее теоретической базы; уточнение целей и задач на ближайший период времени и на перспективу; качественное совершенствование структуры субъекта управления; совершенствование применяемых форм и методов управления; получение более полной информации о состоянии и движении управляемого объекта.

Проведенный анализ выделил ряд социально-экономических факторов, оказывающих влияние на естественную составляющую процесса формирования и использования трудовых ресурсов в регионе: уровень доходов на душу населения, обеспеченность жильем, качество медицинской помощи, уровень и качество образовательных услуг, а также уровень занятости населения. Анализ показал, что на рост трудовой миграции влияют следующие факторы: обеспеченность рабочими местами, обеспеченность жильем, социальная защита населения.

Список цитированных источников

- Акулич, В. В. Анализ трудовых ресурсов / В. В. Акулич // Справочник экономиста. – 2004. – № 6. – С. 54–58.
- Бреев, Б. Д. Подвижность населения и трудовых ресурсов / Б. Д. Бреев. – М., 1977. – 187 с.
- Будаева, Д. Ц. Регулирование процессов воспроизводства населения региона в современных условиях: автореф. канд. экон. н. / Д. Ц. Будаева. – М., 2006. – 26 с.
- Власова, Е. А. Анализ показателей движения трудовых ресурсов в российской экономике / Е. А. Власова // Вопросы статистики. – 2010. – № 5. – С. 44–50.
- Дадасhev, А. З. Управление трудовыми ресурсами в крупном городе (теоретико-методологические и прикладные аспекты): дисс. д-ра экон. н. / А. З. Дадасhev. – М., 1994. – 345 с.
- Захаров, А. Н. Современное состояние и проблемы эффективности использования трудовых ресурсов в сельскохозяйственных организациях / А. Н. Захаров // Вестник НГИЭИ. – 2014. – № 11 (42). – С. 26–41.
- Зенькова, И. В. Проблемы сбалансированности на рынке труда / И. В. Зенькова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Д. Экон. и юрид. науки. – 2004. – № 9. – С. 62–65.
- Кибанова, А. Я. Управление персоналом организации: учебник / А. Я. Кибанова ; под ред. А. Я. Кибановой. – 4-е изд., доп. и перераб. – М. : ИНФРА-М, 2010. – 695 с.
- Кондратова, И. Г. Анализ использования трудовых ресурсов как важнейшей части ресурсного потенциала организации / И. Г. Кондратова // Экономический анализ: теория и практика. – 2010. – № 1. – С. 32–37.
- Моргун, Е. Б. Управление персоналом: исследование, оценка, обучение / Е. Б. Моргун. – М. : Академия, 2017. – 264 с.
- Нестерова, А. А. Трудовая мобильность населения в условиях региональной интеграции / А. А. Нестерова. – Минск : БГУ, 2020. – 135 с.
- Овчинникова, Т. И. Новая парадигма управления персоналом в условиях переходной экономики / Т. И. Овчинникова // Управление персоналом. – 2018. – № 7. – С. 34–39.
- Павлова, С. Н. Информационное обеспечение при прогнозировании потребности в специалистах в отрасли региона / С. Н. Павлова // Региональная экономика: теория и практика. – 2011. – № 23. – С. 44–49.
- Пронина, М. А. Анализ использования трудовых ресурсов / М. А. Пронина, С. Г. Саенко, А. Г. Зайцева // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2015. – № 9. – С. 83–86.
- Регионы Республики Беларусь. Брестская область: статистический сборник: статистический ежегодник. – Минск, 2019.
- Регионы Республики Беларусь. Брестская область: статистический сборник: статистический ежегодник. – Минск, 2020.
- Регионы Республики Беларусь. Брестская область: статистический сборник: статистический ежегодник. – Минск, 2021.
- Регионы Республики Беларусь. Брестская область: статистический сборник: статистический ежегодник. – Минск, 2022.
- Регионы Республики Беларусь. Брестская область: статистический сборник: статистический ежегодник. – Минск, 2023.
- Царенко, И. В. Принципы регулирования трудовых ресурсов для эффективного социально-экономического развития региона / И. В. Царенко // Пенитенциарная система и общество: опыт взаимодействия: сб. матер. VI Междунар. науч.-практ. конф., Пермь, 02–04 апреля 2019 г. – Пермь : Пермский институт Федеральной службы исполнения наказаний, 2019. – С. 180–185.

References

- Akulich, V. V. Analiz trudovykh resursov / V. V. Akulich // Spravochnik ekonomista. – 2004. – № 6. – S. 54–58.
- Breev, B. D. Podvizhnost' naseleniya i trudovykh resursov / B. D. Breev. – M., 1977. – 187 s.
- Budaeva, D. C. Regulirovanie processov vosproizvodstva naseleniya regiona v sovremennykh usloviyakh: avtoref. kand. ekon. n. / D. C. Budaeva. – M., 2006. – 26 s.
- Vlasova, E. A. Analiz pokazatelej dvizheniya trudovykh resursov v rossijskoj ekonomike / E. A. Vlasova // Voprosy statistiki. – 2010. – № 5. – S. 44–50.
- Dadashev, A. Z. Upravlenie trudovymi resursami v krupnom gorode (teoretiko-metodologicheskie i prikladnye aspekty): diss. d-ra ekon. n. / A. Z. Dadashev. – M., 1994. – 345 s.
- Zaharov, A. N. Sovremennoe sostoyanie i problemy effektivnosti ispol'zovaniya trudovykh resursov v sel'skhozaystvennykh organizatsiyah / A. N. Zaharov // Vestnik NGIEI. – 2014. – № 11 (42). – S. 26–41.
- Zen'kova, I. V. Problemy sbalansirovannosti na rynke truda / I. V. Zen'kova // Vestn. Poloc. gos. un-ta. Ser. D. Ekon. i yurid. nauki. – 2004. – № 9. – S. 62–65.
- Kibanova, A. YA. Upravlenie personalom organizatsii: u chebnik / A. YA. Kibanova ; pod red. A. YA. Kibanovoy. – 4-e izd., dop. i pererab. – M. : INFRA-M, 2010. – 695 s.
- Kondratova, I. G. Analiz ispol'zovaniya trudovykh resursov kak vazhnejshoj chasti resursnogo potentsiala organizatsii / I. G. Kondratova // Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika. – 2010. – № 1. – S. 32–37.
- Morgunov, E. B. Upravlenie personalom: issledovanie, ocenka, obuchenie / E. B. Morgunov. – M. : Akademiya, 2017. – 264 s.
- Nesterova, A. A. Trudovaya mobil'nost' naseleniya v usloviyakh regional'noj integratsii / A. A. Nesterova. – Minsk : BGU, 2020. – 135 s.
- Ovchinnikova, T. I. Novaya paradigma upravleniya personalom v usloviyakh perekhodnoj ekonomiki / T. I. Ovchinnikova // Upravlenie personalom. – 2018. – № 7. – S. 34–39.
- Pavlova, S. N. Informacionnoe obespechenie pri prognozirovanii potrebnosti v specialistah v otrasli regiona / S. N. Pavlova // Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika. – 2011. – № 23. – S. 44–49.
- Pronina, M. A. Analiz ispol'zovaniya trudovykh resursov / M. A. Pronina, S. G. Saenko, A. G. Zajceva // Ekonomika i biznes: teoriya i praktika. – 2015. – № 9. – S. 83–86.
- Regiony Respubliki Belarus'. Brestskaya oblast': statisticheskij sbornik: statisticheskij ezhegodnik. – Minsk, 2019.
- Regiony Respubliki Belarus'. Brestskaya oblast': statisticheskij sbornik: statisticheskij ezhegodnik. – Minsk, 2020.
- Regiony Respubliki Belarus'. Brestskaya oblast': statisticheskij sbornik: statisticheskij ezhegodnik. – Minsk, 2021.
- Regiony Respubliki Belarus'. Brestskaya oblast': statisticheskij sbornik: statisticheskij ezhegodnik. – Minsk, 2022.
- Regiony Respubliki Belarus'. Brestskaya oblast': statisticheskij sbornik: statisticheskij ezhegodnik. – Minsk, 2023.
- Statisticheskij ezhegodnik Respubliki Belarus' – 2023 : stat. sbornik. – Minsk : Minstat Respubliki Belarus', 2023.
- Carenko, I. V. Principy regulirovaniya trudovykh resursov dlya effektivnogo social'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona / I. V. Carenko // Penitenciamaya sistema i obshchestvo: opyt vzaimodejstviya: sb. mater. VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Perm', 02–04 aprelya 2019 g. – Perm' : Permskij institut Federal'noj sluzhby ispolneniya nakazaniy, 2019. – S. 180–185.

Материал поступил 19.03.2025, одобрен 23.03.2025, принят к публикации 24.03.2025

УДК 338.27

ФОРСАЙТ-СЕССИИ: ИССЛЕДОВАНИЯ, МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ, ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

Е. В. Зацепина

*К. э. н., доцент кафедры мировой экономики, маркетинга, инвестиций УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь, e-mail: ev_zacsepina@mail.ru*

Реферат

В статье приводится обоснование важности проведения форсайт-сессий в сфере подготовки будущих специалистов, осуществляющих свою деятельность в области развития маркетинга и инноваций. Форсайт-сессия представляет собой метод прогнозирования и планирования будущего, основанный на коллективном обсуждении и анализе различных сценариев развития событий. В ходе форсайт-сессии участники генерируют идеи, обсуждают возможные риски и перспективы, а также разрабатывают стратегии действий для достижения поставленных целей.

Посредством полевого исследования сделан вывод о необходимости осуществления форсайта как постоянного процесса, сопровождающего движение компании в неопределенное будущее, наряду с этим выявлена недостаточность инструментария для его практического применения. С целью формирования и закрепления стратегических компетенций студентов, а также последующего совершенствования методологии исследования и реализации форсайта, в статье описываются результаты апробирования методики проведения форсайт-сессии при работе проектных команд в рамках научного мероприятия в учреждении высшего образования.

Форсайт-сессия позволила студентам получить навыки прогнозирования и планирования, которые будут полезны в их будущей профессиональной деятельности, чтобы лучше понимать тенденции развития рынка и его ключевых потребностей.

Апробация методики проведения форсайт-сессии показала следующие результаты: студенты активно участвовали в обсуждении и генерировали новые идеи; получили практические навыки прогнозирования и планирования перспективной маркетинговой деятельности; повысили мотивацию к изучению тенденций развития рынка и потребностей клиентов; научились работать в команде, слушать и слышать друг друга, находить компромиссы и принимать решения на основе консенсуса; активизировали коммуникативные навыки, поскольку были вынуждены общаться друг с другом, чтобы достичь поставленных целей.

Ключевые слова: форсайт, форсайт-сессия, технологии стратегического управления, методика и практика форсайта.

FORESIGHT SESSIONS: RESEARCH, METHODS OF CONDUCTING, PRACTICAL IMPLEMENTATION IN THE EDUCATIONAL PROCESS

E. V. Zatsepina

Abstract

The article provides a justification for the importance of conducting foresight sessions in the field of training future specialists who carry out their activities in the field of marketing and innovation development. The foresight session is a method of forecasting and planning the future based on collective discussion and analysis of various scenarios of the development of events. During the foresight session, participants generate ideas, discuss possible risks and prospects, and develop action strategies to achieve their goals.

Through field research, a conclusion was made about the need to implement a for-site as a permanent process accompanying the company's movement into an uncertain future, along with this, the insufficiency of tools for its practical application was revealed. In order to form and consolidate students' strategic competencies, as well as further improve the methodology of research and implementation of foresight, the article describes the results of testing the methodology of conducting a foresight session during the work of project teams within the framework of a scientific event at a higher educational institution.

The foresight session allowed students to gain forecasting and planning skills that will be useful in their future professional activities in order to better understand market development trends and its key needs.

The testing of the foresight session methodology showed the following results: students actively participated in the discussion and generated new ideas; gained practical skills in forecasting and planning promising marketing activities; increased motivation to study market trends and customer needs; learned to work in a team, listen and hear each other, find compromises and make decisions consensus-based decisions; enhanced communication skills, as they were forced to communicate with each other in order to achieve their goals.

Keywords: foresight, foresight session, strategic management technologies, procedure and practice of foresight.

Введение

В условиях высокой турбулентности экономической среды все большую остроту приобретает проблема важности прогнозных компетенций в структуре профессионального опыта. Способность определять перспективность новых товаров и услуг на основе формирования знания о будущем становится показателем предпринимательской и инновационной культуры мышления специалистов и руководителей в области маркетинга.

В связи с этим актуализируется вопрос о применении образовательных технологий, определяющих векторы влияния на становление образа будущего, понимание реальных тенденций его проектирования. В этом контексте одним из значимых современных мировых трендов становится использование форсайта в обучении, направленное на введение в содержание высшего образования форсайт-сессий с целью приобретения практических навыков студентами по освоению данных технологий [1, 2].

Форсайт-сессия – это уникальная методика работы с будущим, инновационный мозговой штурм, позволяющий максимально эффективно понять тенденции будущего и учесть это при создании новых продуктов и технологий. В отличие от «глобальных» форсайтов, которые затратны по ресурсам и времени и нацелены на масштабные изменения, форсайт-сессии носят сугубо прикладной характер. Глобальные тренды не являются предметом обсуждений, но используются в качестве базовой информации, которая учитывается для построения локальных моделей развития [3].

Полевое исследование необходимости организации и проведения форсайт-сессий

Проведение полевого исследования подразумевает описание методологии проведения работ. В данном случае использовались интервью с национальными экспертами и опросы белорусских и иностранных граждан для сравнения существующих подходов. Сре-

ди критериев отбора экспертов использовались: образование, опыт работы в рассматриваемой сфере, позиция в компании. В ходе проведения исследования в качестве респондентов привлекались специалисты, занимающие руководящие должности в отечественных компаниях и имеющие опыт управленческой работы не менее 5–7 лет.

Основные цели полевого исследования включали: определение отношения практикующих и будущих специалистов к вопросам форсайта; выявление наличия практического опыта реализации для выделения особенностей отечественной практики и проблемных составляющих; выявление мнений респондентов о целесообразности и целях использования форсайт-технологий белорусскими организациями.

Среди выдвигаемых для проверки гипотез рассматривались предположение о недостаточности информационного обеспечения (либо невозможности найти релевантные источники информации; отсутствии доступной в практике применения схемы (алгоритма) проведения форсайт-сессий), что может приводить к невозможности использования форсайта в работе.

Всего в ходе проведения исследования было проведено 23 экспертных интервью и опрошено 197 белорусских и китайских студентов и магистрантов (БГУИР, БГУ, БрГТУ).

Основные блоки вопросов, предложенные респондентам, находились в плоскости оценки необходимости форсайта для отечественных предприятий; рассмотрения форсайта с точки зрения терминологии и информационного обеспечения; изучения важности форсайта и выявления направлений применения результатов форсайт-сессий [4].

Полученные результаты демонстрируют, что под форсайтом большинство опрошенных (более 50 %) понимают прогнозирование будущего. Однако для иностранных респондентов форсайт означает в большей мере построение будущего, нежели его прогнозирование. Количество таких ответов является преобладающим и составляет 44,9 % (что в два раза превышает доли белорусских участников исследования).

Все опрошенные считают, что форсайт основан на масштабных исследованиях и форсайт-сессиях (79,4 % для отечественных и 90 % для иностранных). Применение технологий бенчмаркинга отечественные респонденты поддерживают меньше (27,8 %), чем иностранные (72,9 %), вероятно, по причине невысокой осведомленности о процессах и технологиях бенчмаркинга (рисунок 1).

Проведенные респондентами оценки необходимости форсайта показали, что среднее значение находится на уровне примерно 6,5 баллов (при разбросе от 3 баллов до 10 баллов с различным количеством ответов) (рисунок 2).

Важно отметить, что, по мнению респондентов, результаты форсайта могут применяться в долгосрочном планировании деятельности компании (100 %), в формировании видения компании (72 %), ряд респондентов считают, что форсайт может «несколько успокаивать собственников», для обозначения направлений будущего развития (18 %).

Проведенные полевые исследования позволили выявить различия заинтересованности в практическом использовании форсайта: уровень интереса отечественных респондентов оценивается в 5 баллов; уровень интереса зарубежных респондентов – в 7–8 баллов.

Тем не менее, респонденты понимают, что организация и проведение форсайт-сессий невозможно без сложностей и отражают, что основной проблемой является нестабильность окружающего мира (90 %), оказывающая серьезное влияние на будущие действия компаний, что в свою очередь определяет сложность реализации сформированных в ходе проведения сессий направлений.

Также более 70 % респондентов обозначили проблему в виде нехватки специалистов для организации работ по проведению форсайт-сессий. Следует отметить, что около 50 % респондентов обращают внимание на недостаточность информации, необходимой для осуществления форсайт-сессий. Такой невысокий уровень интереса к форсайт-технологиям со стороны отечественных респондентов обусловлен, в том числе, недостаточностью методического обеспечения, что создает предпосылки для опасений использования форсайта руководителями белорусских предприятий.

Проведенное полевое исследование отразило необходимость использования форсайта как постоянного и незаменимого процесса, сопровождающего движение компании в неопределенное и сложное будущее, а также выявило недостаточность инструментария для его практического применения. Результаты исследований, полученных в ходе проведения форсайт-сессий, позволят снизить риски при принятии стратегических решений и осуществить своевременную обоснованную корректировку планов [5, 6].

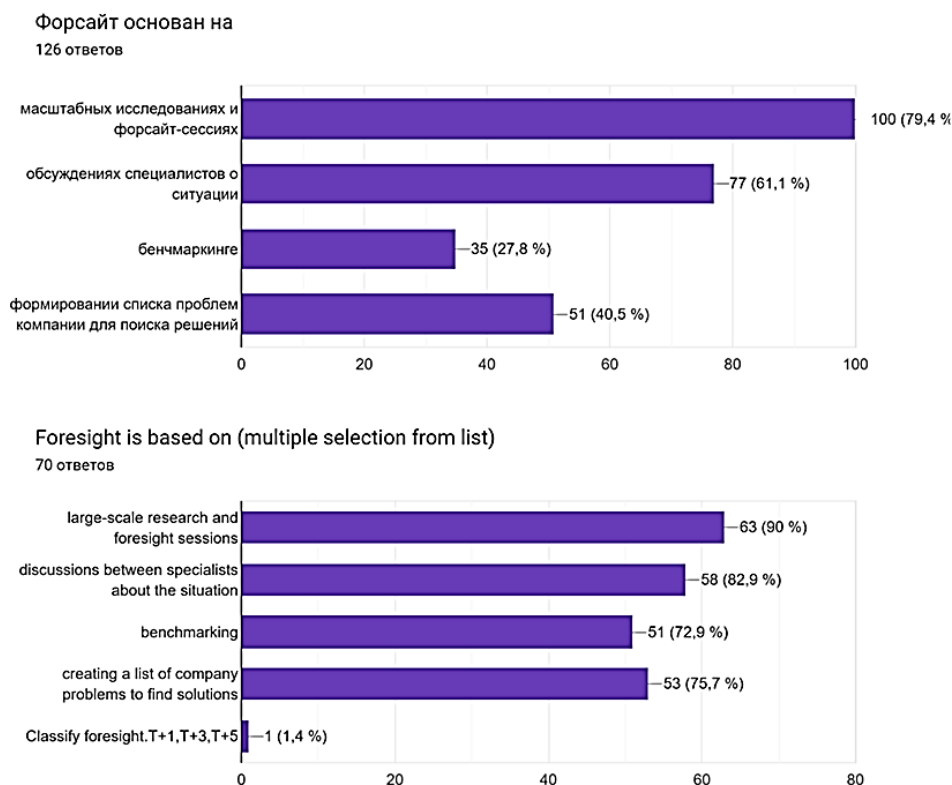
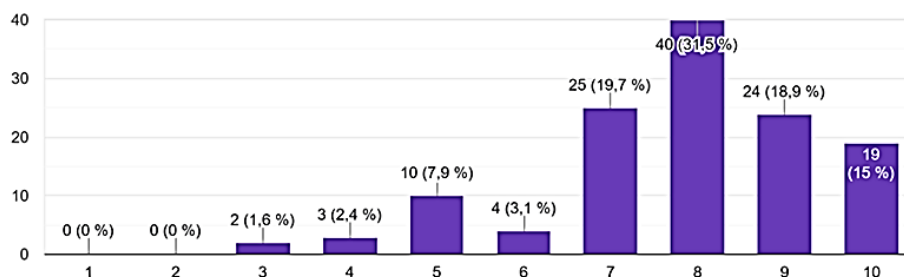


Рисунок 1 – Распределение ответов респондентов об основе форсайта

Примечание – Источник: собственная разработка автора по результатам исследований

Оцените, пожалуйста, необходимость форсайта

127 ответов



Please rate the need for foresight

70 ответов

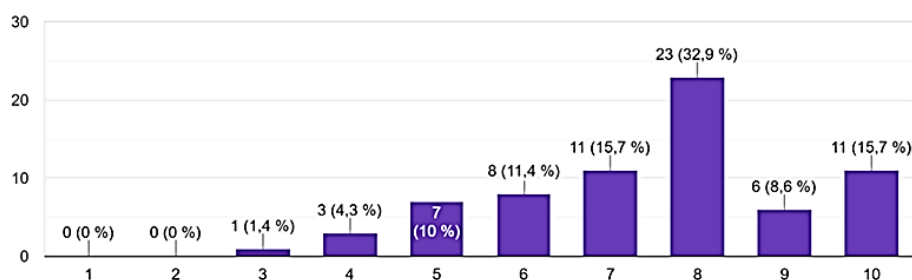
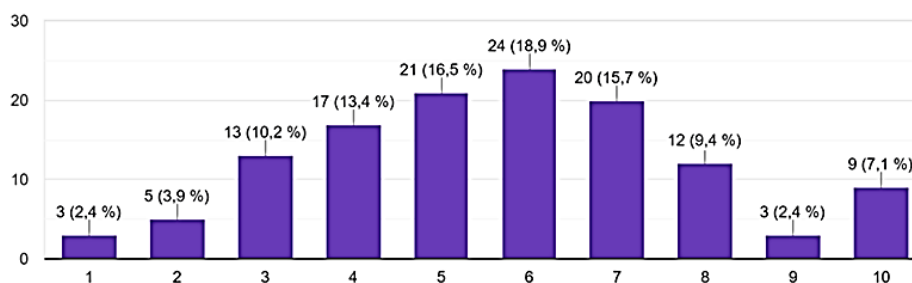


Рисунок 2 – Распределение ответов респондентов об оценке необходимости проведения форсайта

Примечание – Источник: собственная разработка автора по результатам исследований

Каков по вашему мнению текущий уровень интереса у руководителей компаний к проведению форсайт-сессий?

127 ответов



What do you think is the current level of interest among company executives in conducting foresight sessions?

70 ответов

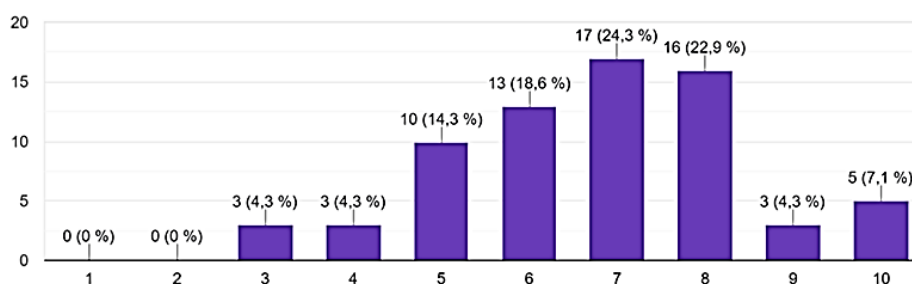


Рисунок 3 – Распределение ответов респондентов о текущем уровне интереса к проведению форсайт-сессий

Примечание – Источник: собственная разработка автора по результатам исследований

В целом форсайт направлен на формирование организационной культуры предвидения и разработку более выверенной перспективной траектории развития всей организации.

Методические и практические аспекты реализации форсайт-сессий

В настоящее время форсайт-сессия рассматривается как инструмент прикладного характера. Под форсайт-сессией подразумевается групповая работа предварительно подобранных экспертов, направленная на исследование и конструирование составляющих будущего с учетом собранной информации о трендах и тренд-сигналах, являющихся основой для построения перспективных моделей развития. Форсайт-сессии также должны стать прикладными инструментами и чрезвычайно важны при разработке дорожных карт [7, 8].

Решения, принимаемые в результате форсайт-сессий, носят инновационный характер, потому что формируются на основе принципа от будущего к настоящему, в то время как классическая концепция принятия решений предполагает, что модели, которые сработали в прошлом, автоматически повторяются, а те, что не сработали, отсеиваются. Однако существенный недостаток классического подхода заключается в том, что сейчас бизнес-среда меняется так быстро и настолько радикально, что успешные в прошлом модели в новых обстоятельствах могут быть совершенно бесполезны, соответственно нуждаются в пересмотре с учетом реальности скорости развития современного мира [9].

Организация форсайт-сессии предполагает, что ответственность за процесс и результат несут ведущий и модераторы. Продолжительность сессии составляет 2–4 часа. Оптимальное количество участников – от 5 до 15 человек. При данном количестве участники способны порождать новые идеи, а в случае, если участников больше, то целесообразнее разделить их на группы [10].

Следует отметить ряд правил работы участников форсайт-сессии:

1. Подведение результатов по завершению каждого шага, их открытость и доступность всем участникам, нежелательность отложенных результатов.

2. Планирование из будущего: работа с возможным, а не проектирование из прошлого.

3. Максимальная визуализация посредством дорожных карт, карт трендов, линий времени, шаблонов решений и т. д.

4. Стремление к точности и краткости формулировок и их обязательная фиксация для создания возможности анализа в будущем [11, 12].

5. Уважительное отношение участников друг к другу и их точке зрения, недопустимость демонстрации собственной исключительности.

В дальнейшем будут представлены результаты проведения форсайт-сессии на тему «Маркетинг будущего» при работе проектных команд в рамках ежегодной студенческой конференции «Неделя науки–2024» в Брестском государственном техническом университете. В мероприятии приняли участие студенты 3-го курса специальностей «Маркетинг» и «Электронный маркетинг» [13].

Авторами статьи была проведена образовательная форсайт-сессия, целью которой являлось погружение студентов в будущее маркетинга, освоение новой методики работы с трендами, развитие навыков командной работы. Количество участников – 27 студентов и 2 модератора, продолжительность форсайт-сессии – 4 часа. Предварительно были созданы шесть команд участников, которым на этапе предфорсайта выдавались задания по поиску трендов в разрезе комплексной модели TEMPLES+I-анализа макросреды, предусматривающего оценку технологических, экономических, рыночных, политических, экологических, социально-демографических и информационных групп трендов [14].

В результате за неделю до непосредственного проведения форсайт-сессии был получен единый массив из 60 различных трендов, который определил общее представление студентов о существующих драйверах изменений, воздействующих на будущую маркетинговую деятельность компаний и поведение потребителей. Тренды фиксировались в табличном формате со следующими полями: группа трендов, название тренда, характеристика тренда, статистическое подтверждение, источники информации (рисунок 4).

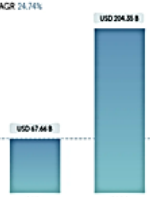
Группа трендов	Название тренда	Характеристика тренда	Статистическое подтверждение	Источники информации (ссылки)																		
Технологические	1. Рост использования ИИ	Тренд использования ИИ дает компании множество преимуществ: сокращение времени на выполнение задач, оптимизацию ресурсов на создание контента, общее повышение производительности. При этом стоит понимать, какие задачи можно доверить нейросети, а какие нет.	Компания Next Move Strategy Consulting прогнозирует уверенный рост рынка искусственного интеллекта (ИИ) в ближайшее десятилетие. Они ожидают значительного расширения: его текущая оценка в почти 100 миллиардов долларов США, по прогнозам, увеличится в двадцать раз к 2030 году и достигнет почти двухтриллионов долларов США.	https://www.yourteamindia.com/blog/emerging-trends-in-information-technology?hs_amp=true https://contentmarketinginstitute.com/articles/each-content-marketing-research https://offers.hubspot.com/ai-marketing?hubs_post-cta=bottom%3Futm_referrer%3Dhttps%3A%2F%2Fblog.hubspot.com%2Fmarketing%2Fbenefits-of-ai																		
Технологические	2. Развитие интернета вещей (IoT)	Интернет вещей (IoT) представляет собой сеть взаимосвязанных устройств, способных собирать и обмениваться данными через интернет. Эти устройства могут быть различными: от бытовых предметов в умном доме до промышленного оборудования. IoT позволяет автоматизировать процессы, повысить эффективность, улучшить комфорт и качество жизни.	По прогнозам экспертов, к 2030 году к сети будут подключены около 50 миллионов устройств Интернета вещей. Они образуют масштабную "сеть в сети", которая будет аккумулировать терабайты данных о физическом мире, обеспечивая бизнесу возможности управления процессами и принятия качественных решений в реальном времени. В сочетании с алгоритмами анализа данных, искусственным интеллектом и возможностями облачных сервисов технологии IoT позволяют стереть любые границы между онлайн и офлайн, создать "гиперобъединенную" среду.	https://www.techtarget.com/iotagenda/opinion/IoT-trends-to-keep-an-eye-on																		
Технологические	3. Расширение использования виртуальной реальности (VR)	Виртуальная реальность обеспечивает захватывающий опыт, который может быть довольно увлекательным. Виртуальная реальность отлично подходит для демонстрации продуктов, учебных пособий или маркетинговых кампаний.	Virtual Reality (VR) Market Market Size in USD Billion CAGR: 24.74% <table><thead><tr><th>Year</th><th>Market Size (USD Billion)</th></tr></thead><tbody><tr><td>2024</td><td>USD 47.68 B</td></tr><tr><td>2029</td><td>USD 204.35 B</td></tr></tbody></table> Source: Mordor Intelligence Период исследования: 2019 - 2029 <table><tbody><tr><td>Рынок рынка (2024)</td><td>USD 47.66 млрд долларов США</td></tr><tr><td>Рынок рынка (2029)</td><td>USD 204.35 млрд долларов США</td></tr><tr><td>CAGR(2024 - 2029)</td><td>24,74 %</td></tr><tr><td>Сектор/Бизнес-сегмент</td><td>Авиация/Телекоммуникации</td></tr><tr><td>Рынок</td><td>Северная Америка</td></tr><tr><td>Сектор рынка</td><td>Северная Америка</td></tr></tbody></table> Основные игроки  *Объем статистических данных основан на прогнозах экспертов	Year	Market Size (USD Billion)	2024	USD 47.68 B	2029	USD 204.35 B	Рынок рынка (2024)	USD 47.66 млрд долларов США	Рынок рынка (2029)	USD 204.35 млрд долларов США	CAGR(2024 - 2029)	24,74 %	Сектор/Бизнес-сегмент	Авиация/Телекоммуникации	Рынок	Северная Америка	Сектор рынка	Северная Америка	https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/virtual-reality-market
Year	Market Size (USD Billion)																					
2024	USD 47.68 B																					
2029	USD 204.35 B																					
Рынок рынка (2024)	USD 47.66 млрд долларов США																					
Рынок рынка (2029)	USD 204.35 млрд долларов США																					
CAGR(2024 - 2029)	24,74 %																					
Сектор/Бизнес-сегмент	Авиация/Телекоммуникации																					
Рынок	Северная Америка																					
Сектор рынка	Северная Америка																					

Рисунок 4 – Фрагмент массива технологических трендов в разрезе модели TEMPLES+I-анализа

Примечание – Источник: собственная разработка автора по результатам исследований

Первый этап форсайт-сессии был посвящен созданию карты трендов и установлению связей между ними, что предполагало выполнение участниками дальнейшей последовательности действий:

- 1) каждая команда знакомится с единым массивом трендов;
- 2) команды выбирают из массива наиболее релевантные тренды по группам (4–5 трендов из каждой группы);
- 3) каждой командой проектируется собственная карта трендов;
- 4) в карте устанавливаются взаимосвязи между трендами (т. е. точки пересечения между группами трендов);
- 5) формируется новый тренд (пересекающийся участок), каждому вновь появившемуся тренду необходимо дать название, отражающее его сущность.

Результатами первого этапа форсайт-сессии стали карты трендов от каждой из групп, одна из которых представлена на рисунке 5.

Карта трендов позволяет собрать их в одном месте и приоритизировать, понять перспективу развития, увидеть пересечения. Картирование трендов помогает:

1. Лучше понимать точку развития бизнеса, исходя из картины будущего, а не настоящего.
2. Расширить видение горизонтов планирования.
3. Получить целостное представление о рынке либо отрасли, понять взаимовлияние факторов друг на друга и на развитие выбранной сферы.
4. Сформулировать план действий, чтобы предотвратить или снизить негативное влияние отдельных трендов.
5. Составить концепцию продвижения продукта и шаги по созданию ниш с опережением.
6. Скорректировать маркетинговую инновационную активность [15, 16].

Отображение трендов является очень гибким инструментом, необходимым современному маркетологу с целью активизации инновационного мышления, развития восприятия в контексте формирования новых решений и создания новых продуктов, технологий, рынков. С помощью карты трендов можно как выявить широкий круг направлений исследований, так и сосредоточиться на более конкретных задачах. Например, вывести инновационный продукт на рынок или создать инклюзивную культуру внутри компании. Карты трендов помогают изучить контекст, найти связь и паттерны.

Контекст:

- 1) уточнить проблемную область и особенности её возникновения;
- 2) определить, как социальные, политические, культурные и экономические события или другие факторы влияют на тему или цель исследования;
- 3) осознать, что глобально происходит в мире.

Связи:

- 1) исследовать взаимосвязи и импульсы между трендами на карте;
- 2) определить ключевые тренды, которые могут повлиять на тему или цель, на увеличение, уменьшение, появление, исчезновение, эволюцию и адаптацию трендов.

Паттерны:

- 1) понять, как меняется политика или социальные и культурные нормы;
- 2) найти взаимосвязь между конкретными результатами и внешними факторами [17, 18].

В ходе второго этапа на основе собранной информации и посредством разработанных карт трендов была предусмотрена генерация идей с использованием модели 4P-4C с учётом следующей последовательности действий:

1. Отбор, созданных в результате пересечений новых трендов и фиксация в советующем шаблоне модели 4P-4C.
2. Формулирование командами идей по направлениям практического применения, которые могут быть выполнены на основе рассмотрения трендов через модели 4P-4C (на пересечениях и на линиях).
3. Представление командами полученных результатов: карты трендов и идей по применению.

Следует отметить, что концепции 4P-4C являются своего рода краеугольными камнями в стратегическом планировании и успешной реализации маркетинговых кампаний. Несмотря на свои различия,

они олицетворяют общие цели и принципы, направленные на эффективное управление и удовлетворение потребностей клиентов.

4P (Product, Price, Place, Promotion): модель сосредотачивается на продукте или услуге, цене, месте его распространения и способах продвижения; ориентирована на внутренние аспекты бизнеса и производства, а также на создание продукта и его успешное размещение на рынке.

4C (Customer Value, Cost to the customer, Convenience, Communication): в отличие от модели 4P, 4C фокусируется на клиенте и его потребностях; ориентирована на создание ценности для клиента, оптимизацию стоимости для него, удобство и коммуникацию с ним [19].

Модель 4P может быть более уместной в случаях, когда компания сконцентрирована на разработке продукта или услуги и пытается вывести их на рынок; применяется для более традиционных отраслей и сфер бизнеса, где основной акцент делается на продукте и его характеристиках.

Концепция 4C лучше подходит для современного бизнеса, особенно в условиях быстро меняющейся цифровой среды и повышенного внимания к потребностям клиентов. Может быть эффективной в сферах, где важно удобство для клиентов, таких как розничная торговля, услуги, электронная коммерция и другие. Этот подход может быть особенно полезен в условиях конкуренции насыщенных рынков, где клиенты имеют большой выбор и высокие ожидания [20].

С целью обеспечения синергетического эффекта генерации идей в процессе форсайт-сессии обосновано решение совместить обе концепции в результате чего командами были детализированы и представлены следующие стратегические маркетинговые инициативы:

- расширение использования роботов и искусственного интеллекта в сельском хозяйстве;
- разработка роботов для повышения качества жизни людей пожилого возраста;
- создание корпоративных учреждений образования;
- интеграция информационных и коммуникационных технологий с целью адаптации общества к инклюзии;
- автоматизированное гастрономическое погружение в сфере общественного питания;
- экологизация технологии «умный дом»;
- проектирование финансовых организаций с применением криптовалюты.

В заключении форсайт-сессии командами участников совместно с модераторами обсуждались полученные маркетинговые инновационные решения, а также какие из компаний реального сектора экономики могли бы проявить интерес к данным нововведениям с точки зрения последующего инвестирования и коммерциализации на белорусском рынке.

Таким образом, по итогу проведения форсайт-сессии в образовательном процессе для будущих специалистов сфере маркетинга можно выделить развитие ряда их компетенций:

1. Прогнозирование.

Форсайт-сессии помогают участникам проанализировать текущие тенденции и технологии, чтобы понять, как они могут развиваться в будущем.

2. Стратегическое планирование.

Форсайт-сессии позволяют получить навыки разработки долгосрочных планов и стратегий, которые учитывают возможные изменения.

3. Инновационное мышление.

Форсайт-сессии стимулируют инновационное мышление, помогают участникам выходить за рамки традиционного понимания деятельности и представлять новые возможности и решения.

4. Управление рисками.

Форсайт-сессии формируют способность определять потенциальные риски и угрозы, а также принимать меры по их минимизации.

5. Повышение гибкости.

Форсайт-сессии способствуют овладению участниками навыками гибкости и адаптивности, что особенно важно в условиях турбулентности маркетинговой среды.

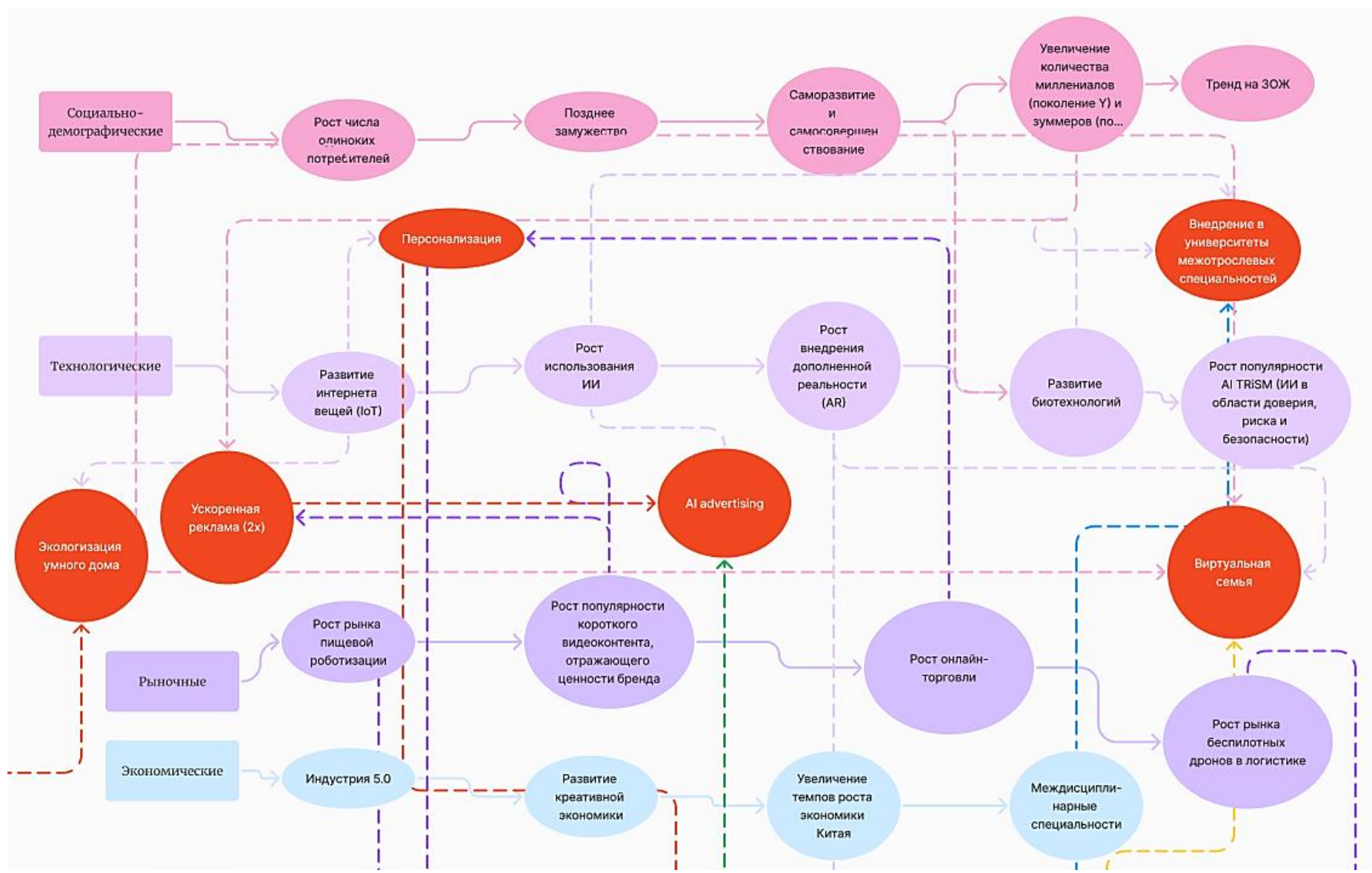


Рисунок 5 – Фрагмент карты трендов

Примечание – Источник: собственная разработка автора по результатам исследований

Заключение

В настоящее время возникает необходимость применения инструментов и технологий управления, которые в большей степени чувствительны к изменениям. Форсайт имеет отношение к процессам предвидения, определяющим возможности и угрозы, которые могут возникнуть в среднесрочной и долгосрочной перспективах, при этом следует учитывать необходимость проведения значительного количества исследовательских работ.

Форсайт-сессия представляет собой современный формат групповой работы, который используется для долгосрочного прогнозирования и формирования будущего. В ходе форсайт-сессий участники обсуждают тренды, влияющие на развитие определённой сферы или отрасли, оценивают возможные риски и перспективы, а также разрабатывают стратегии для достижения поставленных целей. Форсайт-сессии могут быть полезны в различных областях, включая образование, бизнес, науку и технологии. Они помогают участникам лучше понять текущую ситуацию, определить возможные сценарии развития событий и выбрать наиболее предпочтительные из них.

Развитие технологий форсайта в образовательной среде позволяет определять востребованные навыки и знания для подготовки специалистов, разрабатывать стратегии развития систем различного уровня и масштаба, а также повышать их конкурентоспособность в будущем.

Список цитированных источников

1. Зацепина, Е. В. Конкурентоспособность и экологические аспекты управления маркетингом организации / Е. В. Зацепина // Эколого-экономические и организационно-управленческие аспекты в решении задач оптимального функционирования водохозяйственных систем : монография / А. А. Волчек, Ан. А. Волчек, Н. В. Дорогокупец [и др.]. – М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2021. – Раздел 5. – С. 125–150.
2. Зацепина, Е. В. Повышение конкурентоспособности Брестского региона / Е. В. Зацепина, Е. И. Кисель, Н. Г. Надеина // Актуальные проблемы современных экономических систем Брестского региона : монография / М-во образования Респ. Беларусь, Брест. гос. техн. ун-т ; А. Г. Проровский [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2023. – С. 88–102.
3. Чуланова, О. Л. Форсайт-сессии как инновационный инструмент стратегического управления и работы проектных команд / О. Л. Чуланова // Материалы Афанасьевских чтений. – 2018. – №1 (22). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/forsayt-sessii-kak-innovatsionnyy-instrument-strategicheskogo-upravleniya-i-raboty-proektnyh-komand> (дата обращения: 08.10.2024).
4. Zatepina, E. V. Foresight: methodological and practical aspects = Форсайт: методологические и практические аспекты / E. V. Zatepina, E. G. Churlei // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – № 3 (132). – P. 93–98.
5. Innovations as sustainable competitive advantages in the digital economy: substantiation and forecasting / Khuta Gumba, S. Uvarova, S. Belyaeva, V. Vlasenko // XXII International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (EMMFT-2020) : E3S Web of Conferences 244, 10011 (2021). – 2021. – Vol. 244. – DOI: 10.1051/e3sconf/202124410011.
6. Фролова, Л. Особенности форсайта / Л. Фролова. – URL: <http://fb.ru/article/147529/forsayt---eto-novyy-metod-postroeniya-budushchegoosobennosti-forsayta> (дата обращения: 08.10.2024).
7. Зацепина, Е. В. Форсайт как инструмент обеспечения экономической безопасности / Е. В. Зацепина, Э. Г. Чурлей // Тенденции экономического развития в XXI веке : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 25-летию экон. фак. БГУ, Минск, 28–29 февр. 2024 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: А. А. Королёва (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2024. – Ч. 1. – С. 644–646.
8. Зацепина, Е. В. Формирование системы управления стратегическим маркетингом про-изводственных организаций : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Е. В. Зацепина. – Минск, 2023. – 188 л.
9. Мирчук, М. В. Форсайт – инновационный инструмент моделирования будущего / М. В. Мирчук. – URL: <https://sites.google.com/a/mosmetod.ru/forsajt-sessia-effektivnye-tehnologii-uspeha/home> (дата обращения: 10.10.2024).
10. Van Der Duin Patrick. Foresight in Organizations: Methods and Tools / Patrick Van Der Duin. – 1st Edition. – New York : Routledge, 2016. – 268 p. – DOI: 10.4324/9781315728513.
11. Зацепина, Е. В. Стратегический маркетинг и управление человеческими ресурсами производственной организации / Е. В. Зацепина // Национальные экономические системы в контексте трансформации глобального экономического пространства : сборник науч. трудов / под общ. ред. З. О. Адамановой. – Симферополь : ИП Хотеева Л. В., 2024. – Вып. 10. – С. 230–233.
12. Vergragt, P. J. Backcasting for sustainability: Introduction to the special issue / P. J. Vergragt, J. Quist // Technological Forecasting & Social Change. – 2011. – № 78 (5). – P. 747–755. – DOI: 10.1016/j.techfore.2011.03.010.
13. Форсайт-сессия «Маркетинг будущего» / Официальный сайт Брестского государственного технического университета. – URL: <https://www.bstu.by/news/109-universitet/1721-forsajt-sessiya-marketing-budushchego> (дата обращения: 11.10.2024).
14. Чурлей, Э. Г. Формирование системы информационно-аналитического обеспечения маркетингового анализа на предприятии / Э. Г. Чурлей // Журнал Белорусского государственного университета. Экономика = Journal of the Belarusian State University. Economics. – 2022. – № 2. – С. 64–80.
15. Епифанова, Н. Ш. От форсайт-исследований к форсайт-организациям / Н. Ш. Епифанова // Russian Journal of Economics and Law. – 2011. – № 4. – С. 143–147.
16. Зацепина, Е. В. Методика сканирования горизонтов управления стратегической конкурентоспособностью организации / Е. В. Зацепина // Актуальные проблемы современных экономических систем – 2023 : сборник научных трудов / М-во образования Респ. Беларусь, Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: А. Г. Проровский [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2023. – С. 72–78.
17. Facing the future: Scanning, synthesizing and sense-making in horizon scanning / Totti Könölä, Ahti Salo, Cristiano Cagnin [et al.] // Science and Public Policy. – 2012. – Vol. 39, iss. 2. – P. 222–231. – DOI: 10.1093/scipol/scs021.
18. Бушуева, И. П. Разработка карты HR-трендов и технологий / И. П. Бушуева, Е. А. Андреева, А. Д. Крюкова // Управление персоналом и интеллектуальными ресурсами в России. – 2021. – № 2. – С. 46–50.
19. Основы маркетинга / Ф. Котлер, Г. Армстронг, В. Вонг, Д. Сондерс. – 5-е изд. – М. : Вильямс, 2015. – 752 с.
20. Borden, N. The Concept of the Marketing Mix / N. Borden // Strategic Management Journal. – 1990. – № 11. – P. 71–84.

References

1. Zatepina, E. V. Konkurentosposobnost' i ekologicheskie aspekty upravleniya marketingom organizacii / E. V. Zatepina // Ekologo-ekonomicheskie i organizacionno-upravlencheskie aspekty v reshenii zadach optimal'nogo funkcionirovaniya vodohozyajstvennyh sistem : monografiya / A. A. Volchek, An. A. Volchek, N. V. Dorogokupets [i dr.]. – M. ; Berlin : Direkt-Media, 2021. – Razdel 5. – S. 125–150.
2. Zatepina, E. V. Povyshenie konkurentosposobnosti Brestskogo regiona / E. V. Zatepina, E. I. Kisel', N. G. Nadeina // Aktual'nye problemy sovremennyh ekonomicheskikh sistem Brestskogo regiona : monografiya / M-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Brest. gos. tekhn. un-t ; A. G. Prorovskij [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2023. – S. 88–102.
3. Chulanova, O. L. Forsajt-sessii kak innovacionnyj instrument strategicheskogo upravleniya i raboty proektnyh komand / O. L. Chulanova // Materialy Afanas'evskih chtenij. – 2018. – №1 (22). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/forsayt-sessii-kak-innovatsionnyy-instrument-strategicheskogo-upravleniya-i-raboty-proektnyh-komand> (data obrashcheniya: 08.10.2024).
4. Zatepina, E. V. Foresight: methodological and practical aspects = Forsajt: metodologicheskie i prakticheskie aspekty / E. V. Zatepina, E. G. Churlei // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – № 3 (132). – P. 93–98.

5. Innovations as sustainable competitive advantages in the digital economy: substantiation and forecasting / Khuta Gumba, S. Uvarova, S. Belyaeva, V. Vlasenko // XXII International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (EMMFT-2020) : E3S Web of Conferences 244, 10011 (2021). – 2021. – Vol. 244. – DOI: 10.1051/e3sconf/202124410011.
6. Frolova, L. Osobennosti forsayta / L. Frolova. – URL: <http://fb.ru/article/147529/forsayt---eto-novyy-metod-postroeniya-budushchegoosobennosti-forsayta> (data obrashcheniya: 08.10.2024).
7. Zacepina, E. V. Forsajt kak instrument obespecheniya ekonomicheskoy bezopasnosti / E. V. Zacepina, E. G. CHurlej // Tendencii ekonomicheskogo razvitiya v XXI veke : materialy VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 25-letiyu ekon. fak. BGU, Minsk, 28–29 febr. 2024 g. : v 2 ch. / Belarus. gos. un-t ; redkol.: A. A. Korolyova (gl. red.) [i dr.]. – Minsk : BGU, 2024. – CH. 1. – S. 644–646.
8. Zacepina, E. V. Formirovanie sistemy upravleniya strategicheskimi marketingom pro-izvodstvennykh organizacij : dis. ... kand. ekon. nauk : 08.00.05 / E. V. Zacepina. – Minsk, 2023. – 188 l.
9. Mirchuk, M. V. Forsajt – innovacionnyj instrument modelirovaniya budushchego / M. V. Mirchuk. – URL: <https://sites.google.com/a/mosmetod.ru/forsajt-sessia-effektivnye-tehnologii-uspeha/home> (data obrashcheniya: 10.10.2024).
10. Van Der Duin Patrick. Foresight in Organizations: Methods and Tools / Patrick Van Der Duin. – 1st Edition. – New York : Routledge, 2016. – 268 p. – DOI: 10.4324/9781315728513.
11. Zacepina, E. V. Strategicheskij marketing i upravlenie chelovecheskimi resursami proizvodstvennoj organizacii / E. V. Zacepina // Nacional'nye ekonomicheskie sistemy v kontekste transformacii global'nogo ekonomicheskogo prostranstva : sbornik nauch. trudov / pod obshch. red. Z. O. Adamanovoj. – Simferopol' : IP Hoteeva L. V., 2024. – Vyp. 10. – S. 230–233.
12. Vergragt, P. J. Backcasting for sustainability: Introduction to the special issue / P. J. Vergragt, J. Quist // Technological Forecasting & Social Change. – 2011. – № 78 (5). – P. 747–755. – DOI: 10.1016/j.techfore.2011.03.010.
13. Forsajt-sessiya «Marketing budushchego» / Oficial'nyj sajt Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – URL: <https://www.bstu.by/news/109-universitet/1721-forsajt-sessiya-marketing-budushchego> (data obrashcheniya: 11.10.2024).
14. CHurlej, E. G. Formirovanie sistemy informacionno-analiticheskogo obespecheniya marketingovogo analiza na predpriyatii / E. G. CHurlej // Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika = Journal of the Belarusian State University. Economics. – 2022. – № 2. – S. 64–80.
15. Epifanova, N. SH. Ot forsayt-issledovanij k forsayt-organizacijam / N. SH. Epifanova // Russian Journal of Economics and Law. – 2011. – № 4. – S. 143–147.
16. Zacepina, E. V. Metodika skanirovaniya gorizontov upravleniya strategicheskoy konkurentosposobnost'yu organizacii / E. V. Zacepina // Aktual'nye problemy sovremennykh ekonomicheskikh sistem – 2023 : sbornik nauchnykh trudov / M-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Brest. gos. tekhn. un-t ; redkol.: A. G. Prorovskij [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2023. – S. 72–78.
17. Facing the future: Scanning, synthesizing and sense-making in horizon scanning / Totti Könölä, Ahti Salo, Cristiano Cagnin [et al.] // Science and Public Policy. – 2012. – Vol. 39, iss. 2. – P. 222–231. – DOI: 10.1093/scipol/scs021.
18. Bushueva, I. P. Razrabotka karty HR-trendov i tekhnologij / I. P. Bushueva, E. A. Andreeva, A. D. Kryukova // Upravlenie personalom i intellektual'nymi resursami v Rossii. – 2021. – № 2. – S. 46–50.
19. Osnovy marketinga / F. Kotler, G. Armstrong, V. Vong, D. Sonders. – 5-e izd. – M. : Vil'yams, 2015. – 752 s.
20. Borden, N. The Concept of the Marketing Mix / N. Borden // Strategic Management Journal. – 1990. – № 11. – P. 71–84.

Материал поступил 22.10.2024, одобрен 18.11.2024, принят к публикации 19.11.2024

УДК 339.138:658

ПРОДВИЖЕНИЕ БРЕНДА УНИВЕРСИТЕТА В ОНЛАЙН-КАНАЛАХ ЦИФРОВЫХ МАРКЕТИНГОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ

С. А. Касперович¹, Е. А. Дербинская²

¹ К. э. н., доцент, ректор УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: sergeak@mail.ru

² Старший преподаватель кафедры экономической теории и маркетинга УО «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь, e-mail: e.derbinskaya@belstu.by

Реферат

В настоящее время в связи с повышением конкуренции между университетами на национальном и международном рынке актуальной является проблема продвижения бренда университета в цифровой среде. Приоритетным направлением продвижения бренда университета является его продвижение в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций. Актуальность темы исследования обусловлена значительным количеством пользователей онлайн-каналов цифровых маркетинговых коммуникаций, доступностью онлайн-каналов цифровых маркетинговых коммуникаций для поиска информации в любой стране, отсутствием временных барьеров для поиска информации об университетах.

Продвижение бренда университета в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций способствует росту узнаваемости бренда, вовлеченности и осведомленности пользователей, повышению лояльности целевой аудитории университета, росту востребованности образовательных продуктов и научно-технической продукции университета, повышению капитала и стоимости бренда университета.

Целью данной работы является разработка научно-практических рекомендаций по продвижению бренда университета с помощью официального сайта в поисковых системах и официальных профилей университета в социальных сетях и мессенджерах, учитывающих особенности университета как объекта исследования.

Научная новизна статьи заключается в разработке методики оценки продвижения официальных сайтов университетов в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций, основанной на использовании метода многомерного сравнительного анализа четырех групп факторов ранжирования сайта – доменных, технических, маркетинговых и ссылочных факторов; разработке методики оценки продвижения университетов в социальных сетях и мессенджерах, основанной на использовании метода многомерного сравнительного анализа основных количественных и качественных показателей эффективности продвижения профилей университетов. Предложенные в статье методики являются основой для формирования рейтингов официальных сайтов университетов и рейтингов официальных профилей университетов в социальных сетях и мессенджерах. Позиции университетов в соответствующих рейтингах определяют необходимость применения предложенных в статье научно-практических рекомендаций по продвижению бренда университета в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций.

Ключевые слова: бренд университета, брендинг, онлайн-каналы коммуникаций, SEO-оптимизация, контекстная реклама, социальные сети, мессенджеры, видеохостинг, сайты-агрегаторы, цифровые маркетинговые коммуникации.

UNIVERSITY BRAND PROMOTION IN ONLINE CHANNELS OF DIGITAL MARKETING COMMUNICATIONS

S. A. Kasperovich, E. A. Derbinskaya

Abstract

Currently, due to increased competition between universities in the national and international markets, the problem of promoting the university's brand in the digital environment is urgent. The university's brand promotion priority is its promotion in online channels of digital marketing communications. The relevance of the research topic is due to the significant number of users of online digital marketing communication channels, the availability of online digital marketing communication channels to search for information in any country, and the absence of time barriers to finding information about universities.

The university's brand promotion in online digital marketing communication channels contributes to the growth of brand awareness, user engagement and awareness, increased loyalty of the university's target audience, increased demand for educational products and scientific and technical products of the university, and increased capital and brand value of the university.

The purpose of this work is to develop scientific and practical recommendations for promoting the university's brand through the official website in search engines and official profiles of the university on social networks and messengers, taking into account the specifics of the university as an object of research.

The scientific novelty of the article lies in the development of a methodology for evaluating the promotion of official university websites in online channels of digital marketing communications, based on the use of a multidimensional comparative analysis of four groups of site ranking factors – domain, technical, marketing and reference factors; the development of a methodology for evaluating the promotion of universities in social networks and messengers, based on the use of a multidimensional comparative analysis method the main quantitative and qualitative indicators of the effectiveness of university profile promotion. The methods proposed in the article are the basis for forming ratings of official university websites and ratings of official university profiles on social networks and messengers. The positions of universities in the corresponding ratings determine the need to apply the scientific and practical recommendations proposed in the article on promoting the university's brand in online channels of digital marketing communications.

Keywords: university brand, branding, online communication channels, SEO, search ads, social networks, messengers, video hosting, aggregator websites, digital marketing communications.

Введение

В настоящее время цифровые маркетинговые коммуникации являются важнейшим и одним из наиболее эффективных инструментов брендинга университета. Цифровые маркетинговые коммуникации включают онлайн- и офлайн-каналы привлечения целевой аудитории

университета. К наиболее эффективным онлайн-каналам цифровых маркетинговых коммуникаций относятся: официальный сайт университета, поисковые системы, социальные сети, мессенджеры, видеохостинг, e-mail, мобильные приложения, онлайн-СМИ, сайты-агрегаторы, виртуальные мероприятия, digital-аудио. Именно онлайн-каналы цифро-

вых маркетинговых коммуникаций привлекают ежедневно миллионы пользователей по всему миру, что обуславливает необходимость их использования для продвижения брендов университетов.

Онлайн-каналы коммуникаций и их особенности

Продвижение бренда университета в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций является одним из наиболее эффективных способов построения сильного бренда университета. Важность продвижения бренда университета, в том числе с помощью онлайн-каналов коммуникаций, отмечается в работах А. С. Кариковой, Е. П. Лухменевой, О. М. Калиевой, И. И. Черкасовой [1, 2, 3].

Онлайн-каналы цифровых маркетинговых коммуникаций обладают следующими отличительными особенностями:

- отсутствие пространственного барьера для коммуникации: поиск и размещение информации можно осуществлять из любого географического положения;
- отсутствие временного барьера для коммуникаций;
- высокая скорость поиска и размещения информации;
- низкие социокультурные барьеры в коммуникациях; в частности, языковой барьер легко преодолевается с помощью онлайн-переводчиков, в том числе работающих на базе искусственного интеллекта.

Особенности онлайн-каналов цифровых маркетинговых коммуникаций обуславливают их популярность и эффективность.

Учитывая технические особенности платформ онлайн-каналов цифровых маркетинговых коммуникаций и особенности их целевой аудитории, ключевыми платформами для продвижения бренда университета на национальном и международном рынке образовательных услуг, рынке научно-технической продукции и рынке труда являются официальные сайты университетов, поисковые системы, социальные сети, мессенджеры; сайты-агрегаторы, продвигающие образовательные услуги и научно-техническую продукцию университетов; видеохостинги, блог-платформы, форумы и сервисы электронной почты [4].

Продвижение бренда университета в поисковых системах основывается на продвижении официального сайта университета с помощью SEO-оптимизации и контекстной рекламы.

SEO – «это комплекс мероприятий по внутренней и внешней оптимизации для поднятия позиций сайта в результатах выдачи поисковых систем по определённым запросам пользователей, с целью увеличения сетевого трафика, потенциальных покупателей и последующей монетизации этого трафика» [6]. Алгоритм SEO-оптимизации сайта университета состоит из следующих этапов:

- 1) постановка целей продвижения университета в поисковых системах Google и Яндекс;
- 2) первичный анализ сайта университета и особенностей тематик «высшее образование», «научно-техническая продукция и услуги»;
- 3) анализ спроса на услуги и продукцию университета, подбор ключевых запросов по тематикам и их кластеризация;
- 4) аудит сайта университета и разработка рекомендаций по его оптимизации;
- 5) мониторинг ключевых показателей эффективности продвижения сайта университета в поисковых системах.

В результате анализа официальных сайтов университетов Беларуси предложена авторская методика оценки продвижения официальных сайтов университетов в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций, основанная на использовании метода многомерного сравнительного анализа четырех групп факторов ранжирования сайта – доменных, технических, маркетинговых и ссылочных факторов. Научная новизна предложенной методики заключается в определении маркетинговых факторов ранжирования сайта университета, которые влияют на продвижение сайта в соответствии с запросами целевой аудитории, определяют выбор продуктов университета и включают:

- параметры оценки мета-тегов title, description;
- параметры оценки заголовков h1-h6;
- параметры оценки изображений и alt-текста;
- социальные параметры, оценивающие взаимодействие целевой аудитории университета с сайтом университета в социальных сетях;
- параметры оценки контента сайта университета (структура, типы контента, SEO-текст, и др.);

– параметры оценки посещения сайта, продолжительность сеанса, количество отказов, действия на сайте и др.

Преимуществом авторской методики является учет отличительных особенностей университетов как объекта исследования и отсутствие классических элементов коммерческих сайтов, применяемых в существующих методиках оценки эффективности сайта.

Для оценки доменных, технических, маркетинговых и ссылочных факторов сайтов университетов предложена трехбалльная шкала оценивания. Оценка включает три значения: 2 – «соответствует» / «присутствует», 1 – «частично соответствует» / «частично присутствует», 0 – «отсутствует» / «не соответствует» / «не размещается». Анализ продвижения сайтов университетов в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций рассмотрен на примере официальных сайтов БГТУ и БрГТУ по состоянию на 31.12.24. Результаты анализа продвижения сайтов БГТУ и БрГТУ представлены в таблице 1.

Применение метода суммы мест позволило определить сумму мест по совокупности факторов ранжирования официальных сайтов БГТУ и БрГТУ, а также итоговый рейтинг продвижения сайтов БГТУ и БрГТУ (таблица 2).

Таблица 1 – Анализ продвижения сайтов БрГТУ и БГТУ

Факторы	БрГТУ	БГТУ
Доменные	5	4
Технические	23	23
Маркетинговые	17	13
Ссылочные	1	2
Итоговое количество баллов	46	42

Примечание – разработка автора.

Таблица 2 – Рейтинг продвижения сайтов БГТУ и БрГТУ в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций

Факторы	БрГТУ	БГТУ
Доменные	1	2
Технические	1	1
Маркетинговые	1	2
Ссылочные	2	1
Итоговая сумма мест	5	6
Рейтинг	1	2

Примечание – разработка автора.

Многомерное сравнение официальных сайтов БГТУ и БрГТУ по доменным, техническим, маркетинговым и ссылочным факторам методом суммы мест показало, что лидером является сайт БрГТУ. Недостатки сайтов, выявленные в результате применения авторской методики оценки продвижения официальных сайтов университетов, необходимо устранять, чтобы повысить эффективность продвижения сайтов и продуктов университета, а также увеличить лояльность целевой аудитории и повысить ее вовлеченность. Для устранения недостатков продвижения сайтов разработаны авторские научно-практические рекомендации, сущность и научная новизна которых заключается в совершенствовании доменных, технических, ссылочных и маркетинговых факторов с учетом особенностей университета как объекта исследования и его отличий от коммерческих организаций.

Так, официальный сайт университета должен содержать достаточное количество полезной для посетителей информации, позволяющей принять решение о выборе университета для получения образования, проведении научных исследований, приобретении научно-технической продукции, сотрудничестве и др. [5] Цели продвижения университета определяют, какие разделы нужно создавать на сайте, иерархию и принципы навигации по ним, а также какой контент стоит размещать в том или ином разделе. Для повышения эффективности продвижения бренда университета рекомендуется создавать:

- разделы и страницы сайта, продвигающие специальности общего и углубленного высшего образования, аспирантуры и докторантуры, курсы повышения квалификации, подготовительные курсы и другие образовательные услуги;
- разделы и страницы сайта, ориентированные на иностранных абитуриентов;

- разделы и страницы сайта, посвященные научно-технической продукции и услугам (коммерциализация инноваций, внедрение разработок в производство, проведение совместных научных исследований и др.);

- разделы и страницы сайта, ориентированные на партнеров-заказчиков кадров;

- разделы и страницы, посвященные условиям обучения, научно-исследовательской работе студентов, культурному и спортивному развитию студентов и др.

Для продвижения бренда университета за рубежом в зависимости от целевой аудитории рекомендуется создавать разделы и страницы с контентом на иностранных языках: английском, китайском и др. Предлагаемые разделы, страница сайта и размещаемый на них контент будут способствовать продвижению бренду университета на трех рынках: на рынке образовательных услуг, на рынке научно-технической продукции и услуг, на рынке труда [4].

В зависимости от объекта продвижения рекламный контент официального сайта университета должен соответствовать ряду критериев:

- подробное описание специальностей, преимуществ обучения, перспектив трудоустройства выпускников, условий поступления, стоимости обучения и др.;

- описание достижений студентов университета в учебной, научной, культурной и спортивной деятельности;

- описание достижений выпускников университета, что усилит бренд университета на рынке труда;

- подробная информация о научно-технических разработках: описание, потребности предприятий, удовлетворяемые разработкой, преимущества, области применения, экономический эффект от применения и др.

Создаваемый и размещаемый на сайте университета контент должен содержать достаточное количество полезной для посетителей сайта информации, позволяющей целевой аудитории принять решение о выборе университета для получения образовательных услуг, проведении научных исследований и др.

Еще одной рекомендацией является подготовка уникальных мета-тегов title, description, заголовков h1-h6, текстового контента, изображений и alt-текста с учетом ключевых запросов пользователей, их минимальному и максимально допустимому количеству согласно требованиям поисковых систем.

Помимо совершенствования контента сайта университета необходимо:

- устранить все технические ошибки сайта;
- увеличить объем качественной ссылочной массы (количество авторитетных сайтов, которые ссылаются на сайт университета);

- улучшить тональность упоминаний сайта университета в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций (количество положительных отзывов об университете).

Для отслеживания эффективности продвижения университета, его отдельных страниц и размещаемого на них контента рекомендуется регулярно использовать данные Google Analytics и «Яндекс.Метрика» и, в случае необходимости, вносить изменения в стратегию продвижения сайта университета.

Еще одним эффективным инструментом продвижения университета в поисковых системах является контекстная реклама. Контекстная реклама – «это текстовые, графические и видеообъявления, которые показываются пользователям, если они вводят в поиске запрос или интересуются определенной тематикой в интернете» [4]. Контекстная реклама показывается в поисковых системах, на сайтах-партнерах, входящих в рекламную сеть «Яндекса» и контекстно-медийную сеть Google, в мобильных приложениях и других ресурсах. Для использования контекстной рекламы в качестве инструмента продвижения бренда университета необходимо использовать два основных сервиса – «Яндекс.Директ» и Google Ads.

Социальные сети и мессенджеры являются одними из важнейших онлайн-каналов продвижения бренда университета, т. к. позволяют эффективно продвигать контент целевой аудитории на рынке образовательных услуг, рынке научно-технической продукции и рынке труда [8].

Преимущества социальных сетей и мессенджеров:

- любой пользователь может выстраивать краткосрочные или долгосрочные коммуникации с другими участниками социальных платформ;

- пользователь социальных сетей и мессенджеров может публиковать личную информацию в открытом доступе для неограниченного количества пользователей, в закрытом доступе для ограниченного числа пользователей или может не публиковать личную информацию и оставаться только в роли наблюдателя;

- отсутствие ограничений для коммуникации между пользователями во времени и пространстве: общение, поиск информации, публикация сведений доступны пользователям независимо от их местоположения и времени выхода в онлайн;

- оперативность размещения информации. Социальные сети и мессенджеры предоставляют пользователям возможность публиковать контент онлайн, благодаря чему вся информация доступна в режиме реального времени;

- минимальное личное пространство пользователей. Аккаунты и страницы, не имеющие специально поставленных ограничений, носят публичный характер, и личная информация находится в открытом доступе;

- социальные сети и мессенджеры дают возможности для проведения исследовательской деятельности, т. к. содержат огромное количество информации о своих пользователях;

- широкий доступ к размещаемой информации. Информация располагается в публичном пространстве и открыта для изучения;

- популярность социальных сетей и мессенджеров среди пользователей обусловлена многообразием целей посещения: привлечение пользователей, возможность проведение досуга, получение образовательной информации, поиск товаров и услуг, поиск новых друзей и знакомых, поиск людей по интересам и т. д. [9].

Социальная сеть – «это интернет-площадка, сайт, который позволяет зарегистрированным на нем пользователям размещать информацию о себе и коммуницировать между собой, устанавливая социальные связи» [10]. Контент в социальных сетях создается непосредственно самими пользователями.

Популярность социальных сетей среди пользователей обусловлена следующими функциями:

- обеспечение коммуникации между пользователями;

- создание, сбор, хранение и передача информации в различных форматах;

- организация отдыха, развлечения и саморазвития пользователей;

- продвижение товаров, услуг;

- продвижение пользователей социальных сетей.

Особую важность для продвижения бренда университета представляют социальные сети для общения, которые дают пользователям возможность создать бесплатный профиль или страницу, что в целом является аналогом персонального мини-сайта.

Основными целями продвижения бренда университета в социальных сетях являются:

- повышение узнаваемости бренда университета;

- создание благоприятного имиджа университета;

- продвижение образовательных услуг, научно-технической продукции и услуг университета;

- выстраивание долгосрочных эффективных взаимоотношений с целевой аудиторией университета на основе коммуникаций в социальных сетях;

- повышение лояльности целевой аудиторией университета;

- формирование сообщества выпускников [4].

С учетом целевой аудитории и особенностей продуктов и услуг университета, предлагаемых для национального и международного рынка образовательных услуг, рынка научно-технической продукции и услуг, рынка труда продвижение бренда университета необходимо осуществлять:

а) в социальных сетях персональных контактов. В Беларуси самыми популярными социальными сетями в различных возрастных группах являются TikTok, Instagram, «ВКонтакте», «Одноклассники», Facebook [11]. При этом, опираясь на результаты исследования студентов 1-го курса из Беларуси, наиболее популярными социальными сетями для поиска информации об университетах в возрастной группе 17–18 лет являются TikTok и Instagram. Опираясь на результаты исследования пользователей социальных сетей за рубежом, для продвижения брендов белорусских университетов на зарубежных рынках необходимо использовать социальные сети Facebook, X, Douyin, Kuaihou, Instagram, «ВКонтакте», «Одноклассники» и др. [12];

б) в профессиональных социальных сетях. Отличительной особенностью профессиональных социальных сетей является выстраивание профессиональных связей между пользователями. Перспективной социальной сетью для продвижения бренда университета на рынке труда является LinkedIn, которая позволяет продвигать специальности университета и повышать имидж выпускников университета, а также дает возможность выстраивать долгосрочные взаимоотношения с предприятиями-партнерами;

в) в научных социальных сетях. Научные социальные сети ориентированы на представителей научного сообщества и предоставляют возможности для продвижения бренда университета в научной среде. Одной из самых популярных научных социальных сетей является ResearchGate, которая дает возможность повышать имидж, авторитет и узнаваемость университета в научном сообществе, позволяет продвигать научно-техническую продукцию и осуществлять поиск партнеров для проведения научных исследований.

Научно-практические рекомендации к продвижению бренда университета в социальных сетях:

- качественное визуальное оформление официального профиля, страницы или группы университета: создание уникальной привлекательной обложки профиля, аватара, обложек для актуальных историй, обложек в меню сообщества и др.;

- обязательное заполнение основных текстовых элементов профиля университета:

- а) выбор никнейма, содержащего название университета. Чтобы пользователи социальных сетей могли быстро и легко найти официальные профили университета, целесообразно подобрать одинаковый никнейм для различных социальных сетей;

- б) выбор имени профиля, страницы или группы. Имя должно содержать высокочастотный ключевой запрос по предоставляемым образовательным услугам, что будет способствовать поисковой оптимизации профиля. При совпадении сокращенного названия университета с другими университетами рекомендуется добавлять в имя профиля название города или страны для уточнения местоположения университета;

- в) текстовое описание профиля университета. Рекомендуется подготовить краткое лаконичное описание преимуществ университета, содержащее УТП;

- г) размещение ссылки на официальный сайт университета;

- д) добавление кнопки целевого действия (кнопка Call to Action, СТА). Кнопка действия позволяет ускорить и упростить взаимодействие с целевой аудиторией. Она может содержать переход на определенные страницы сайта, переход в мобильное приложение, отправку email, переадресацию на телефонный звонок и др.;

- использование доступных для взаимодействия с целевой аудиторией инструментов в различных социальных сетях: истории, публикации, видео Reels, прямые эфиры, каналы-рассылки и др.;

- регулярное размещение публикаций в официальных профилях университета. Размещение публикаций должно осуществляться в соответствии с контент-планом. Подготовка публикаций требует создание качественных изображений, видео- и аудиоматериалов, текстового контента, использование хэштегов;

- настройка, запуск и анализ эффективности таргетированной рекламы услуг университета;

- создание нативной рекламы университета, позволяющей продвигать образовательные услуги университета, не вызывая раздражения у пользователей социальных сетей;

- реклама у инфлюенсеров;

- анализ ключевых показателей эффективности продвижения профилей университета в социальных сетях.

Одними из важнейших онлайн-каналов продвижения бренда университета являются мессенджеры. Мессенджер – «это программа для мгновенного обмена текстовыми сообщениями и мультимедиа между зарегистрированными пользователями через Интернет. Использовать мессенджер можно на компьютере, смартфоне или планшете – в приложении либо веб-версии для браузера» [13].

Мессенджеры предоставляют пользователям следующие возможности:

- отправка другим пользователям текстовых или голосовых сообщений, файлов, стикеров, фото, видео и др.;

- звонки по видеосвязи или через голосовой вызов;

- вступление в тематические группы для общения или работы;

- создание собственных чатов и приглашение туда других пользователей;

- создание общедоступных каналов-рассылок для других пользователей;

- проведение прямых эфиров с несколькими пользователями одновременно.

Несмотря на то, что основной функцией социальных сетей и мессенджеров является обеспечение коммуникаций между пользователями, между ними есть существенные различия, связанные с их функциональными особенностями. Функциональные возможности социальных сетей гораздо шире функциональных возможностей мессенджеров. Как правило, социальные сети предполагают создание публичного профиля (или страницы) для размещения личной или коммерческой информации в виде текста, изображений, музыки или видео и включают чаты для общения, ленты обновлений новостей и фотографий, платформы для создания видео, аудиоконтент и многое другое.

Так, социальные сети «ВКонтакте» и Facebook разработали собственные, выделенные в отдельный сервис, мессенджеры VK Мессенджер и Facebook Messenger, предназначенные для пользователей, которые используют социальные сети только для общения с другими пользователями и не хотят получать лишнюю информацию информационного и коммерческого характера.

В то же время мессенджеры Telegram, WhatsApp и Viber предоставляют пользователям и компаниям возможность развивать публичные сообщества. Так, в Telegram можно создавать публичные каналы для размещения контента, размещать нативную рекламу у авторов каналов, запускать рекламу через рекламную платформу Telegram Ads и рекламу в ботах.

По данным исследования Института социологии Национальной академии наук в Беларуси самыми популярными мессенджерами в различных возрастных группах являются Viber, Telegram и WhatsApp [11]. Наиболее популярными мессенджерами в мире являются WhatsApp, WeChat, Telegram, Facebook Messenger, QQ [12]. Для эффективного продвижения бренда университета в мессенджерах на национальном и международном рынке образовательных услуг необходимо выбрать мессенджеры, которые использует целевая аудитория университета, опираясь на статистику посещаемости мессенджеров в Беларуси и других государствах.

По результатам анализа официальных профилей университетов Беларуси в социальных сетях и мессенджерах предложена авторская методика оценки продвижения университетов в социальных сетях и мессенджерах, основанная на использовании метода многомерного сравнительного анализа основных количественных и качественных показателей эффективности продвижения профилей. Научная новизна предложенной методики заключается в определении и систематизации количественных и качественных показателей эффективности продвижения профилей университета, а также формирования рейтинга профилей университетов, который позволяет определить недостатки продвижения и является основой для создания научно-практических рекомендаций по продвижению профилей университетов в социальных сетях и мессенджерах. Разработанная методика оценки эффективности продвижения университетов основана на следующих количественных и качественных показателях: количество подписчиков, количество публикаций в профиле, количество отметок «мне нравится», количество репостов, количество комментариев к публикациям, количество просмотров публикаций, ER Day, ER Post, ER View, VR Day, VR Post, среднее значение отметок «мне нравится», среднее количество репостов, качество описания профиля, качество обложки профиля, качество названия канала, регулярность размещения публикаций, оценка используемых типов контента, качество фото и видеоконтента. Оценка данных показателей была проведена на примере официальных каналов БрГТУ и БГТУ в мессенджере Telegram за период 01.09.23 по 31.12.24.

Применение метода суммы мест позволило определить сумму мест по совокупной оценке качественных и количественных показателей продвижения каналов БГТУ и БрГТУ в Telegram. Итоговый рейтинг продвижения каналов БГТУ и БрГТУ представлен в таблице 3.

Многомерное сравнение официальных каналов БГТУ и БрГТУ в Telegram по качественным и количественным показателям продвижения методом суммы мест показало, что лидером является официальный Telegram-канал БрГТУ. Для повышения эффективности продвижения официальных каналов университетов предложены

следующие научно-практические рекомендации к продвижению бренда университета в мессенджерах:

- создание официальных публичных каналов университета;
- а) создание обложки канала (аватара), отражающей основные ценности университета. Оптимальным вариантом для аватара является логотип университета;
- б) подготовка краткого текстового описания канала университета;
- в) создание короткой ссылки на официальный канал университета;
- использование чат-ботов;
- подготовка контента и регулярное размещение публикаций высокого качества в официальных каналах университета в соответствии с контент-планом;
- организация рекламной рассылки для целевой аудитории университета;
- разработка брендированных стикеров университета;
- запуск рекламы в мессенджерах через доступные рекламные платформы;
- размещение нативной рекламы в каналах, соответствующих образовательной тематике;
- анализ ключевых показателей эффективности продвижения официальных каналов университета.

Таблица 3 – Итоговый рейтинг продвижения каналов БГТУ и БрГТУ в Telegram за период 01.09.23 по 31.12.24

Факторы	БГТУ	БрГТУ
Количество подписчиков	2	1
Количество публикаций	2	1
Количество отметок «мне нравится»	2	1
Количество репостов	2	1
Количество комментариев	1	1
Количество просмотров	2	1
ER Day	2	1
ER Post	2	1
ER View	2	1
VR Day	2	1
VR Post	1	2
Среднее значение отметок «мне нравится»	2	1
Среднее количество репостов	2	1
Описание канала	2	1
Название канала	2	1
Регулярность размещения публикации	1	1
Оценка используемых типов контента	2	1
Качество фото- и видеоконтента	1	1
Качество обложки канала	2	1
Итоговая сумма мест	34	20
Рейтинг	2	1

Примечание – разработка автора.

Одним из важнейших инструментов продвижения бренда университета в социальных сетях и мессенджерах является таргетированная реклама. Таргетированная реклама – «это инструмент цифрового маркетинга, который позволяет показывать рекламные сообщения конкретному сегменту целевой аудитории» [14]. Использование таргетированной рекламы способствует повышению узнаваемости бренда и повышению эффективности продвижения образовательных услуг университета. При настройке таргетированной рекламы университета особое внимание нужно уделять определению социально-демографических характеристик целевой аудитории и ее интересам. Интересы целевой аудитории – это темы, к которым относятся поисковые запросы пользователей и просмотренный ими контент. Так, целевая аудитория университета интересуется высшим образованием, разнообразными обучающими курсами, подготовкой и сдачей ЦТ/ЦЭ, определенными специальностями, профессиями и др. Помимо правильного таргетинга для достижения высоких показателей эффективности таргетированной рекламы необходимо разработать качественные рекламные креативы, используя фото-, видео- и аудиоконтент. При подготовке рекламных сообщений университета необходимо использовать современные модели рекламных текстов 4U, PPPP, ODC, PmPHS и др. Для оценки эффективности

таргетированной рекламы университета рекомендуется отслеживать следующие показатели: охват аудитории, частота показов рекламных сообщений, CTR, CPC, CPM и др.

Для эффективного продвижения бренда университета в социальных сетях и мессенджерах рекомендуется использовать алгоритм продвижения, представленный на рисунке 1.

Помимо социальных сетей и мессенджеров, эффективной платформой для продвижения бренда университета являются видеохостинги. Самым популярным видеохостингом как в Беларуси, так и в других странах является YouTube [8, 9]. К основным рекомендациям по продвижению бренда университета на YouTube относятся:

- оформление официального профиля университета с использованием высококачественных изображений;
- подготовка видеоконтента различной длительности, в т. ч. в формате Shorts;
- подготовка подкастов в соответствии с темами, интересными целевой аудитории университета;
- проведение прямых трансляций;
- запуск рекламы в различных форматах (объявления In-stream с возможностью пропуска, объявления In-stream без возможности пропуска, объявления-заставки и др.);
- анализ эффективности продвижения официального профиля университета.

Сайты-агрегаторы, продвигающие образовательные услуги и научно-техническую продукцию университетов, являются одними из важнейших платформ социальных медиа. Самыми популярными сайтами-агрегаторами по тематике образования в Беларуси являются сайты kudapostupat.by, abiturient.by, studyinby.com и др. Основной рекомендацией для продвижения бренда университета с помощью сайтов-агрегаторов является регулярное размещение качественного контента, содержащего информацию о специальностях университета, преимуществах обучения, карьерных возможностях выпускников, проходных баллах и другого контента.

Одной из важнейших рекомендаций по продвижению бренда университета в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций является создание контента для различных платформ. Контент университета представляет собой информацию в различной форме восприятия (текстовой, аудиальной, графической, видео), предназначенной для целевой аудитории в цифровой среде (в офлайне и онлайн). Контент способствует привлечению и удержанию покупателей образовательных услуг и научно-технической продукции университета.

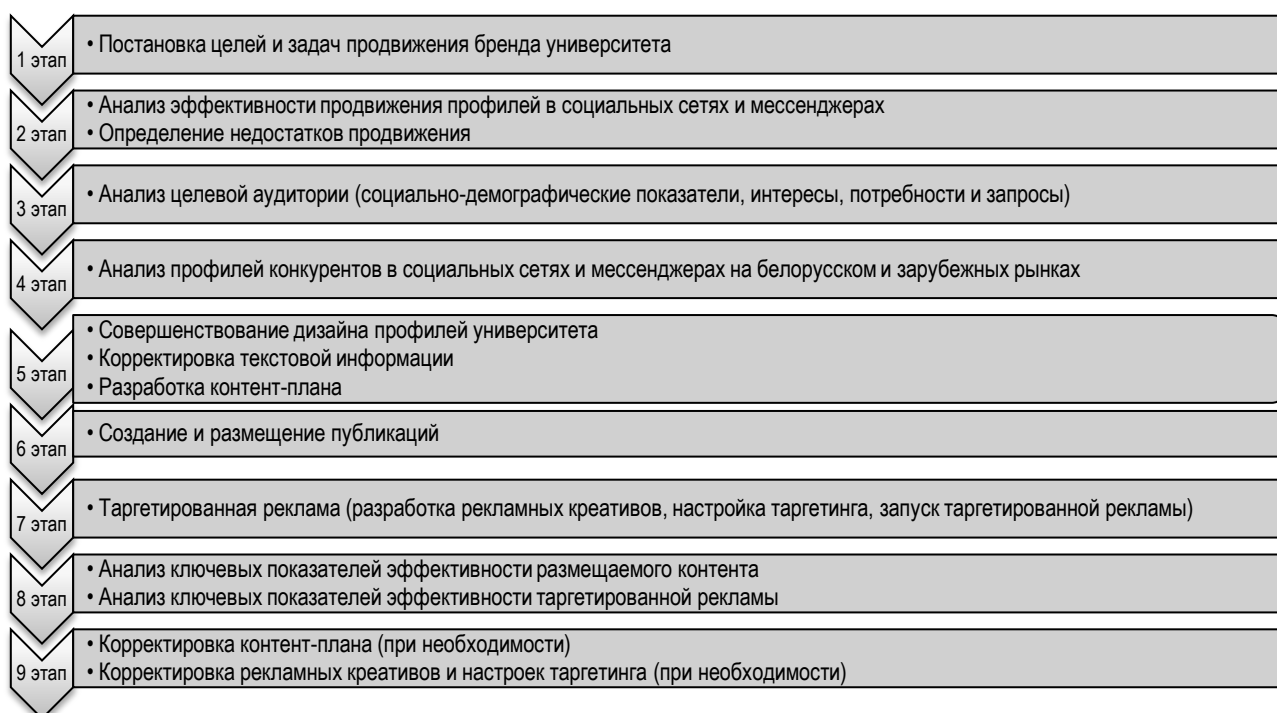
Согласно модели PESO, предложенной Дж. Дитрих для классификации контента, выделяется четыре типа контента: оплаченный контент, заработанный контент, социальный контент и собственный контент [15, 16].

Для повышения эффективности создания контента университета в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций рекомендуется использование модели PESO. Примеры контента университета представлены в таблице 4.

Применение модели PESO при продвижении бренда университета обеспечивает единство публикаций и повышает эффективность цифровых маркетинговых коммуникаций. Модель коммуникаций PESO не только помогает создавать качественные публикации для различных платформ в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций, но и способствует повышению объема продаж услуг и продуктов университета.

Для повышения эффективности контента университета рекомендуется использовать контент-план. Контент-план – «это график публикаций для социальных сетей и мессенджеров» [17]. Как правило, контент-план составляют на месяц в формате таблицы. Основными преимуществами использования контент-плана при продвижении бренда университета являются: упорядочивание большого объема информации, согласование размещения публикаций, регулярность публикации контента, соответствие публикуемого контента маркетинговым целям университета и интересам его целевой аудитории.

Оценка эффективности продвижения контента университета может осуществляться с помощью следующих показателей: количество подписчиков, охват аудитории, количество просмотров публикаций, глубина просмотра видео, вовлеченность и др.

**Рисунок 1** – Алгоритм продвижения бренда университета в социальных сетях и мессенджерах

Примечание – разработка автора.

Таблица 4 – Виды контента университета в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций

Р (Оплаченный контент)	Е (Бесплатный или заработанный контент)
– контекстная реклама в поисковых системах, YouTube и др.; – таргетированная реклама; – платные публикации в популярных каналах в мессенджерах; – оплаченные статьи в онлайн-СМИ; – продвижение университета на сайтах-агрегаторах; – платная реклама у блогеров и др.	– условно-бесплатные публикации в онлайн-каналах, посвященные университету; – научные публикации, книги, публикуемые сотрудниками университета; – интервью с руководством, преподавателями и научными сотрудниками университета и др.
С (Социальный контент)	О (Собственный контент)
– контент, размещаемый университетом в социальных сетях, мессенджерах и др.; – контент, размещаемый университетом на блог-платформах; – пользовательский контент (UGC) об университете, создаваемый и активно распространяемый целевой аудиторией университета в онлайн-каналах (отзывы, репосты публикаций университета и др.); – количество упоминаний университета в социальных сетях, мессенджерах; – количество упоминаний университета в блогах и форумах (в т. ч. тематических); – количество цитирований статей сотрудников университета в научных социальных сетях	– официальный сайт университета; – корпоративная электронная почта университета; – мобильные приложения университета и др.

Заключение

В статье рассмотрены основные онлайн-каналы продвижения бренда университета: официальный сайт университета, поисковые системы и их ключевые инструменты, социальные сети, мессенджеры, видеохостинги и сайты-агрегаторы. Рассмотрены отличительные особенности онлайн-каналов цифровых маркетинговых коммуникаций. Изучена роль контента в продвижении бренда университета в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций. Разработаны методика оценки продвижения официальных сайтов университетов в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций, основанная на использовании метода многомерного сравнительного анализа четырех групп факторов ранжирования сайта – доменных, технических, маркетинговых и ссылочных факторов; разработана методика оценки продвижения университетов в социальных сетях и мессенджерах, основанная на использовании метода многомерного сравнительного анализа основных количественных и качественных показателей эффективности продвижения профилей университетов.

Предложены научно-практические рекомендации по продвижению бренда университета в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций, учитывающие цели и задачи университета, интересы и запросы целевой аудитории, доступные инструменты в конкретных платформах.

Использование представленных в статье научно-практических рекомендаций позволит: повысить узнаваемость брендов университетов на белорусском и международном рынках образовательных услуг, научно-технической продукции и услуг, рынке труда; повысить вовлеченность целевой аудитории в контент университета, публикуемый в онлайн-каналах цифровых маркетинговых коммуникаций; повысить лояльность целевой аудитории университета; повысить объем оказываемых услуг университета, что будет способствовать росту капитала бренда университета и его стоимости.

Список цитированных источников

1. Карикова, А. С. Стратегия формирования бренда университета в современном образовательном пространстве / А. С. Карикова // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2020. – Т. 11, № 4. – С. 420–429.
2. Лухменева, Е. П. Особенности формирования и продвижения бренда вуза / Е. П. Лухменева, О. М. Калиева // Вестник ОГУ. – 2012. – № 13 (149). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-i-prodvizheniya-brenda-vuza> (дата обращения: 10.12.2024).
3. Черкасова, И. И. Бренд университета как фактор привлечения абитуриентов / И. И. Черкасова, В. В. Черкасов // Образование и наука. – № 25 (1). – 2023. – С. 50–83.
4. Дербинская, Е. А. Инновационные подходы к продвижению бренда университета в цифровой среде / Е. А. Дербинская // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 1 (133). – С. 198–203.
5. Derbinskaya, E. A. University brand: interpretation, structure, functions / E. A. Derbinskaya // Economy and Banks. – 2021. – № 2. – P. 40–48.
6. SEO оптимизация – продвижение сайтов. – URL: <https://seo-studio.pro/services/promotion-sites> (дата обращения: 18.12.2024).
7. Контекстная реклама и SEO. – URL: <https://www.cs-cart.ru/blog/kontext-i-seo> (дата обращения: 11.01.2025).
8. Дербинская, Е. А. Особенности продвижения бренда университета в мессенджерах / Е. А. Дербинская, С. А. Касперович // Цифровизация: экономика и управление производством: материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 24 января–16 февраля 2024 г. – Минск : БГТУ, 2024. – С. 14.
9. Замаратская, А. С. Социальные медиа и социальные сети / А. С. Замаратская // Социальная реальность виртуального пространства: материалы III Международной научно-практической конференции. Иркутск, 20 сентября 2021 года. – Иркутск : Иркутский государственный университет, 2021. – С. 30–34.
10. Социальная сеть. – URL: https://promopult.ru/library/Социальная_сеть (дата обращения: 18.12.2024).
11. Какие мессенджеры и соцсети наиболее популярны в Беларуси. – URL: <https://belta.by/society/view/kakie-messendzhery-i-sotsseti-naibolee-populyarny-v-belarusi-rasskazal-sotsiolog-660395-2024> (дата обращения: 18.12.2024).
12. Digital 2024: Belarus. – URL: <https://datareportal.com/reports/digital-2024-belarus> (дата обращения: 20.12.2024).
13. Мессенджер. – URL: <https://elama.ru/glossary/messendzher> (дата обращения: 20.12.2024).
14. Таргетированная реклама: обзор. – URL: <https://expert.vk.com/articles/targetirovannaya-reklama-obzor> (дата обращения: 23.12.2024).
15. Dietrich, G. Spin sucks: communication and reputation management in the digital age / G. Dietrich. – Indianapolis : Que, 2014. – VII, 154 p.
16. PESO: ключ к интегрированным коммуникациям // 2L Agency. – URL: <https://2l-pr.ru/blog/peso-model> (дата обращения: 19.07.2021).
17. Контент-план. – URL: <https://www.unisender.com/ru/blog/chto-takoe-kontent-plan-i-kak-ego-sostavit> (дата обращения: 20.12.2024).
18. Гафилин, Р. Р. Маркетинговые коммуникации в сфере образования / Р. Р. Гафилин // Практический маркетинг : материалы IV Международ. студен. науч.-практ. конф., Москва, 24 апр. 2019 г. / Моск. экон. ин-т ; отв. ред. И. Л. Сурат. – М., 2019. – С. 341–343.
19. Дэвис, С. М. Бренд-билдинг: создание бизнеса, раскручивающего бренд / С. М. Дэвис, М. Данн. – СПб. : Питер : Питер принт, 2005. – 320 с.
20. Росситер, Д. Р. Реклама и продвижение товаров / Д. Р. Росситер, Л. Перси ; пер. с англ. М. Бугаев [и др.]. – СПб. : Питер, 2000. – 651 с.
21. Бернет, Д. Маркетинговые коммуникации: интегрированный подход / Д. Бернет, С. Мориарти ; под общ. ред. С. Г. Божук. – СПб. : Питер, 2001. – 864 с.
22. Ромат, Е. В. Реклама / Е. В. Ромат. – 7-е изд. – СПб. : Питер : Лидер, 2008. – 506 с.
23. Каверина, Е. А. Организация рекламной деятельности вуза : учеб. пособие / Е. А. Каверина. – СПб. : Кн. дом, 2007. – 184 с.

References

1. Karikova, A. S. Strategiya formirovaniya brenda universiteta v sovremennom obrazovatel'nom prostranstve / A. S. Karikova // Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment. – 2020. – T. 11, № 4. – S. 420–429.
2. Luhmeneva, E. P. Osobennosti formirovaniya i prodvizheniya brenda vuza / E. P. Luhmeneva, O. M. Kalieva // Vestnik OGU. – 2012. – № 13 (149). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-i-prodvizheniya-brenda-vuza> (data obrashcheniya: 10.12.2024).
3. Cherkasova, I. I. Brend universiteta kak faktor privlecheniya abiturientov / I. I. Cherkasova, V. V. Cherkasov // Obrazovanie i nauka. – № 25 (1). – 2023. – С. 50–83.
4. Derbinskaya, E. A. Innovacionnye podhody k prodvizheniyu brenda universiteta v cifrovoy srede / E. A. Derbinskaya // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 1 (133). – S. 198–203.
5. Derbinskaya, E. A. University brand: interpretation, structure, functions / E. A. Derbinskaya // Economy and Banks. – 2021. – № 2. – P. 40–48.
6. SEO optimizaciya – prodvizhenie sajtov. – URL: <https://seo-studio.pro/services/promotion-sites> (data obrashcheniya: 18.12.2024).
7. Kontekstnaya reklama i SEO. – URL: <https://www.cs-cart.ru/blog/kontext-i-seo> (data obrashcheniya: 11.01.2025).
8. Derbinskaya, E. A. Osobennosti prodvizheniya brenda universiteta v messendzherah / E. A. Derbinskaya, S. A. Kasperovich // Cifrovizaciya: ekonomika i upravlenie proizvodstvom: materialy 88-j nauchno-tehnicheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnyh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem), Minsk, 24 yanvara–16 fevralya 2024 g. – Minsk : BGUTU, 2024. – S. 14.
9. Zamaratskaya, A. S. Social'nye media i social'nye seti / A. S. Zamaratskaya // Social'naya real'nost' virtual'nogo prostranstva: materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii, Irkutsk, 20 sentyabrya 2021 goda. – Irkutsk : Irkutskij gosudarstvennyj universitet, 2021. – S. 30–34.
10. Social'naya set'. – URL: https://promopult.ru/library/Social'naya_set (data obrashcheniya: 18.12.2024).
11. Kakie messendzhery i socseti naibolee populyarny v Belarusi. – URL: <https://belta.by/society/view/kakie-messendzhery-i-sotsseti-naibolee-populyarny-v-belarusi-rasskazal-sotsiolog-660395-2024> (data obrashcheniya: 18.12.2024).
12. Digital 2024: Belarus. – URL: <https://datareportal.com/reports/digital-2024-belarus> (data obrashcheniya: 20.12.2024).
13. Messendzher. – URL: <https://elama.ru/glossary/messendzher> (data obrashcheniya: 20.12.2024).
14. Targetirovannaya reklama: obzor. – URL: <https://expert.vk.com/articles/targetirovannaya-reklama-obzor> (data obrashcheniya: 23.12.2024).
15. Dietrich, G. Spin sucks: communication and reputation management in the digital age / G. Dietrich. – Indianapolis : Que, 2014. – VII, 154 p.
16. PESO: klyuch k integrirovannym kommunikacijam // 2L Agency. – URL: <https://2l-pr.ru/blog/peso-model> (data obrashcheniya: 19.07.2021).
17. Kontent-plan. – URL: <https://www.unisender.com/ru/blog/chto-takoe-kontent-plan-i-kak-ego-sostavit> (data obrashcheniya: 20.12.2024).
18. Gafilin, R. R. Marketingovyje kommunikacii v sfere obrazovaniya / R. R. Gafilin // Prakticheskij marketing : materialy IV Mezhdunar. studen. nauch.-prakt. konf., Moskva, 24 apr. 2019 g. / Mosk. ekon. in-t ; otv. red. I. L. Surat. – M., 2019. – S. 341–343.
19. Devis, S. M. Brend-bilding: sozdanie biznesa, raskruchivayushchego brend / S. M. Devis, M. Dann. – CPb. : Piter : Piter print, 2005. – 320 s.
20. Rossiter, D. R. Reklama i prodvizhenie tovarov / D. R. Rossiter, L. Persi ; per. s angl. M. Bugaev [i dr.]. – SPb. : Piter, 2000. – 651 s.
21. Bernet, D. Marketingovyje kommunikacii: integrirovannyj podhod / D. Bernet, S. Moriarti ; pod obshch. red. S. G. Bozhuk. – SPb. : Piter, 2001. – 864 s.
22. Romat, E. V. Reklama / E. V. Romat. – 7-e izd. – SPb. : Piter : Lider, 2008. – 506 s.
23. Kaverina, E. A. Organizaciya reklamnoj deyatel'nosti vuza : ucheb. posobie / E. A. Kaverina. – SPb. : Kn. dom, 2007. – 184 s.

Материал поступил 23.01.2025, одобрен 11.03.2025, принят к публикации 11.03.2025

УДК 332.146.2

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СВОБОДНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗОН: ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

В. А. Прудникова

Аспирант Академии управления при Президенте Республики Беларусь, Минск, Беларусь, e-mail: velkovaleva@gmail.com

Реферат

На современном этапе экономического развития Республики Беларусь очевидна необходимость разработки собственной методики комплексной оценки эффективности функционирования свободных экономических зон, позволяющей своевременно реагировать на возникающие вызовы и угрозы как внешнего, так и внутреннего характера. В этой связи актуальным является анализ отечественного и зарубежного опыта оценки эффективности функционирования свободных экономических зон. В статье представлены методики оценки эффективности функционирования свободных экономических зон, закрепленные на законодательном уровне в Республике Беларусь, Российской Федерации и Республике Казахстан. Кроме того, автором статьи проанализировано несколько десятков исследований как белорусских, так и зарубежных ученых по обозначенной выше тематике.

Разнообразие различных подходов к оценке эффективности деятельности свободных экономических зон позволяет сделать вывод об использовании для этого множества показателей и методов оценки, выбор которых обуславливают цель и позиции оценщика. При этом, исходя из анализа отечественного и зарубежного опыта оценки эффективности функционирования свободных экономических зон, наиболее перспективным видится применение для данных целей именно методов математической статистики, которые позволят минимизировать субъективный фактор при проведении такой оценки.

Ключевые слова: оценка эффективности, свободные экономические зоны, методы оценки, критерии оценки, оцениваемые показатели, международные рейтинги.

METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING THE EFFICIENCY OF FREE ECONOMIC ZONES: DOMESTIC AND FOREIGN EXPERIENCE

V. A. Prudnikova

Abstract

At the current stage of economic development of the Republic of Belarus, there is an obvious need to develop our own methodology for a comprehensive assessment of the effectiveness of the free economic zones, allowing us to respond in a timely manner to emerging challenges and threats of both external and internal nature. In this regard, the analysis of domestic and foreign experience in assessing the effectiveness of free economic zones is relevant. The article presents methods for assessing the effectiveness of free economic zones, enshrined in law in the Republic of Belarus, the Russian Federation and the Republic of Kazakhstan. In addition, the author of the article analyzed several dozen studies by both Belarusian and foreign scientists on the topic described above.

The variety of different approaches to assessing the effectiveness of free economic zones allows us to conclude that a variety of indicators and assessment methods are used for this, the choice of which is determined by the purpose and position of the appraiser. At the same time, based on the analysis of domestic and foreign experience in assessing the effectiveness of free economic zones, the most promising seems to be the use of mathematical statistics methods for these purposes to minimize the subjective factor in such an assessment.

Keywords: assessment of the effectiveness, free economic zones, evaluation methods, evaluation criteria, evaluated indicators, international ratings.

Введение

Традиционно одним из эффективных инструментов развития экономики считается создание свободных экономических зон. В настоящее время свободные экономические зоны занимают весьма значимую роль в пространстве мировой экономики. Именно благодаря этому феномену международные экономические отношения многих стран мира получили новый импульс к развитию.

Различные типы свободных экономических зон называют «островами» мирового хозяйства, «окнами» для притока в многочисленные регионы и страны зарубежных инвестиций, технологий, управленческих навыков. Наконец, в свободных экономических зонах многие экономисты видят прототип политики «открытых дверей» в мировую систему хозяйствования.

Как показывает мировой опыт, свободные экономические зоны обладают значительным потенциалом для успешного решения различных социальных и экономических задач, стоящих перед каждым государством. Во многих странах мира свободные экономические зоны используются в качестве весьма эффективного и действенного инструмента региональной политики.

Для обозначения свободных экономических зон в научной литературе используют большое количество различных терминов: «зона свободной торговли», «свободный порт», «экспортно-производственная зона», «особая экономическая зона», «зона свободного предпринимательства», «специальная экономическая зона», «техно-внедренческая зона», «технополис» и др.

Многообразие типов свободных экономических зон, различие целей их создания и функций, которые они выполняют, их постоянная трансформация и модификация в процессе исторического развития обусловили отсутствие единства в определении данного понятия. Существующие определения охватывают или отдельные виды зон, или дают различные общие трактовки этих хозяйственно-территориальных образований, что нередко осложняет понимание их сущности. Определение, отражающее многовекторность этих экономических образований, дает белорусский экономист Я. С. Друзик: «Свободные экономические зоны – это часть национального экономического пространства, где для местных и зарубежных предпринимателей создается такая система льгот и стимулов, которая на основе новейших технологий позволяет создавать приоритетные отрасли экономики, способные обеспечить производство высококачественной товарной продукции на мировой рынок и успешное развитие социально-экономической жизни регионов своего базирования» [1, с. 11].

Обзор литературы

Теоретико-методологические, финансово-правовые и организационно-экономические аспекты развития свободных экономических зон (далее – СЭЗ), зарубежный и отечественный опыт их функционирования привлекает внимание многих ученых и специалистов. Так, изучением СЭЗ в системе международных экономических отношений занимались Е. Ф. Авдокушин, Я. С. Друзик и К. А. Семенов. СЭЗ

как механизм привлечения иностранных инвестиций рассматривают Р. А. Абдул, Н. И. Малаш, М. В. Мишук, Е. В. Шода и др. Роли СЭЗ в развитии региональной экономики посвящены работы В. И. Бутова, В. Г. Игнатова, Н. П. Кетовой, А. В. Андреева, В. Ф. Байнева, О. С. Белокрыловой, И. М. Граник, М. П. Бутова, А. Г. Гранберга, Ю. А. Дмитриева, Л. П. Васильевой, А. О. Тихонова и др. При этом наиболее обсуждаемой проблемой остается оценка эффективности функционирования СЭЗ.

Анализ отечественного и зарубежного опыта оценки эффективности СЭЗ

В Республике Беларусь нормативно закреплён порядок оценки эффективности деятельности резидентов СЭЗ, который заключается в сопоставлении фактических и плановых показателей, характеризующих вложение инвестиций в основной капитал, производственную деятельность, численность работников, принятых на дополнительные введенные рабочие места [2]. При таком подходе оценка эффективности деятельности резидентов СЭЗ зависит не только от достигнутых ими реальных результатов, но и от качества планирования и прогнозирования, от реальности или, наоборот, амбициозности бизнес-планов инвестиционных проектов.

Кроме того, Национальным статистическим комитетом Республики Беларусь ежегодно осуществляется анализ деятельности СЭЗ по 24 показателям (в частности, количество зарегистрированных резидентов, в том числе действующих, численность работников, среднемесячная заработная плата, выручка от реализации продукции, товаров, работ, услуг, чистая прибыль (убыток), инвестиции в основной капитал, объемы производства, сальдо внешней торговли товарами и услугами). По сути этот анализ сводится к сопоставлению значений текущего года с предыдущим.

В Республике Казахстан на законодательном уровне утверждена методика оценки эффективности деятельности специальных экономических зон и промышленных зон (далее – СЭЗИИЗ). Оценка эффективности деятельности СЭЗИИЗ осуществляется по следующим четырем критериям [3]:

эффективность функционирования СЭЗИИЗ – оценивается фактическое достижение таких плановых показателей как количество участников СЭЗИИЗ, количество созданных рабочих мест, объем инвестиций, объем уплаченных налогов, таможенных платежей, объем вложенных бюджетных средств в строительство инфраструктуры;

эффективность деятельности участников СЭЗИИЗ – в зависимости от вида деятельности оценивается доля экспортируемой продукции в общем объеме произведенной продукции, доля обрабатывающей промышленности, относящейся к высокотехнологичным секторам экономики, в общем количестве производств, удельный вес предприятий, осуществляющих технологические инновации, в общем количестве предприятий либо доля экспорта и импорта в общем объеме грузооборота;

влияние деятельности СЭЗИИЗ на социально-экономическое развитие региона, на территории которого они созданы, – оценивается соотношение таких показателей как количество созданных рабочих мест, объем выручки от продаж товаров, работ, услуг, объем уплаченных налогов к аналогичным показателям административно-территориальной единицы, на которой создана СЭЗИИЗ, в целом;

эффективность управления управляющей компании СЭЗИИЗ – оценивается фактическое достижение таких прогнозных показателей, как количество участников зоны, количество построенных объектов инженерной инфраструктуры и их проектная мощность, а также доля суммарной площади земельных участков, предоставленных в аренду и (или) находящихся в собственности участников зоны, в общей площади зоны.

По каждому критерию выставляются баллы. Итоговое значение каждого критерия определяется как средневзвешенное значение показателей в процентном выражении. Впоследствии деятельность СЭЗИИЗ оценивается как эффективная, достаточно эффективная, условно-эффективная с необходимостью совершенствования по отдельным направлениям, с низким уровнем эффективности или неэффективная.

Несовершенство данной методики подтверждает тот факт, что уже на протяжении нескольких лет в Республике Казахстан обсуждается

новая методика оценки деятельности СЭЗИИЗ, включающая в себя уже три критерия: освоение территории СЭЗИИЗ, экономические показатели СЭЗИИЗ и обеспечение объектами инфраструктуры территории СЭЗИИЗ. В рамках данной методики предлагается оценивать следующие экономические показатели: количество зарегистрированных участников СЭЗИИЗ, объем налоговых отчислений, объем экспорта продукции, объем фактически вложенных инвестиций участниками в проекты, объем производства продукции и услуг, количество созданных рабочих мест. При этом методикой предусмотрено применение коэффициентов для каждого показателя, целью которых является нивелирование различий между критериями по их эффективной значимости, важности для оценки состояния СЭЗИИЗ [4].

Данная методика была разработана в рамках исполнения поручений Главы государства Касым-Жомарта Токаева во время Послания народу Казахстана 1 сентября 2022 года о переходе к принципиально другой политике по развитию СЭЗ. Вместе с тем указанная методика до сих пор не получила своего нормативного закрепления.

Порядок оценки эффективности функционирования особых экономических зон (далее – ОЭЗ) в Российской Федерации закреплён постановлением Правительства Российской Федерации от 7 июля 2016 года № 643 [5], согласно которому для оценки эффективности применяется 25 абсолютных и относительных количественных показателей, характеризующих, в частности, количество резидентов ОЭЗ и созданных ими рабочих мест, объем привлеченных инвестиций, выручки, использованных льгот, уплаченных налогов и таможенных платежей, объем бюджетных средств, направленных на финансирование инфраструктуры ОЭЗ, доля используемых резидентами площадей и объектов инфраструктуры, а также пять расчетных показателей, а именно:

показатель, отражающий эффективность деятельности резидентов ОЭЗ;

показатель, отражающий рентабельность вложения средств федерального бюджета, бюджетов субъектов Российской Федерации и местных бюджетов в создание объектов инженерной, транспортной, социальной, инновационной и иной инфраструктуры ОЭЗ;

показатель, отражающий эффективность деятельности органов управления ОЭЗ;

показатель, отражающий эффективность планирования при создании ОЭЗ;

показатель, отражающий вклад ОЭЗ в достижение национальных целей развития Российской Федерации.

Оценка эффективности производится по сводному расчетному показателю эффективности. Исходя из установленных критериев, функционирование ОЭЗ оценивается как эффективное, достаточно эффективное или неэффективное. По результатам оценки формируется отчет, в который включаются предложения о досрочном прекращении существования ОЭЗ, функционирование которых признано неэффективным.

Правила оценки эффективности ОЭЗ неоднократно пересматривались, но в их основе неизменно лежит сопоставление фактических и прогнозных (плановых) значений показателей функционирования ОЭЗ, что, по мнению экспертов, является существенным недостатком данной методики.

Вместе с тем внимания заслуживает предусмотренное указанным постановлением правительства применение финансовой ответственности в отношении ОЭЗ в виде возврата субъектами Российской Федерации определенного размера средств из бюджета субъекта Российской Федерации в федеральный бюджет при условии, что по результатам оценки функционирование ОЭЗ не будет признано эффективным.

В качестве альтернативной правительственной методике оценки ОЭЗ можно рассматривать методику Национального рейтинга инвестиционной привлекательности ОЭЗ России, проводимого Ассоциацией кластеров и технопарков России.

В рамках данной методики ОЭЗ оцениваются путем расчета интегрального показателя, суммирующего разнонаправленное влияние множества частных факторов. В зависимости от типа ОЭЗ используется разное количество оцениваемых показателей (всего 33 показателя), сгруппированных по семи функциональным блокам (более подробная информация представлена в таблице ниже).

Таблица – Показатели, применяемые для оценки ОЭЗ России Ассоциацией кластеров и технопарков России

Наименование функционального блока	Оцениваемые показатели
Блок S1 – <i>Инвестиционная привлекательность региона России</i>	показатели сгруппированы в две семантические подгруппы:
	«Эффективность экономической и инвестиционной деятельности»:
	– объем инвестиций в основной капитал; – уровень налоговой нагрузки на потенциального резидента ОЭЗ; – уровень содействия региональной власти (региональных органов исполнительной власти) в привлечении инвестиций; – инвестиционный риск; – коэффициент Энгеля
Блок S2 – <i>Благоприятные условия для предпринимательской деятельности в ОЭЗ</i>	«Обеспеченность региона трудовыми ресурсами»:
	– коэффициент плотности населения; – трудовой потенциал; – уровень профессионального образования; – доступность приобретения жилья в регионе
	продолжительность получения разрешения на строительство объекта промышленного и/или технологического назначения; среднегодовое количество привлеченных резидентов с момента создания ОЭЗ; наличие инфраструктуры свободной таможенной зоны в ОЭЗ; отношение фактически привлеченных резидентов ОЭЗ к плановому значению; наличие у управляющей компании компетенции для привлечения иностранных инвесторов
Блок S3 – <i>Обеспечение ОЭЗ инфраструктурой</i>	отношение фактически построенных объектов инфраструктуры к плановому значению в соответствии с соглашением о создании ОЭЗ; обеспеченность свободных арендопригодных земельных участков свободными инфраструктурными мощностями; транспортная доступность ОЭЗ; возможность оказания строительных услуг силами сотрудников управляющей компании в интересах резидентов ОЭЗ
Блок S4 – <i>Земельные ресурсы (земельные ресурсы и объекты капитального строительства)</i>	для <i>портовых ОЭЗ и ОЭЗ промышленно-производственного типа</i> :
	доля занятой площади в общей полезной площади ОЭЗ; отношение стоимости продажи земельного участка в ОЭЗ к среднероссийскому значению показателя по земельным участкам в границах ОЭЗ
	для <i>ОЭЗ технико-внедренческого типа</i> :
Блок S5 – <i>Инвестиционная активность ОЭЗ (инвестиционная и инновационная активность ОЭЗ)</i>	доля занятой площади в общей полезной площади земельных участков ОЭЗ; отношение стоимости продажи земельного участка в ОЭЗ к среднероссийскому значению показателя по земельным участкам в границах ОЭЗ; доля занятой арендопригодной площади зданий и сооружений офисного типа от общей арендопригодной площади зданий и сооружений офисного типа
	для <i>портовых ОЭЗ и ОЭЗ промышленно-производственного типа</i> :
	отношение объема инвестиций резидентов ОЭЗ к арендопригодной площади территории ОЭЗ, занятой резидентами; инвестиционная привлекательность инфраструктуры
Блок S6 – <i>Информационная открытость Интернет-сайта ОЭЗ</i>	для <i>ОЭЗ технико-внедренческого типа</i> :
	среднегодовая динамика инвестиций; среднегодовое количество созданных объектов интеллектуальной собственности
	качество Интернет-сайта, оцениваемое по 16 критериям, в частности, наличие и качество:
	– сведений о ключевых конкурентных преимуществах ОЭЗ для инвесторов (аргументов в пользу прихода инвесторов именно в данную зону);
	– информации о свободных земельных участках, пригодных для осуществления промышленно-производственной, технико-внедренческой и/или портовой деятельности;
	– онлайн-калькулятора затрат на реализацию инвестиционного проекта в ОЭЗ для резидентов, потенциальных инвесторов и других заинтересованных сторон;
	– представленной информации о деятельности управляющей компании ОЭЗ (включая копии отчетов);
	качество интернет-сайта на английском языке;
	удобство пользования интернет-сайтом для резидентов ОЭЗ, оцениваемое по семи критериям, в том числе наличие:
	– контактов специализированных отделов (подразделений) ОЭЗ, осуществляющих инвестиционные функции, функцию инженерного обслуживания, маркетинга и оказывающих иные услуги;
	– актуальных для резидентов ОЭЗ вакансий;
	– календаря событий (плана мероприятий, в том числе встреч с потенциальными потребителями компаний-резидентов, новыми инвесторами и др.) в интересах резидентов ОЭЗ;
	возможность для резидентов ОЭЗ подать онлайн-заявку в управляющую компанию ОЭЗ на оказание услуг;
	посещаемость интернет-сайта ОЭЗ;

Продолжение таблицы

Наименование функционального блока	Оцениваемые показатели
Блок S7 – <i>Глобальные экономические вызовы</i>	приверженность принципам устойчивого развития (анализируется наличие раскрытой на сайте нефинансовой отчетности в соответствии со стандартом, рекомендованным Минэкономразвития России); промышленная революция 4.0 (оценивается цифровая зрелость ОЭЗ по следующим критериям: наличие на территории ОЭЗ высокоскоростного Интернета (свыше 100 Мбит/с), внедрение управляющей компанией ОЭЗ CRM-системы; наличие у управляющей компании ОЭЗ IT-специалистов; наличие личного кабинета для резидентов ОЭЗ; наличие в стратегии управляющей компании цифровой трансформации инфраструктурной площадки; наличие на территории ОЭЗ «Центра обработки данных»); модели международного производства (оценивается наличие у ОЭЗ соглашения о ведении деятельности в промышленном кластере либо наличие в ОЭЗ резидента – участника промышленного кластера)

По результатам рейтинговой оценки ОЭЗ распределяются по трем группам: ОЭЗ с высокой инвестиционной привлекательностью, достаточно привлекательные ОЭЗ с инвестиционной точки зрения, ОЭЗ с умеренной инвестиционной привлекательностью [6].

Вместе с тем данная методика, в отличие от официальной, в большей степени направлена на продвижение российских ОЭЗ, формирование их положительного имиджа, усиление деловой репутации, повышения конкурентоспособности и, как следствие, притока иностранных инвестиций и расширения рынка сбыта продукции, производимой резидентами ОЭЗ.

Счетной палатой Российской Федерации в рамках проведенного анализа механизма установления и функционирования в Российской Федерации преференциальных режимов предложен иной подход к оценке эффективности функционирования ОЭЗ как одного из видов используемых в стране преференциальных режимов [7].

Набор показателей, применяемый при анализе, формировался с учетом международной практики и включал в себя: показатели социально-экономического развития субъектов Российской Федерации, национальные индикаторы достижения целей устойчивого развития, индикаторы внешнеэкономической деятельности (политики) и показатели деятельности предприятий (организаций).

Оценка эффектов от действия преференциальных режимов проводилась на нескольких уровнях агрегации: федеральном, уровне субъектов Российской Федерации, уровне отдельных предприятий. Для каждого из описанных уровней анализа использовался свой эмпирический подход и набор моделей. На федеральном уровне – регрессионные модели для рассматриваемых показателей социально-экономического развития, на региональном уровне и на уровне отдельных предприятий – модифицированный подход «разности разностей» (difference-in-differences), который в отдельных случаях дополнялся базовыми методами и моделями анализа панельных данных (например, моделью с двунаправленными «фиксированными эффектами»).

С использованием похожих подходов осуществлялась оценка выгод от создания зон внешней торговли (далее – ЗВТ) в докладе, подготовленном для Национальной ассоциации зон внешней торговли США [8]. В частности, для изучения регионального эффекта от создания ЗВТ использовался двойной эконометрический подход.

Первоначально для оценки изменения экономической активности в регионе (анализ проводился по трем показателям: занятость, заработная плата и добавленная стоимость) после создания ЗВТ использовалась модель «фиксированных эффектов». С ее помощью осуществлялась оценка темпов роста экономической активности в годы, предшествовавшие образованию ЗВТ, и после ее создания.

Далее применялся метод «разности разностей», чтобы изучить причинно-следственную связь между созданием ЗВТ и экономической активностью в более широком регионе. Данный подход позволил сравнить как экономическая активность изменилась в «экспериментальной группе» и «контрольной группе» в течение того же периода времени, единственной разницей между которыми являлось наличие ЗВТ.

Согласно информации, представленной в 2019 году конференцией ООН по торговле и развитию (ЮНКТАД) в Докладе о мировых инвестициях, в Китайской Народной Республике (далее – КНР) регу-

лярно проводится оценка эффективности зон развития высоких технологий (HTDZ, high-tech development zone), а также зон экономического и технологического развития (ETDZ, Economic and technological development zone) [9].

Так, в соответствии с приказом Министерства науки и технологий КНР зоны развития высоких технологий подлежат периодической оценке, при этом тем зонам, которые не отвечают требованиям по динамике развития и качеству управления, по результатам оценки предписано исправление ситуации во избежание потери статуса. В рамках многокритериальной оценки, применяемой с 2013 года, используется 40 индикаторов, объединенных в четыре категории, в числе которых:

1) новое знание и технологические инновации (уровень образования сотрудников, расходы на научно-исследовательскую деятельность, количество научно-исследовательских институтов и инкубаторов и т. д.);

2) модернизация промышленности и потенциал структурной оптимизации (число высокотехнологичных предприятий, доля фирм сектора услуг, регистрация интеллектуальной собственности, количество зарегистрированных компаний и т. д.);

3) интернационализация и участие в глобальной конкуренции (доля сотрудников, получивших высшее образование за рубежом, доля иностранного персонала, число зарубежных филиалов, регистрация интеллектуальной собственности за рубежом и т. д.);

4) потенциал устойчивого развития (доля сотрудников с магистерскими и докторскими степенями, темпы роста числа компаний или налоговых поступлений, объем новых инвестиций, потребление энергии и т. д.).

В 2016 году был добавлен еще один критерий эффективности – инновационный потенциал зон развития высоких технологий.

В свою очередь, Министерство торговли КНР с 2016 года проводит ежегодную оценку зон экономического и технологического развития по пяти основным направлениям, включая промышленный потенциал, технологические инновации, региональную интеграцию, охрану окружающей среды и административную эффективность.

Для проведения оценки используется 53 индикатора, в числе которых вполне традиционные показатели (объем промышленного производства, объем продаж, производительность труда, валовой внутренний продукт, расходы на научно-исследовательскую деятельность, привлечение прямых иностранных инвестиций, внешне-торговый оборот, число зарегистрированных компаний), а также показатели, отражающие приверженность ценностям устойчивого развития, – число учреждений профессионального образования, потребление энергии и воды, выбросы диоксида серы, оксидов азота и аммиачного азота, доля перерабатываемых отходов. Показателем административной эффективности выступает, например, наличие электронной системы «одного окна» для содействия инвесторам. По результатам оценки публикуется список 30 лучших зон по совокупности критериев, а также определяются по 10 лидеров по категориям промышленного потенциала, технологических инноваций, прямых иностранных инвестиций и внешней торговли. Аутсайдеры сводного рейтинга, занимающие последние пять мест в течение двух лет подряд, теряют свой статус.

Международный рейтинг Global Free Zones of the Year, составляемый журналом FDI Magazine (подразделение The Financial Times),

базируется на методе экспертной оценки. В 2018 году впервые рейтинг был составлен на основе модели весовых коэффициентов с использованием следующих абсолютных и относительных показателей: рост занимаемой площади, количество малых и средних предприятий, рост количества малых и средних предприятий, количество крупных арендаторов, рост количества крупных арендаторов, общее количество сотрудников, рост количества сотрудников [10].

Помимо рассмотренных выше подходов существует большое количество предложений по оценке эффективности создания и функционирования СЭЗ, содержащихся в научных публикациях.

Так, Я. И. Муратова для оценки эффективности функционирования белорусских СЭЗ предлагает использовать такие показатели, как коэффициент доходности, коэффициент социальной обеспеченности, показатель удельной чистой добавленной стоимости и показатель затратности. Также ею разработана рейтинговая оценка эффективности функционирования СЭЗ Республики Беларусь, учитывающая показатели, отражающие инвестиционно-инновационную, производственную, финансовую и внешнеэкономическую эффективность, и предложено категорирование СЭЗ в зависимости от уровня их развития (высокий, средний, низкий) [11, С. 41–45].

В свою очередь, В. С. Громоной и И. С. Полоник разработана методика оценки эффективности СЭЗ Республики Беларусь, основывающаяся на комплексном показателе на базе интегрального. Особенностью данного показателя является использование интегральных индексов, которые представляют собой совокупность наиболее важных частных показателей, что позволяет комплексно и всесторонне дать оценку деятельности отдельных СЭЗ, их резидентов и выявить приоритетные направления дальнейшего развития. Универсальность данной методики дает возможность использовать различные комбинации показателей в зависимости от макроэкономической ситуации, а с помощью коэффициента весомости – регулировать направленность экономики [12, С. 64].

Внимания заслуживает подход к формированию методики оценки эффективности функционирования ОЭЗ, предложенный российскими исследователями Т. А. Сухопаровой и А. М. Блиновой. Данный подход методологически берет свое начало в имитационном принципе, используемом при оценке условий ведения бизнеса по методике Doing business Всемирного банка и позволяет дать комплексную (как с позиций разных групп стейкхолдеров, так и с точки зрения включения в оценку не только прямых, но и косвенных, опосредованных результатов деятельности ОЭЗ) оценку влияния ОЭЗ на инвестиционную привлекательность региона [13, С. 42].

Предложенный авторами подход базируется на анализе деятельности ОЭЗ в нескольких плоскостях. Во-первых, с точки зрения макроэкономических параметров, ставя перед собой цель оценки влияния ОЭЗ на инвестиционную привлекательность регионов, предлагается отследить динамику как основных показателей непосредственно ОЭЗ, так и региона, в котором она расположена. Во-вторых, на основании оценки инвестиционной привлекательности и экономического развития, которая осуществляется независимыми исследователями в форме рейтингов. В частности, в качестве таких рейтингов авторами отобраны инвестиционные рейтинги регионов России от РА Эксперт, рейтинг социально-экономического положения регионов от РИА-Рейтинг, доклад о развитии человеческого потенциала в регионах России ООН. Наконец, третья плоскость измерения – оценка удобства и выгодности ведения бизнеса с позиций непосредственно реализации конкретных проектов. Для этого предлагается проводить оценку эффективности реализации типовых проектов на различных территориях по результатам сопоставления ключевых традиционных показателей эффективности инвестиций, которые отражают интересы собственников бизнеса [13, С. 41–42].

Е. В. Крюкова в своих работах предлагает на основе использования показателей, представленных в официальной методике, собственную модель оценки эффективности ОЭЗ. Указанные показатели разбиты на пять групп: абсолютные количественные показатели функционирования ОЭЗ (13 показателей); относительные количественные показатели, отражающие эффективность деятельности резидентов (от четырех до шести показателей в зависимости от типа ОЭЗ); относительные показатели, отражающие эффективность вложения бюджетных средств (три показателя); показатели влияния ОЭЗ на социально-экономическое раз-

витие региона (три показателя); показатели деятельности управляющих компаний (шесть показателей). При этом автором предусмотрено применение весовых коэффициентов как для каждой группы показателей, так и для конкретного показателя в отдельности. Предлагаемая комплексная оценка эффективности функционирования ОЭЗ сводится к определению и сравнительному анализу единого интегрального показателя, основанного на расчетных аналитических значениях всех групп параметров [14, С. 59].

В. И. Меньщикова и И. В. Передкова предлагают использовать для оценки эффективности функционирования ОЭЗ две группы показателей: показатели, характеризующие результаты функционирования ОЭЗ, и показатели, отражающие влияние ОЭЗ на развитие экономики региона, в котором она создана. Авторами предложена методика оценки результативности функционирования ОЭЗ, включающая сбор совокупности анализируемых показателей, ранжирование ОЭЗ, выстраивание итогового рейтинга с использованием экономико-статистического инструментария и группировку ОЭЗ в соответствии с установленным критерием. Также авторами обоснована следующая типология ОЭЗ: результативно функционирующие ОЭЗ со значительным вкладом в развитие экономики региона; ОЭЗ со средней результативностью и незначительным вкладом в развитие экономики региона; ОЭЗ с низкими уровнями результативности и вклада в развитие экономики региона; нерезультативные ОЭЗ, не привносящие вклада в развитие региона [15, С. 70].

Вместе с тем специфика российских исследований эффективности ОЭЗ заключается в отсутствии необходимых общедоступных статистических данных для апробации предлагаемых методик [16, С. 133–134].

Исследования Н. В. Чухломина и Т. С. Новиковой посвящены оценке эффективности государственно-частного партнерства (далее – ГЧП) при создании особых экономических зон на основе методов проектного анализа. При этом создание ОЭЗ авторами рассматривается как реализация комплекса инвестиционных проектов на территории отдельных регионов и муниципальных образований.

С учетом состава участников комплекса инвестиционных проектов ОЭЗ авторами определено три основных вида эффективности [17]:

коммерческая эффективность, оцениваемая посредством сопоставления появляющихся на рынке выгод и затрат, возникающих при реализации проекта частными участниками;

общественная эффективность, означающая сопоставление всех действительных выгод и затрат, возникающих при реализации проекта с точки зрения общества в целом;

бюджетная эффективность, определяющаяся как эффективность участия в комплексе инвестиционных проектов государства с точки зрения доходов и расходов всех уровней бюджетной системы.

Оценку эффективности ГЧП при создании ОЭЗ предложено осуществлять по двум основным направлениям анализа:

1) построение денежных потоков (денежный поток по проекту, денежный поток от операционной, инвестиционной и финансовой деятельности, денежный поток для органов государственного и муниципального управления, денежный поток для частных инвесторов, взаимосвязь денежных потоков, денежный поток для частных инвесторов в ситуации «без поддержки», денежный поток для органов государственного и муниципального управления в ситуации «без поддержки», изменение денежных потоков проекта при переходе от коммерческой к общественной эффективности);

2) расчет системы показателей эффективности ГЧП (используется традиционная для проектного анализа система показателей, и, прежде всего, показателя чистого дисконтированного дохода).

Для создания механизма управления участниками СЭЗ и обеспечения их деятельности на долгосрочный период Е. А. Матушевская полагает важным учитывать все составляющие и предлагает использовать широко применяемую в практике и наиболее diskutруемую в научном мире методику Balanced Scorecard (BSC). Ценность данной системы заключается в том, что в ее основе применяются не столько показатели, сколько цели, что весьма важно для построения эффективной системы управления. Автором, исходя из определенных стратегических целей, на примере СЭЗ г. Севастополя разработан комплекс индикаторов, сгруппированных по таким направлениям, как «финансы» (11 индикаторов), «социальная эффективность» (15 индикаторов), «внутренние административ-

ные процессы» (два индикатора) и «инфраструктура» (пять индикаторов). При этом для каждого индикатора установлено свое целевое значение [18, С. 877–879].

Польские ученые Р. Пастусяк, М. Болек, М. Ясиняк, Я. Келлер для анализа эффективности специальных экономических зон использовали модель, предложенную Питером Дж. Уорром и адаптированную к специфике экономики Польши [19]. Модель Уорра – это эмпирическая модель, которая анализирует объединение денежных потоков в СЭЗ и позволяет подсчитать результаты деятельности СЭЗ для принимающей страны. Модель описывает СЭЗ как закрытый рынок, который лишь частично взаимодействует с национальным рынком. СЭЗ – это особый экономический анклав, поэтому она получила название анклавной модели. В качестве основного инструмента анализа эффективности СЭЗ используется чистая приведенная стоимость.

В то же время другой польский ученый М. Блахуцкяк для оценки эффективности СЭЗ предлагает использовать метод DEA, который является непараметрическим методом и позволяет сравнивать объекты в одном секторе и ранжировать их, исходя из имеющегося шаблона. Основным преимуществом такого метода является то, что он не требует знания функциональных отношений при оценке влияния нескольких входных переменных на выходные переменные [18, С. 873].

Коллектив польских ученых (П. Цижкович, М. Цижкович-Пекала, П. Пекала, А. Рзонка) также для оценки эффективности специальных экономических зон Польши предлагает использовать математико-статистический инструментарий (в частности, модель «фиксированных эффектов», модель Дрисколла и Края, пространственную модель Дарбина). При этом эффективность функционирования специальных экономических зон они оценивают с точки зрения их влияния на региональные показатели экономической активности (общая занятость и общий объем инвестиций) по следующим четырем направлениям [20]:

так называемые «эффекты первого раунда» («прямое воздействие») – влияние стимулов на решения компаний инвестировать и создавать или сохранять занятость на территории специальной экономической зоны;

«индуцированные эффекты»: эффекты, вызванные функционированием компаний, находящихся в специальной экономической зоне, в ограниченном (географически или административно) пространстве (регион ее расположения), но за пределами самой территории зоны. Эти эффекты можно отнести к ряду экономических процессов, которые могут оказать как положительное, так и негативное влияние на общие экономические показатели региона. С одной стороны, индуцированные эффекты могут включать кластеризацию аналогичных компаний и вертикальную интеграцию (обратную и прямую связи). С другой стороны, компании, базирующиеся в специальной экономической зоне, могут вытеснить существующие фирмы или помешать образованию новых;

«пространственно-индуцированные эффекты» отражают внешние эффекты для соседних регионов. Эти эффекты в принципе могут принимать те же формы, что и индуцированные эффекты в пределах региона расположения специальной экономической зоны, но они материализуются за его пределами;

«обратные индукции»: так как создание специальной экономической зоны может повлиять на экономические показатели в регионах, соседних с местом ее расположения, могут произойти некоторые индуцированные эффекты (опять же положительные или отрицательные) из соседних регионов в регион расположения специальной экономической зоны.

Заключение

Таким образом, разнообразие различных подходов к оценке эффективности деятельности СЭЗ позволяет сделать вывод об использовании для этого множества показателей и методов оценки, выбор которых обуславливают цель и позиции оценщика. При этом основная проблема, с которой сталкиваются исследователи, как правило, связана с отсутствием в открытом доступе необходимых статистических данных для апробации предлагаемых методик. Кроме того, сложно сделать однозначные выводы о реальной значимости СЭЗ для социально-экономического развития региона ее функционирования и страны в целом. Ведь никогда нельзя однозначно

утверждать, что новые предприятия не появились бы и в случае отсутствия СЭЗ или же уже существующие предприятия не находились бы в более благоприятной ситуации при отсутствии конкуренции со стороны новых.

На современном этапе экономического развития Республики Беларусь важность дальнейшего эффективного функционирования СЭЗ неоспорима. При этом очевидна необходимость разработки собственной методики комплексной оценки эффективности функционирования СЭЗ, позволяющей своевременно реагировать на возникающие вызовы и угрозы как внешнего, так и внутреннего характера. При этом, исходя из анализа отечественного и зарубежного опыта оценки эффективности функционирования СЭЗ, наиболее перспективным видится применение для данных целей именно методов математической статистики, которые позволят минимизировать субъективный фактор при проведении такой оценки.

Список цитированных источников

1. Друзик, Я. С. Свободные экономические зоны в системе мирового хозяйства : учеб. пособие / Я. С. Друзик. – Минск : «ФУАинформ», 2000. – 304 с.
2. О критериях оценки эффективности деятельности резидентов свободных экономических зон на территории Республики Беларусь : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 27 сент. 2006 г., № 1264 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C20601264> (дата обращения: 20.09.2024).
3. Об утверждении методики оценки эффективности деятельности специальных экономических и промышленных зон : приказ Министра индустрии и инфраструктурного развития Респ. Казахстан, 12 авг. 2019 г., № 637 // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1900019248> (дата обращения: 20.09.2024).
4. Проект приказа Министра индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан «О внесении изменения в приказ Министра индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан от 12 августа 2019 года № 637 «Об утверждении методики оценки эффективности деятельности специальных экономических и промышленных зон». – URL: <https://legalacts.egov.kz/npa/view?id=14430652> (дата обращения: 20.09.2024).
5. О порядке оценки эффективности функционирования особых экономических зон : постановление Правительства РФ, 7 июля 2016 г., № 643 // Информационно-правовой портал Гарант.ру. – URL: <https://base.garant.ru/71442538> (дата обращения: 20.09.2024).
6. Бизнес-навигатор по особым экономическим зонам России / А. Р. Новикова, А. А. Ахматов, В. П. Жеребцов [и др.] ; Ассоциация кластеров, технопарков и ОЭЗ России. – М. : АКИТ РФ, 2023. – Выпуск 7. – 277 с.
7. Отчет о результатах экспертноаналитического мероприятия «Анализ механизма установления и функционирования преференциальных режимов как инструмента социальноэкономического развития и внешнеэкономической политики» // Официальный сайт Счетной палаты Российской Федерации. – URL: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/67a/vdwd3gv17fv0y7o801rii8bfqnqisvzy.pdf> (дата обращения: 20.09.2024).
8. The U.S. Foreign-Trade Zones Program: Economic Benefits to American Communities prepared for the National Association of Foreign-Trade Zones by the Trade Partnership. – URL: <https://growthzonesitesprod.azureedge.net/wp-content/uploads/sites/3852/2023/02/2019-FTZ-Economic-Study.pdf> (date of access: 20.09.2024).
9. World Investment Report 2019. – URL: <https://unctad.org/webflyer/world-investment-report-2019> (date of access: 20.09.2024).
10. Global Free Zones of the Year 2018. – URL: <https://oezdubna.ru/upload/fDi%20Global%20Free%20Zones%20of%20the%20Year%202018.pdf> (date of access: 20.09.2024).

11. Муратова, Я. И. Комплексный подход к оценке эффективности функционирования свободных экономических зон Республики Беларусь / Я. И. Муратова // Белорусский экономический журнал. – 2017. – № 1. – С. 38–48.
12. Громова, В. С. Анализ экономической эффективности функционирования свободных экономических зон в Республике Беларусь как базиса для создания инноваций / В. С. Громова, И. С. Полоник // Новая экономика. – 2019. – № 2 (74). – С. 63–67.
13. Сухопарова, Т. А. Комплексный подход к оценке влияния особых экономических зон на инвестиционную привлекательность региона / Т. А. Сухопарова, А. М. Блинова // Вестник экономики, права и социологии. – 2014. – № 1. – С. 40–43.
14. Крюкова, Е. В. Оценка эффективности функционирования зон с особым экономическим статусом в регионах России / Е. В. Крюкова // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 3: Экономика. Экология. – 2014. – № 4 (27). – С. 57–62.
15. Меньщикова, В. И. Методика оценки результативности функционирования особых экономических зон / В. И. Меньщикова, И. В. Передкова // Социально-экономические явления и процессы. – 2013. – № 11 (057). – С. 70–76.
16. Кузнецова, О. В. Особые экономические зоны: эффективны или нет? / О. В. Кузнецова // Пространственная экономика. – 2016. – № 4. – С. 129–152.
17. Новикова, Т. С. Оценка эффективности государственно-частного партнерства при создании особых экономических зон / Т. С. Новикова, Н. В. Чухломин // Мир экономики и управления. – 2010. – Т. 10. – № 4. – С. 180–192.
18. Матушевская, Е. А. Формирование комплексного подхода к оценке эффективности функционирования свободной экономической зоны / Е. А. Матушевская // Экономика региона. – 2018. – Т. 14, Вып. 3. – С. 870–883.
19. Effectiveness of special economic zones of Poland / R. Pastusiak, M. Bolek, M. Jasiniak, J. Keller // Zb. rad. Ekon. fak. Rij. – 2018. – Vol. 36, № 1. – P. 263–285. – URL: https://www.researchgate.net/publication/326525620_Effectiveness_of_special_economic_zones_of_Poland (date of access: 20.09.2024).
20. The effects of special economic zones on employment and investment: a spatial panel modeling perspective / P. Cizkowicz, M. Cizkowicz-Pekala, P. Pekala, A. Rzonca // Journal of Economic Geography. – 2017. – T. 17, № 3. – P. 571–605. – URL: https://mpra.ub.uni-muenchen.de/63176/1/MPPRA_paper_63176.pdf (date of access: 20.09.2024).
6. Biznes-navigator po osobym ekonomicheskim zonam Rossii / A. R. Novikova, A. A. Ahmatov, V. P. ZHerebcov [i dr.] ; Associaciya klasterov, tekhnoparkov i O EZ Rossii. – M. : AKIT RF, 2023. – Vypusk 7. – 277 s.
7. Otchet o rezul'tatah ekspertnoanaliticheskogo meropriyatiya «Analiz mekhanizma ustanovleniya i funkcionirovaniya preferencial'nyh rezhimov kak instrumenta social'noekonomicheskogo razvitiya i vneshneekonomicheskoy politiki» // Oficial'nyj sayt Schetnoj palaty Rossijskoj Federacii. – URL: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/67a/vdwd3gv17fv0y7o801rii8bfnqnisvzy.pdf> (data obrashcheniya: 20.09.2024).
8. The U.S. Foreign-Trade Zones Program: Economic Benefits to American Communities prepared for the National Association of Foreign-Trade Zones by the Trade Partnership. – URL: <https://growthzonesitesprod.azureedge.net/wp-content/uploads/sites/3852/2023/02/2019-FTZ-Economic-Study.pdf> (date of access: 20.09.2024).
9. World Investment Report 2019. – URL: <https://unctad.org/webflyer/world-investment-report-2019> (date of access: 20.09.2024).
10. Global Free Zones of the Year 2018. – URL: <https://oezdubna.ru/upload/fD%20Global%20Free%20Zones%20of%20the%20Year%202018.pdf> (date of access: 20.09.2024).
11. Muratova, YA. I. Kompleksnyj podhod k ocenke effektivnosti funkcionirovaniya svobodnyh ekonomicheskikh zon Respubliki Belarus' / YA. I. Muratova // Belorusskij ekonomicheskij zhurnal. – 2017. – № 1. – S. 38–48.
12. Gromova, V. S. Analiz ekonomicheskoy effektivnosti funkcionirovaniya svobodnyh ekonomicheskikh zon v Respublike Belarus' kak bazisa dlya sozdaniya innovacij / V. S. Gromova, I. S. Polonik // Novaya ekonomika. – 2019. – № 2 (74). – S. 63–67.
13. Suhoparova, T. A. Kompleksnyj podhod k ocenke vliyaniya osobykh ekonomicheskikh zon na investicionnyu privlekatel'nost' regiona / T. A. Suhoparova, A. M. Blinova // Vestnik ekonomiki, prava i sociologii. – 2014. – № 1. – S. 40–43.
14. Kryukova, E. V. Ocenka effektivnosti funkcionirovaniya zon s osobym ekonomicheskim statusom v regionah Rossii / E. V. Kryukova // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3: Ekonomika. Ekologiya. – 2014. – № 4 (27). – S. 57–62.
15. Men'shchikova, V. I. Metodika ocenki rezul'tativnosti funkcionirovaniya osobykh ekonomicheskikh zon / V. I. Men'shchikova, I. V. Peredkova // Social'no-ekonomicheskie yavleniya i processy. – 2013. – № 11 (057). – S. 70–76.
16. Kuznecova, O. V. Osoby ekonomicheskie zony: effektivny ili net? / O. V. Kuznecova // Prostranstvennaya ekonomika. – 2016. – № 4. – S. 129–152.
17. Novikova, T. S. Ocenka effektivnosti gosudarstvenno-chastnogo partnerstva pri sozdanii osobykh ekonomicheskikh zon / T. S. Novikova, N. V. CHuhlomin // Mir ekonomiki i upravleniya. – 2010. – T. 10. – № 4. – C. 180–192.
18. Matushevskaya, E. A. Formirovanie kompleksnogo podhoda k ocenke effektivnosti funkcionirovaniya svobodnoj ekonomicheskoy zony / E. A. Matushevskaya // Ekonomika regiona. – 2018. – T. 14, Vyp. 3. – S. 870–883.
19. Effectiveness of special economic zones of Poland / R. Pastusiak, M. Bolek, M. Jasiniak, J. Keller // Zb. rad. Ekon. fak. Rij. – 2018. – Vol. 36, № 1. – P. 263–285. – URL: https://www.researchgate.net/publication/326525620_Effectiveness_of_special_economic_zones_of_Poland (date of access: 20.09.2024).
20. The effects of special economic zones on employment and investment: a spatial panel modeling perspective / P. Cizkowicz, M. Cizkowicz-Pekala, P. Pekala, A. Rzonca // Journal of Economic Geography. – 2017. – T. 17, № 3. – P. 571–605. – URL: https://mpra.ub.uni-muenchen.de/63176/1/MPPRA_paper_63176.pdf (date of access: 20.09.2024).

References

1. Druzik, YA. S. Svobodnye ekonomicheskie zony v sisteme mirovogo hozyajstva : ucheb. posobie / YA. S. Druzik. – Minsk : «FUAinform», 2000. – 304 s.
2. O kriteriyah ocenki effektivnosti deyatel'nosti rezidentov svobodnyh ekonomicheskikh zon na territorii Respubliki Belarus' : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 27 sent. 2006 g., № 1264 // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C20601264> (data obrashcheniya: 20.09.2024).
3. Ob utverzhdenii metodiki ocenki effektivnosti deyatel'nosti special'nyh ekonomicheskikh i industrial'nyh zon : prikaz Ministra industrii i infrastruktornogo razvitiya Resp. Kazahstan, 12 avg. 2019 g., № 637 // Informacionno-pravovaya sistema normativnykh pravovykh aktov Respubliki Kazahstan. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1900019248> (data obrashcheniya: 20.09.2024).
4. Proekt prikaza Ministra industrii i infrastruktornogo razvitiya Respubliki Kazahstan «O vnesenii izmeneniya v prikaz Ministra industrii i infrastruktornogo razvitiya Respubliki Kazahstan ot 12 avgusta 2019 goda № 637 «Ob utverzhdenii metodiki ocenki effektivnosti deyatel'nosti special'nyh ekonomicheskikh i industrial'nyh zon». – URL: <https://legalacts.egov.kz/npa/view?id=14430652> (data obrashcheniya: 20.09.2024).
5. O poryadke ocenki effektivnosti funkcionirovaniya osobykh ekonomicheskikh zon : postanovlenie Pravitel'stva RF, 7 iyulya 2016 g., № 643 // Informacionno-pravovoj portal Garant.ru. – URL: <https://base.garant.ru/71442538> (data obrashcheniya: 20.09.2024).

Материал поступил 23.09.2024, одобрен 17.10.2024, принят к публикации 17.10.2024

УДК 378.4

РОЛЬ УНИВЕРСИТЕТОВ В ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ: ОПЫТ БЕЛАРУСИ И КЫРГЫЗСТАНА

Д. В. Станкевич¹, А. И. Крамаренко²

¹ К. э. н., заместитель декана экономического факультета по идеологической и воспитательной работе, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: dvstan23@g.bstu.by

² К. э. н., доцент кафедры «Маркетинг», НОУ УНПК «Международный университет Кыргызстана», Бишкек, Кыргызская Республика, e-mail: kramarenko@iuk.kg

Реферат

Цифровая трансформация экономики стала неотъемлемой частью современного бизнеса, требующего адаптивности и готовности к изменениям. В данной статье рассматривается роль университетов как ключевых игроков в этом процессе, подчеркиваются основные направления влияния университетов на цифровую трансформацию: подготовка квалифицированных кадров, исследовательская деятельность, сотрудничество с бизнесом и поддержка стартапов. Целью исследования является изучение теоретических основ цифровизации экономики, места учреждений высшего образования в реализации процессов цифровой трансформации, а также анализ практического опыта участия университетов в разработке подходов и мероприятий по ускорению и повышению эффективности процессов трансформации. Достижение поставленной цели предполагает использование нескольких методов исследования. Теоретические аспекты рассматриваемой темы раскрыты и обобщены благодаря анализу литературных источников отечественных и зарубежных авторов. В ходе теоретического анализа рассмотрены понятия цифровой экономики, обозначена необходимость подготовки высококвалифицированных кадров для решения задач цифровой экономики, важная функция при этом возложена на университеты. Университет рассматривается не только как место подготовки кадров и получения компетенций, но и как интеллектуальный центр, работающий по принципу сетевого взаимодействия. Выявлено, что не все высшие учебные заведения имеют необходимую базу для подготовки специалистов по актуальным направлениям. В этой связи предложены шаги, направленные на интеграцию цифровых технологий в образовательные процессы и исследовательскую деятельность для удовлетворения потребности в высококвалифицированных кадрах для цифровой экономики. Практическая сторона исследуемой темы представлена анализом работы конкретных высших учебных заведений (метод кейс-стади).

Ключевые слова: цифровая трансформация, университеты, образование, инновации, исследовательская деятельность, стартапы, сотрудничество.

THE ROLE OF UNIVERSITIES IN DIGITAL TRANSFORMATION: THE EXPERIENCE OF BELARUS AND KYRGYZSTAN

D. V. Stankevich, A. I. Kramarenko

Abstract

Digital transformation of the economy has become an integral part of modern business, requiring adaptability and readiness to change. This article examines the role of universities as key players in this process, emphasizing the main directions of universities' influence on digital transformation: training of qualified personnel, research activities, cooperation with business and support for startups. The aim of the research is to study the theoretical foundations of digitalization of the economy, the place of higher education institutions in the implementation of digital transformation processes, as well as to analyze the practical experience of universities' participation in the development of approaches and measures to accelerate and improve the efficiency of transformation processes. The achievement of the set goal implies the use of several research methods. The theoretical aspects of the topic under consideration are disclosed and generalized thanks to the analysis of literary sources of domestic and foreign authors. In the course of theoretical analysis the concepts of digital economy, digital culture, digital maturity are considered, the necessity of training highly qualified personnel to meet the challenges of the digital economy is outlined, an important function in this case is assigned to universities. The university is considered not only as a place for training personnel and obtaining competencies, but also as an intellectual center working on the principle of networking. It is revealed that not all higher education institutions have the necessary base for training specialists in relevant areas. In this regard, steps aimed at integrating digital technologies into educational processes and research activities to meet the need for highly qualified personnel for the digital economy are proposed. The practical side of the topic under study is presented by analyzing the work of specific higher education institutions (case study method).

Keywords: digital transformation, universities, education, innovation, research activities, startups, cooperation.

Введение

Современный мир характеризуется значимыми изменениями, которые вызваны развитием и повсеместным распространением информационных технологий. Применение технологий позволяет рационально использовать ресурсы, осуществлять модернизацию используемых производственных технологий, государственным органам предпринимать необходимые действия в контексте происходящих изменений [8] и быстро реагировать на возникающие проблемы, «передовые цифровые технологии выступают ключевым фактором построения единого информационного поля, в рамках которого будет осуществляться оценка выявленных социально-экономических рисков и угроз с поиском наиболее приемлемых вариантов дальнейшей реализации государственно-управленческих функций» [12, с. 5].

В статье рассматривается опыт двух стран – Республики Беларусь и Кыргызской Республики – в области цифровой трансформации высшего образования. Выбор стран обусловлен активной реа-

лизацией национальных программ цифровизации и схожестью задач в области модернизации высшего образования. В частности, анализируется опыт Брестского государственного технического университета (БрГТУ) и Международного университета Кыргызстана (МУК) как показательных примеров реализации стратегий цифровой трансформации.

Исследование роли университетов в цифровой трансформации

Современная экономика находится в стадии перехода к новому технологическому укладу, что оказывает существенное влияние на многие процессы, происходящие в мире. Технологические уклады, представляющие собой относительно самостоятельные комплексы отраслей и технологий, которые формируют структуру экономической системы, изменяются циклично в рамках так называемых «длинных волн Кондратьева». При этом на каждом этапе развития основным двигателем трансформаций выступают технологии [4].

Одним из признаков нового технологического уклада является цифровая трансформация всех сфер хозяйственной деятельности общества.

Среди причин неудачных цифровых трансформаций можно обозначить «недостаточную эффективность кадровой политики, отсутствие готовности человеческого ресурса к уровню автоматизации и развития кадровых подсистем управления» [16, с. 83]. Немаловажным критерием является развитие цифровой компетентности, которая включает в себя навыки взаимодействия с информационными и киберфизическими технологиями, работы с информацией, способности использовать информацию для прогнозирования, обобщать и анализировать ее.

Трансформация экономики невозможна без специализированного и квалифицированного труда, что предъявляет новые требования к образованию, которое становится ключевым фактором успеха цифровизации.

Система высшего образования одной из первых призвана реагировать на изменения в обществе для быстрой адаптации и трансформации образовательных программ к требованиям рынка труда [5]. В настоящее время наблюдаются качественные изменения, вызванные становлением цифрового общества и развитием соответствующей ему экономики. Цифровое общество предъявляет новые требования как к университетам в целом, так и к подготовке специалистов в частности [3]. Для того чтобы оставаться востребованным, специалисту необходимо постоянно приобретать актуальные профессиональные навыки и компетенции, которые способствуют социальной интеграции, личностному развитию, а также конкурентоспособности на рынке труда. Технологический прогресс создает основу для роста потребностей и возможностей их удовлетворения [3].

Основой становления цифровой экономики является развитие университетов, не только как учреждений по передаче знаний и формированию профессиональных навыков, но и как интеллектуальных центров, работающих по принципу сетевого взаимодействия [13]. Такой подход предполагает объединение ресурсов, идей и знаний, сотрудничество и координацию усилий учреждений образования, представителей бизнес-сообщества и органов власти для достижения поставленных целей [4], т. е. речь идет о концепции «Университет 3.0» с последующим развитием до «Университет 4.0». Университеты должны быть трансформированы в крупные научные центры, которые производят и выводят на рынок новые научно-технические продукты, тем самым привлекая финансовые ресурсы и повышая свою независимость, помимо этого необходимо поощрять создание новых предприятий преподавателями и студентами с целью коммерциализации результатов научных исследований, реализовывать полный цикл воспроизводства нового знания (от генерации идей до создания опытных образцов инноваций) и, конечно же, способствовать интеграции образования, науки, бизнеса, тем самым формируя предпосылки для инновационного развития страны [9].

Подготовка высококвалифицированных специалистов для цифровой экономики невозможна без цифровой трансформации внутренних процессов университета, внедрения информационных технологий в обеспечение его функционирования. В Республике Беларусь принята Государственная программа «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы, в которой отдельно выделены направления цифровой трансформации системы образования, что подчеркивает важность данной отрасли для социально-экономического развития страны. Одной из задач является обеспечение доступности образования, основанного на применении современных информационных технологий как для повышения качества образовательного процесса, так и для подготовки граждан к жизни и работе в условиях цифровой экономики. Согласно программе, цифровая трансформация системы образования направлена на эффективное и гибкое применение новейших информационных технологий как для повышения качества образовательного процесса, так и для перехода к персонализированному обучению [6].

Человеческий и информационный потенциал – ключевые факторы цифровой трансформации общества и экономики. Система подготовки ИТ-кадров подвергается значительным изменениям. Можно отметить несоответствие количества и качества подготавливаемых специалистов потребностям индустрии информационных

технологий, что «демонстрирует структурно-компетентностный дисбаланс, существующий в системе подготовки кадров» [5, с. 1968].

Проведенные исследования позволяют высказать суждение, что университетам следует предпринять ряд стратегических шагов, направленных на интеграцию цифровых технологий в образовательные процессы и исследовательскую деятельность для удовлетворения потребности в высококвалифицированных кадрах для цифровой экономики. Среди ключевых действий могут быть выделены следующие:

- 1) обновление образовательных программ в соответствии с требованиями экономики;
- 2) сотрудничество с реальным сектором экономики;
- 3) поддержка стартапов и предпринимательства;
- 4) создание научно-исследовательских центров и лабораторий;
- 5) формирование экосистемы взаимодействия в рамках концепции «Университет 3.0» («Университет 4.0»).

Перечисленные действия помогут университетам не только адаптироваться к вызовам цифровизации, но и сыграть активную роль в формировании цифровой экономики, подготавливая специалистов, готовых к работе в новом технологическом процессе» [7].

Высшие учебные заведения Республики Беларусь реализуют мероприятия в рамках перечисленных ранее стратегических шагов. Рассмотрим кейс Брестского государственного технического университета. В БрГТУ готовят специалистов по нескольким направлениям: строительство, машиностроение, информационные технологии, экология и экономика. Университет гибко реагирует на изменение потребностей экономики в высококвалифицированных специалистах и требования работодателей к ним, увеличивая или сокращая набор абитуриентов по отдельным специальностям. На регулярной основе обновляются учебные программы и открываются новые направления подготовки специалистов, связанные с цифровизацией и развитием современных технологий. Так для нужд экономики осуществляется подготовка по таким специальностям, как электронный маркетинг и экономика электронного бизнеса, где в учебных программах комбинируются технические (программирование, информатика) и гуманитарные (маркетинг, менеджмент, бизнес-планирование) дисциплины. Таким образом на основе междисциплинарного подхода выпускник получает компетенции программиста и экономиста (маркетолога), что значительно повышает его конкурентные преимущества на рынке труда в условиях цифровой трансформации. Университет вносит значительный вклад в подготовку специалистов в сфере информационных технологий по направлениям программная и компьютерная инженерия, искусственный интеллект. В образовательном процессе активно используются электронные ресурсы – внедрена платформа дистанционного образования на базе Moodle, Google Classroom. Репозиторий БрГТУ дает доступ студентам и преподавателям к широкому спектру информационных ресурсов (методические указания, электронные учебно-методические комплексы, учебные пособия и др.).

В рамках взаимодействия «университет – предприятие» представители предприятий-заказчиков кадров привлекаются к разработке образовательных программ в рамках академических компетенций, а также к преподаванию дисциплин профессионального цикла, что дает возможность более гибко адаптировать обучающихся к рынку труда посредством сотрудничества с потенциальными работодателями еще на стадии обучения [9].

Особое внимание уделяется компетентностному подходу в образовании. В БрГТУ создается центр компетенций «Промышленная робототехника и цифровой инжиниринг», основная цель которого – повышение эффективности реализации образовательных, научно-исследовательских и научно-практических проектов в области исследования, разработки и сопровождения при внедрении автоматизированных систем организации и управления цифровым производством в высокотехнологичных отраслях экономики [2].

На современном этапе качественная подготовка специалиста невозможна без взаимодействия с предприятиями [17]. Для этого создаются филиалы кафедр, учебно-производственные объединения, исследовательские лаборатории. В университете функционируют четыре учебно-научно-производственных объединения, десять научно-исследовательских лабораторий, учебно-научно-исследовательский полигон «Индустриальные технологии строи-

тельного производства», действует аккредитованный Испытательный центр в области строительных материалов и конструкций. В 2021 г. в БрГТУ создано две отраслевые лаборатории с целью внедрения технологий умного производства (BIM-проектирование, искусственный интеллект, интернет вещей, Roboti-синтеграция) на предприятиях с крупносерийным производством. Отраслевая лаборатория «Системы идентификации и промышленная робототехника» открыта совместно с крупнейшим в Республике Беларусь предприятием по переработке и производству молочной продукции ОАО «Савушкин продукт». Сотрудничество с ведущими предприятиями Республики Беларусь не только приносит практическую пользу, но и открывает новые возможности для привлечения финансирования, что способствует развитию инновационной инфраструктуры и продвигает науку вперед. Симбиоз образования и производства формирует устойчивую базу для инновационного развития, подготовки квалифицированных специалистов и внедрения передовых технологий в реальный сектор экономики [9].

Для поиска студенческих предпринимательских инициатив в университете проводятся конкурсы стартапов, хакатоны с участием представителей бизнеса. Поддержке стартапов и молодежного предпринимательства уделяется особое внимание как с теоретической, так и практической стороны: у студентов формируются предпринимательские компетенции, для этого в учебные планы ряда специальностей включены такие дисциплины, как «Основы предпринимательства», «Бизнес-стартап», «Бизнес-планирование IT-стартапов», «Инновационные технологии эффективного менеджмента», «Коммерческая деятельность». В лабораториях активно применяются подходы проектного обучения, где в рамках учебного процесса студенты могут работать над своими инициативными проектами, тематика которых увязана с учебными планами соответствующих специальностей и согласуется с заказчиками кадров [9].

Одним из перспективных направлений цифровой экономики является развитие кластерных инициатив. В настоящее время важнейшим инновационным направлением развития университета является разработка компьютерных моделей производственных процессов на базе цифрового инжиниринга. С этой целью создается и развивается мультидисциплинарный образовательный кластер машиностроения, искусственного интеллекта и робототехники, строительства. Структура кластера ориентирована на обеспечение роста уровня образования талантливых студентов. В этом контексте кластерная инициатива в БрГТУ содействует внедрению технологий умного производства, таких как информационное моделирование зданий и сооружений (BIM-проектирование), на предприятиях перерабатывающей промышленности, сельского хозяйства и в других секторах с крупносерийным производством. Инициатива включает интеграцию технологий умного производства с нанотехнологиями, биотехнологиями и различными направлениями когнитивных, социальных и гуманитарных наук. К таким технологиям относятся конвергентные технологии, искусственный интеллект, интернет вещей, робототехника, 3D-печать и облачные решения.

Таким образом, БрГТУ, достигнув нового уровня в научных исследованиях и активно реализуя проектное обучение с участием реального сектора экономики, становится катализатором для развития новых отраслей, производств и технологий.

Опыт цифровой трансформации системы высшего образования Кыргызской Республики демонстрирует иной подход к решению задач цифровизации. Согласно принятой "Программе развития образования Кыргызской Республики на 2021–2040 гг.", цифровая трансформация определена как одно из ключевых направлений модернизации образовательной системы [19]. Особое внимание уделяется развитию международного сотрудничества и интеграции в глобальное образовательное пространство, что позволяет ускорить процессы цифровой трансформации через заимствование лучших мировых практик.

Стратегические направления цифровой трансформации в Кыргызской Республике закреплены в ряде государственных программ. Ключевым документом является Концепция цифровой трансформации «Цифровой Кыргызстан» на 2019–2023 годы, а также новая Концепция цифровой трансформации на 2024–2028 годы [11]. В Концепции образование выделено как один из приоритетных секторов. Стратеги-

ческая цель в данной области – создание единой цифровой образовательной экосистемы, которая должна обеспечить отслеживание полного пути прохождения гражданами системы образования от детского сада до окончания вуза и трудоустройства; формирование основных электронных реестров: учеников и студентов, учителей и преподавателей, образовательных учреждений; создание центральной информационной системы по управлению образованием, обеспечивающей аналитику данных для принятия управленческих решений; внедрение единой цифровой библиотеки учебных материалов; цифровизацию аттестации научных и научно-педагогических кадров.

Кроме того, в «Программе развития образования Кыргызской Республики на 2021–2040 гг.» цифровизация обозначена как одно из трех ключевых направлений модернизации системы образования [18]. Программа предусматривает комплексную трансформацию образовательной системы с целью адаптации к требованиям цифровой экономики. Важно отметить, что государственная политика Кыргызстана в сфере цифровизации высшего образования имеет выраженный международный аспект, особенно в контексте сотрудничества со странами ЕАЭС [10, 19]. В частности, Кыргызстан активно участвует в реализации цифровой повестки ЕАЭС, что предусматривает гармонизацию образовательных стандартов, развитие академической мобильности и создание единого цифрового образовательного пространства.

В качестве показательного примера цифровой трансформации университетов Кыргызстана рассмотрим опыт НОУ УНПК "Международный университет Кыргызстана" (МУК). МУК является одним из ведущих частных университетов страны, осуществляющим подготовку специалистов по различным направлениям с активным внедрением цифровых технологий в образовательный процесс.

МУК последовательно реализует процесс цифровой трансформации образовательного процесса в соответствии с национальными приоритетами развития информационного общества. Согласно исследованию, построение системы электронного образования требует решения целого ряда важных задач, включая обеспечение доступности образования, разработку образовательных программ, внедрение электронных форм учебников и цифровых образовательных сред [1]. Центральным элементом административной цифровой инфраструктуры университета является система "ABH" (автоматизированная веб-система), которая обеспечивает комплексное управление учебным процессом. Система "ABH" отличается от международных аналогов тем, что изначально разрабатывалась с учетом специфики образовательного процесса в странах постсоветского пространства и обеспечивает полную интеграцию с национальными системами учета и контроля качества образования.

Параллельно с системой "ABH" в университете функционирует платформа дистанционного образования на базе Moodle, предназначенная специально для студентов заочной формы обучения. Значимым компонентом цифровой инфраструктуры МУК является доступ к электронной библиотеке, предоставляющей студентам и преподавателям возможность работы с широким спектром информационных ресурсов.

В настоящее время МУК внедрена система электронного документооборота на базе платформы "Е-кызмат" (электронная служба), что позволило оптимизировать административные процессы и повысило эффективность управления университетом. "Е-кызмат" представляет собой национальную информационную систему, разработанную в рамках государственной программы цифровизации Кыргызской Республики и внедряемую в деятельность государственных органов и образовательных учреждений страны. Система "Е-кызмат" обеспечивает автоматизацию процессов управления человеческими ресурсами, документооборота и административного менеджмента. Важным аспектом системы "Е-кызмат" является интеграция с другими информационными системами государственных органов, что обеспечивает единое информационное пространство в сфере управления человеческими ресурсами.

В рамках цифровой трансформации МУК реализует интегрированный подход к модернизации образовательного процесса. Университет внедрил единую информационно-образовательную среду, объединяющую административные, образовательные и исследовательские процессы. Система электронного документооборота интегрирована с платформой дистанционного обучения, что обес-

печивает эффективное взаимодействие между всеми участниками образовательного процесса.

Особо следует отметить развитие научно-исследовательской инфраструктуры, способствующей формированию компетенций в области цифровых технологий. В структуре МУК функционирует «Лаборатория искусственного интеллекта» (ЛИИ, AILab), созданная с целью разработки и реализации фундаментальных и прикладных исследований в области создания интеллектуальных компьютерных систем на основе искусственных нейронных сетей. Лаборатория выступает интегратором научно-исследовательского, образовательного и инновационного потенциала университета в сфере искусственного интеллекта.

Особенностью функционирования лаборатории является ее интеграция в образовательный процесс. Студенты имеют возможность засчитывать проекты, выполняемые в рамках лаборатории, в качестве курсовых работ, практик и выпускных квалификационных исследований, что способствует формированию практико-ориентированных компетенций в области искусственного интеллекта и цифровых технологий.

Лаборатория искусственного интеллекта МУК демонстрирует эффективность интеграции образовательной и научно-исследовательской деятельности для формирования цифровых компетенций у обучающихся и решения практических задач различных отраслей экономики. Данный опыт подтверждает значимость университетов как центров инновационного развития в условиях цифровой трансформации.

В контексте цифровой трансформации МУК развивает сотрудничество с представителями бизнес-сообщества, ориентируясь на формирование у выпускников компетенций, востребованных в условиях цифровой экономики. Взаимодействие осуществляется по нескольким ключевым направлениям.

Важным механизмом сотрудничества является привлечение представителей бизнес-структур по вопросам образовательных программ, в который входят представители ведущих компаний Кыргызстана. Работодатели участвуют в экспертизе образовательных программ и разработке рекомендаций по их актуализации с учетом требований рынка труда. В 2023–2024 учебном году при их участии были скорректированы восемь образовательных программ различных направлений, что позволило повысить их соответствие запросам работодателей.

Важным аспектом взаимодействия с бизнес-сообществом является привлечение практикующих специалистов к преподавательской деятельности. В настоящее время 12 % учебных курсов по различным направлениям ведутся специалистами-практиками, что обеспечивает интеграцию актуальных практических знаний в образовательный процесс.

Обсуждение

В данной статье раскрывается значимость высших учебных заведений в процессе цифровизации экономики и общества. Университеты не только обеспечивают подготовку высококвалифицированных специалистов, но также становятся активными участниками инновационной экосистемы, играя ключевую роль в научно-техническом прогрессе и развитии цифровой экономики.

Важным аспектом является адаптация образовательных программ к новым требованиям цифрового общества. Университеты должны пересматривать и обновлять свои курсы, внедряя такие направления, как искусственный интеллект, большие данные, блокчейн и робототехника [20]. Подобные дисциплины позволяют подготовить специалистов, востребованных на современном рынке труда, где цифровые навыки становятся важнейшим условием успешности. Более того, междисциплинарный подход, объединяющий технические и гуманитарные дисциплины, создает уникальные компетенции у выпускников, позволяя им более эффективно адаптироваться к стремительно меняющемуся миру.

Однако одной только теорией процесс цифровой трансформации не ограничивается. Университеты должны активно сотрудничать с бизнесом и государственными структурами для обеспечения практического опыта студентам. Это включает привлечение представителей бизнеса к разработке и преподаванию учебных курсов, организацию стажировок на предприятиях и участие в реальных проектах [15]. Та-

кое сотрудничество помогает студентам не только овладевать теоретическими знаниями, но и применять их на практике, формируя навыки, необходимые для успешной карьеры в цифровой экономике.

Еще одним значимым направлением деятельности университетов является поддержка стартапов и предпринимательства. Создание инкубаторов, проведение конкурсов и хакатонов стимулирует студентов разрабатывать и воплощать в жизнь свои инновационные идеи. Такие инициативы помогают молодым предпринимателям находить финансирование, менторскую поддержку и ресурсы для реализации своих проектов. Это особенно важно в контексте развития цифровой экономики, где инновации становятся основным двигателем роста.

Важную роль в цифровой трансформации играет развитие цифровой грамотности среди студентов и преподавателей. Университеты должны формировать у своих студентов не только базовые навыки работы с цифровыми технологиями, но и способность анализировать и обрабатывать большие объемы данных, принимать решения на основе этих данных и прогнозировать тенденции. Это требует от преподавателей постоянного повышения квалификации и готовности к обучению новым подходам.

Цифровая трансформация университетов затрагивает внутренние процессы, включая администрирование и управление учебными заведениями. Информационные технологии должны быть интегрированы в образовательные процессы для улучшения качества обучения, персонализации образовательных траекторий и повышения эффективности управления. Это предполагает создание единой информационной платформы для всех уровней образовательной системы, что позволит не только улучшить взаимодействие между университетами, студентами и государственными структурами, но и повысить общую эффективность работы учреждений.

Пример Брестского государственного технического университета показывает успешную реализацию цифровых инициатив. Университет не только внедряет современные образовательные программы, но и развивает научно-исследовательские центры, такие как Центр компетенций по промышленной робототехнике и цифровому инжинирингу. Это позволяет студентам и преподавателям участвовать в реальных проектах, тесно связанных с промышленностью, и решать актуальные задачи автоматизации производства. Такое взаимодействие между наукой и бизнесом способствует интеграции инноваций в экономику, повышая ее конкурентоспособность на международной арене.

Цифровизация высшего образования в Беларуси встречает и определенные вызовы. Одной из проблем является ограниченное финансирование и слабое развитие венчурного капитала. Это сокращает возможности для поддержки стартапов и внедрения инноваций. Общемировая тенденция показывает, что нехватка кадров и медленные изменения со стороны образовательных учреждений также затрудняют процесс цифровой трансформации.

При этом анализ процессов цифровой трансформации университетов Кыргызстана выявил ряд существенных проблем. Согласно результатам онлайн-опроса преподавателей вузов, 65 % респондентов отмечают недостаточный уровень владения цифровыми технологиями и испытывают трудности при работе в онлайн-режиме [19]. Наблюдается психологическая неготовность значительной части преподавательского состава к полному переходу на цифровые форматы обучения.

Компаративный анализ опыта цифровой трансформации высшего образования Республики Беларусь и Кыргызской Республики позволяет выявить как конвергентные тенденции, так и дивергентные особенности имплементации цифровых технологий в образовательное пространство.

Особого внимания заслуживает нормативно-правовое регулирование процессов цифровизации в обеих странах. Цифровая трансформация высшего образования регламентируется государственными программами и стратегиями, среди которых следует выделить Государственную программу «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы в Республике Беларусь и Концепцию цифровой трансформации «Цифровой Кыргызстан» на 2019–2023 годы с последующим обновлением на 2024–2028 годы в Кыргызской Республике. Данные нормативные акты определяют стратегические направления и ключевые индикаторы цифровизации образователь-

ного пространства, задавая концептуальную рамку для трансформационных процессов в сфере высшего образования.

Существенной конвергентной тенденцией является формирование цифровой образовательной среды. Университеты обеих стран демонстрируют значительный прогресс в развитии информационно-образовательных платформ, обеспечивающих администрирование учебного процесса, доступ к электронным образовательным ресурсам и коммуникацию между участниками образовательного процесса. На примере БрГТУ и МУК прослеживается тенденция к созданию интегрированных информационных систем, адаптированных к специфике образовательного процесса и управленческим задачам.

Интеграция образования и бизнеса представляет собой еще одну общую тенденцию в развитии систем высшего образования рассматриваемых стран. Наблюдается усиление взаимодействия университетов с представителями реального сектора экономики посредством создания филиалов кафедр, привлечения специалистов-практиков к образовательному процессу и совместной разработки образовательных программ. В контексте БрГТУ это реализуется через создание учебно-научно-производственных объединений и отраслевых лабораторий, а в МУК – через привлечение представителей бизнес-сообщества к экспертизе образовательных программ и преподавательской деятельности.

Развитие цифровых компетенций преподавателей также можно отнести к общим тенденциям. В обеих странах уделяется значительное внимание повышению цифровой грамотности и компетентности профессорско-преподавательского состава как ключевому фактору успешной цифровизации образования. Квантитативные показатели свидетельствуют о положительной динамике в этой области, хотя и с различной интенсивностью.

При наличии общих тенденций подходы к цифровизации высшего образования в Беларуси и Кыргызстане характеризуются существенными различиями. Прежде всего, следует отметить дивергентность моделей имплементации цифровых технологий. В Республике Беларусь преобладает эндогенная модель цифровизации, основанная на разработке собственных технологических решений и создании специализированных центров компетенций, таких как Центр компетенций «Промышленная робототехника и цифровой инжиниринг» в БрГТУ. В Кыргызстане наблюдается более выраженная экзогенная модель, характеризующаяся активным заимствованием зарубежных технологий и методик, интеграцией в международное образовательное пространство.

Значительные различия наблюдаются и в аспекте международной кооперации. Кыргызская Республика демонстрирует более интенсивное международное сотрудничество в области цифровизации образования, особенно в рамках ЕАЭС, что подтверждается статистическими данными (65 % студентов повысили уровень цифровых компетенций благодаря взаимодействию с российскими образовательными платформами). Белорусская модель в большей степени ориентирована на внутренние ресурсы и возможности, хотя и не исключает международного сотрудничества.

Отраслевая специфика также является фактором дифференциации. Цифровизация белорусских университетов тесно интегрирована с процессами промышленной цифровизации, что соответствует индустриальной ориентации экономики страны, в то время как в Кыргызстане наблюдается более диверсифицированный подход с акцентом на гуманитарные и социальные направления цифровой трансформации.

Существенные различия прослеживаются в инфраструктурном обеспечении цифровизации. Белорусские университеты характеризуются более развитой материально-технической базой и инфраструктурой для цифровизации образовательного процесса. В Кыргызстане отмечается более выраженная дифференциация между университетами в уровне технологического оснащения, что отражает общие социально-экономические различия между рассматриваемыми странами.

Наконец, различаются и институциональные механизмы цифровой трансформации. В Беларуси развитие получила модель «Университет 3.0» с перспективой трансформации в «Университет 4.0», предполагающая интеграцию образования, науки и предпринимательства. Кыргызская модель в большей степени ориентирована на

административную цифровизацию с постепенным расширением области применения цифровых технологий, что отражает различия в концептуальных подходах к модернизации высшего образования.

Таким образом, сравнительный анализ демонстрирует, что различия в подходах к цифровизации высшего образования в значительной степени детерминированы социально-экономическим контекстом и историческими особенностями развития систем высшего образования двух стран. При этом общие тенденции отражают глобальные процессы цифровой трансформации образовательного пространства, которые приобретают специфические формы в зависимости от национального контекста и институциональных особенностей.

Заключение

Результаты проведенного исследования цифровой трансформации университетов Беларуси и Кыргызстана позволяют сформулировать ряд фундаментальных выводов относительно роли высших учебных заведений в формировании цифровой экономики. В условиях различных социально-экономических контекстов оба государства демонстрируют приверженность стратегическому подходу к цифровизации высшего образования, закреплённому в национальных программных документах.

Компаративный анализ выявил существенные различия в методологических подходах к имплементации цифровых технологий. Белорусская модель характеризуется ориентацией на технологический суверенитет и индустриально-центрированную парадигму развития, что прослеживается в создании специализированных центров компетенций и отраслевых лабораторий. Кыргызская модель, напротив, базируется на принципах открытости международному сотрудничеству и приоритетном развитии административной цифровизации как фундамента для последующих трансформаций образовательного процесса.

Значимым синтетическим результатом исследования является концептуализация полицентрической модели цифровизации высшего образования, предполагающей вариативность институциональных форм при единстве стратегических целей. Данная модель обеспечивает адаптивность образовательных систем к национальным особенностям при сохранении возможностей интеграции в глобальное цифровое пространство.

Исследование демонстрирует, что эффективность цифровой трансформации университетов определяется не только технологическими факторами, но и системными изменениями в организационной культуре, методологии обучения и принципах взаимодействия с внешней средой. Университеты становятся не только реципиентами цифровых инноваций, но и активными субъектами формирования цифровой экономики через подготовку квалифицированных кадров, научные исследования и трансфер технологий.

Перспективный вектор развития цифровизации высшего образования связан с углублением интеграции образовательных, исследовательских и предпринимательских функций университетов на базе цифровых платформ. Это предполагает не только техническую модернизацию, но и фундаментальное переосмысление миссии университетов в цифровую эпоху, где ключевым фактором конкурентоспособности становится способность к непрерывным инновациям и междисциплинарному синтезу знаний.

Список цитированных источников

1. Проблемные задачи цифровизации системы высшего образования Кыргызстана / Б. И. Бийбосун, Ж. Т. Бексултанов, К. М. Юсупов, Ж. Жумалиева // *Colloquium-journal*. – 2020. – № 6 (58). – С. 126–129.
2. Брестский государственный технический университет : [сайт]. – URL: <https://www.bstu.by> (дата обращения 10.03.2025).
3. Валеева, Г. В. Роль и перспективы развития университета в современном цифровом обществе / Г. В. Валеева // *Общество: философия, история, культура*. – 2023. – № 3. – С. 56–60.
4. Вертакова, Ю. В. Роль университетов в процессах цифровой трансформации экономики / Ю. В. Вертакова // *Экономика и управление*. – 2018. – № 7 (153). – С. 54–64.
5. Гайнанов, Д. А. Приоритеты кадрового обеспечения цифровой экономики / Д. А. Гайнанов, А. Ю. Климентьев // *Креативная экономика*. – 2018. – № 12. – С. 1963–1976.

6. Государственная программа «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы // Министерство связи и информатизации Республики Беларусь. – URL: <https://www.mpt.gov.by/ru/gosudarstvennaya-programma-cifrovoe-razvitie-belarusi-na-2021-2025-gody> (дата обращения 10.03.2025).
7. Давыдова, Т. Е. Региональные университеты в цифровой экономике: уникальность или стандартизация? / Т. Е. Давыдова // Организатор производства. – 2018. – № 29 (1). – С. 90–105.
8. Европейская комиссия. План действий по цифровому образованию 2021–2027 // Европейское образовательное пространство. – URL: <https://education.ec.europa.eu/focus-topics/digital-education/action-plan> (дата обращения 10.03.2025).
9. Касперович, С. А. Формирование новой модели современного инженерного образования. Кейс Брестского государственного технического университета / С. А. Касперович, Н. С. Клишевич, Е. В. Шарапа // Вышэйшая школа. – 2024. – № 3. – С. 7–12.
10. Кенеева, Д. М. Цифровизация университета: новый взгляд на образование / Д. М. Кенеева, П. Эшенкулов // Известия НАН Кыргызской Республики. – 2024. – № 3. – С. 34–37.
11. Концепция цифровой трансформации Кыргызской Республики на 2024–2028 годы / Официальный сайт Президента Кыргызской Республики. – URL: <https://president.kg/ru> (дата обращения 10.03.2025).
12. Ламзи, Р. М. Прорывные цифровые технологии в системе государственного администрирования / Р. М. Ламзи // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2020. – Т. 16, № 1. – С. 4–16.
13. Марджинсон, С. Высшее образование и цифровая эпоха / С. Марджинсон // Исследования в области высшего образования. – 2015. – № 40 (7). – С. 1154–1169.
14. Мырзабаева, Н. М. Модернизация системы образования в условиях цифровой трансформации / Н. М. Мырзабаева // УНПК «Международный Университет Кыргызстана». – 2020.
15. Найт, С. Будущее университетов / С. Найт // Журнал политики и управления высшим образованием. – 2018. – № 40 (2). – С. 134–148.
16. Образование в цифровом мире: развитие навыков и компетенций, готовых к будущему // Организация экономического сотрудничества и развития. – URL: <https://www.oecd.org/en/about/projects/future-of-education-and-skills-2030.html> (дата обращения 10.03.2025).
17. Петрова, А. К. Цифровая трансформация: кадровые подсистемы управления инновационным развитием промышленных предприятий / А. К. Петрова, Н. В. Лашманова // Инновации. – 2019. – № 8. – С. 81–87.
18. Программа развития образования в Кыргызской Республике на 2021–2040 гг. // Юрист. – URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=35868724 (дата обращения 10.03.2025).
19. Раимкулова, А. С. Цифровизация в сфере образования Кыргызстана как аспект сотрудничества государств – членов ЕАЭС / А. С. Раимкулова // Вестник экономики, права и социологии. – 2022. – № 3. – С. 211–213.
20. Embracing digital technology: A new strategic imperative / M. Fitzgerald, N. Kruschwitz, D. Bonnet [et al.]. – MIT Sloan Management Review. – 2014. – Vol. 55, Iss. 2. – P. 1–12.
21. Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet : [sajt]. – URL: <https://www.bstu.by> (дата обращения 10.03.2025).
22. Valeeva, G. V. Rol' i perspektivy razvitiya universiteta v sovremennom cifrovom obshchestve / G. V. Valeeva // Obshchestvo: filosofiya, istoriya, kul'tura. – 2023. – № 3. – С. 56–60.
23. Vertakova, YU. V. Rol' universitetov v processah cifrovoy transformacii ekonomiki / YU. V. Vertakova // Ekonomika i upravlenie. – 2018. – № 7 (153). – С. 54–64.
24. Gajnanov, D. A. Prioritety kadrovogo obespecheniya cifrovoy ekonomiki / D. A. Gajnanov, A. YU. Kliment'ev // Kreativnaya ekonomika. – 2018. – № 12. – С. 1963–1976.
25. Gosudarstvennaya programma «Cifrovoe razvitie Belarusi» na 2021–2025 gody // Ministerstvo svyazi i informatizacii Respubliki Belarus'. – URL: <https://www.mpt.gov.by/ru/gosudarstvennaya-programma-cifrovoe-razvitie-belarusi-na-2021-2025-gody> (дата обращения 10.03.2025).
26. Davydova, T. E. Regional'nye universitety v cifrovoy ekonomike: unikal'nost' ili standartizaciya? / T. E. Davydova // Organizator proizvodstva. – 2018. – № 29 (1). – С. 90–105.
27. Evropejskaya komissiya. Plan dejstvij po cifrovomu obrazovaniju 2021–2027 // Evropejskoe obrazovatel'noe prostranstvo. – URL: <https://education.ec.europa.eu/focus-topics/digital-education/action-plan> (дата обращения 10.03.2025).
28. Kasperovich, S. A. Formirovanie novoj modeli sovremennogo inzhenerenogo obrazovaniya. Kejs Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta / S. A. Kasperovich, N. S. Klishevich, E. V. SHarapa // Vyshejschaya shkola. – 2024. – № 3. – С. 7–12.
29. Keneeva, D. M. Cifrovizaciya universiteta: novyj vzglyad na obrazovanie / D. M. Keneeva, P. Eshenkulov // Izvestiya NAN Kyrgyzskoj Respubliki. – 2024. – № 3. – С. 34–37.
30. Koncepciya cifrovoy transformacii Kyrgyzskoj Respubliki na 2024–2028 gody / Oficial'nyj sayt Prezidenta Kyrgyzskoj Respubliki. – URL: <https://president.kg/ru> (дата обращения 10.03.2025).
31. Lamzi, R. M. Proryvnye cifrovye tekhnologii v sisteme gosudarstvennogo administrirovaniya / R. M. Lamzi // Nacional'nye interesy: prioritety i bezopasnost'. – 2020. – Т. 16, № 1. – С. 4–16.
32. Mardzhinson, S. Vysshee obrazovanie i cifrovaya epoha / S. Mardzhinson // Issledovaniya v oblasti vysshego obrazovaniya. – 2015. – № 40 (7). – С. 1154–1169.
33. Myrzaabaeva, N. M. Modernizaciya sistemy obrazovaniya v usloviyah cifrovoy transformacii / N. M. Myrzaabaeva // UNPK «Mezhdunarodnyj Universitet Kyrgyzstana». – 2020.
34. Najt, S. Budushchee universitetov / S. Najt // Zhurnal politiki i upravleniya vysshim obrazovaniem. – 2018. – № 40 (2). – С. 134–148.
35. Obrazovanie v cifrovom mire: razvitie navykov i kompetencij, gotovyh k budushchemu // Organizaciya ekonomicheskogo sotrudnichestva i razvitiya. – URL: <https://www.oecd.org/en/about/projects/future-of-education-and-skills-2030.html> (дата обращения 10.03.2025).
36. Petrova, A. K. Cifrovaya transformaciya: kadrovye podsystemy upravleniya innovacionnym razvitiem promyshlennyh predpriyatij / A. K. Petrova, N. V. Lashmanova // Innovacii. – 2019. – № 8. – С. 81–87.
37. Programma razvitiya obrazovaniya v Kyrgyzskoj Respublike na 2021–2040 gg. // YUrist. – URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=35868724 (дата обращения 10.03.2025).
38. Raimkulova, A. S. Cifrovizaciya v sfere obrazovaniya Kyrgyzstana kak aspekt sotrudnichestva gosudarstv – chlenov EAES / A. S. Raimkulova // Vestnik ekonomiki, prava i sociologii. – 2022. – № 3. – С. 211–213.
39. Embracing digital technology: A new strategic imperative / M. Fitzgerald, N. Kruschwitz, D. Bonnet [et al.]. – MIT Sloan Management Review. – 2014. – Vol. 55, Iss. 2. – P. 1–12.

References

1. Problemnye zadachi cifrovizacii sistemy vysshego obrazovaniya Kyrgyzstana / B. I. Bijbosunov, ZH. T. Beksultanov, K. M. YUsupov, ZH. ZHumaliev // Colloquium-journal. – 2020. – № 6 (58). – С. 126–129.

Материал поступил 01.04.2025, одобрен 10.04.2025, принят к публикации 10.04.2025

УДК 001.101:330.342.2

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КАПИТАЛА В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ В ЭПОХУ ЦИФРОВИЗАЦИИ

К. И. Шарова

К. э. н., доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной экономики УО «Барановичский государственный университет», Барановичи, Беларусь, e-mail: kseniya86@mail.ru

Реферат

Возвышение роли и значимости нематериальных, неосязаемых активов, интеллекта, науки, знаний и информации, а также проникновение информационных и цифровых технологий во все сферы жизни общества – все это является тенденцией экономического развития большинства развитых стран мира на протяжении последних нескольких десятилетий. В современном мире бизнес и экономика становятся все более зависимыми от технологических инноваций. Искусственный интеллект является одним из ключевых факторов в современной экономике, изменяя способы производства, потребления и управления ресурсами, предоставляет компаниям возможность автоматизировать процессы, оптимизировать принятие решений, увеличивать производительность и экономить ресурсы. Это приводит к значительному повышению эффективности производства и конкурентоспособности предприятий. Развитие искусственного интеллекта оказывает значительное влияние на формирование человеческого интеллектуального капитала компаний и общества в целом. При этом в современном мире основным катализатором развития экономики является человеческий интеллектуальный капитал, воплощенный в кадрах высшей квалификации. В статье показаны проблемы развития искусственного интеллекта, а также обозначаются первостепенные задачи, которые необходимо решить для сохранения и накопления интеллектуальной составляющей белорусского общества.

Ключевые слова: интеллектуальный капитал, человеческий интеллектуальный капитал, искусственный интеллект, цифровизация, образование.

INTERACTION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND HUMAN CAPITAL IN MODERN SOCIETY IN THE ERA OF DIGITALIZATION

K. I. Sharova

Abstract

The rise of the role and importance of intangible assets, intelligence, science, knowledge and information, as well as the penetration of information and digital technologies into all spheres of society - all this has been a trend in the economic development of most developed countries in the world over the past few decades. In the modern world, business and the economy are becoming increasingly dependent on technological innovation. Artificial intelligence is one of the key factors in the modern economy, changing the methods of production, consumption and resource management, providing companies with the opportunity to automate processes, optimize decision-making, increase productivity and save resources. This leads to a significant increase in production efficiency and competitiveness of enterprises. The development of artificial intelligence has a significant impact on the formation of human intellectual capital of companies and society as a whole. At the same time, in the modern world, the main catalyst for economic development is human intellectual capital, embodied in highly qualified personnel. The article shows the problems of the development of artificial intelligence, and also identifies the primary tasks that need to be solved to preserve and accumulate the intellectual component of the Belarusian society.

Keywords: intellectual capital, human intellectual capital, artificial intelligence, digitalization, education.

Введение

В современном мире повышается роль и значимость нематериальных активов, знаний, интеллекта, науки, а также проникновение информационных и цифровых технологий во все сферы общественной жизни. Искусственный интеллект является ключевым элементом для создания и управления интеллектуальным капиталом компаний, позволяя последним быстрее адаптироваться к изменяющимся рыночным условиям. При этом возможности, которые открывает перед бизнесом и обществом использование искусственного интеллекта, не ограничиваются лишь автоматизацией производства – его влияние распространяется на формирование человеческого интеллектуального капитала. Кроме того, проникновение технологий нейросетей в различные сферы деятельности сопровождается изменениями в структуре рынка труда, способствует росту производительности и созданию новых возможностей для улучшения качества жизни. Одновременно это вызывает необходимость пересмотра подходов к формированию интеллектуального капитала как ключевого элемента конкурентоспособности компаний и государств в цифровую эпоху. В целом внедрение и использование возможностей искусственного интеллекта в экономике имеет значительное влияние на рост интеллектуального капитала как отдельных предприятий, так и общества в целом.

Материалы и методы исследования

Проблемы цифровой трансформации современного общества, влияния на него современных технологий нейросетей, а также формирование интеллектуального капитала анализируются различными

отечественными и зарубежными учеными и исследователями, такими как С. В. Абламейко, Н. М. Абдикеев, А. В. Бондарь, В. А. Долятовский, В. Г. Дайнеко, Е. Ю. Дайнеко, Н. А. Жебентяева, А. В. Кузнецова, Д. В. Колпаков, М. В. Кудина, О. В. Лосева, Ю. Ю. Савченко и др. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. В рамках их исследований приводится обоснование интеллектуального капитала в качестве важнейшего ресурса современного общества, выявляются проблемы развития экономики в условиях цифровизации. Однако научные проблемы накопления интеллектуального капитала как фактора цифровизации и информатизации экономики, а также выявления степени взаимодействия таких категорий, как искусственный интеллект и интеллектуальный капитал, должного отражения не нашли.

В данной статье используются общенаучные методы исследования. Информационной базой послужили научные труды и статьи современных отечественных и зарубежных ученых, материалы государственных статистических органов Республики Беларусь.

Результаты исследования и их обсуждение

В современной научной литературе четко сложилось единогласное мнение, что знания, информация, интеллектуальный капитал выступают на сегодняшний день основополагающими ресурсами.

Исследования в области интеллектуальных активов разделились на несколько направлений. Одним из них стало управление знаниями (KM-knowledge management) как одно из основных направлений менеджмента организации и искусство капитализации нематериальных активов [2, 4].

Сегодня развитие системы управления знаниями получило развитие больше в рядах практиков, нежели в научном сообществе, где получают развитие гибкое управление знаниями, тесно переплетающееся с гибким управлением проектами на основе Agile-технологий, scrum-методов и т. д., причем в большей мере данные тенденции свойственны для IT-компаний. И если ранее управление знаниями сводилось к внедрению IT-разработок, способствующих сохранению, структурированию, анализу, поиску отчетов, документов для выявления наиболее успешного опыта решения тех или иных проблем, то сегодня все больше приходит осознание того, что в центре внимания находится человек – создатель знаний, соответственно терпит изменения и система управления.

На сегодняшний день данная модель трансформируется в систему управления интеллектуальным капиталом. Категория «интеллектуальный капитал» становится центральным объектом исследования как ученых теоретиков, определяющих место данной дефиниции в системе факторов производства и в целом роль в экономической системе, так и практиков, пытающихся находить конкурентные преимущества и пути развития организаций в современном, глобально меняющемся мире [9, 10, 11].

Объединяя два различных направления исследований в научной литературе, подчеркнем, что знания выступают объектом управления, эффективность которого определит в будущем формирование из этого знания такой фактор производства как интеллектуальный капитал.

Интеллектуальный капитал представляет собой создающий стоимость нематериальный актив, а в основе его расширенного воспроизводства лежит интеллектуальная деятельность человека как носителя человеческого интеллектуального капитала, обладающего знаниями и умениями в качестве важнейшей ценности как на микро-, так и на макроуровне национальной экономики [12, с. 89].

В условиях информатизации общества и экономики, тотального распространения цифровых технологий на все сферы человеческой жизни, интеллектуальный капитал приобретает специфические черты, видоизменяется под действием глобальных тенденций. Данные тенденции оказывают влияние на все компоненты интеллектуального капитала, каждую из которых следует рассмотреть подробнее.

Изначально сформировалась трехкомпонентная структура интеллектуального капитала, включающая человеческий, структурный и потребительский (Т. Стюарт) [13]. Кроме вышеназванных, учеными в данную структуру добавляют следующие виды капитала (либо заменяют): организационный, социальный, репутационный, брендовый, маркетинговый, производственный, кадровый, рыночный, процессный, инновационный и т. д.

Несомненно, для оценки интеллектуального капитала фирмы имеет значение все виды интеллектуального капитала. Однако для успешного развития компании и повышения ее конкурентоспособности имеет первоочередное значение человеческий интеллектуальный капитал, а значит инвестиции в него должны быть приоритетными. Именно он формирует и структурный, и потребительский, и другие виды капитала (нематериальные активы, репутацию, бренды, отношения с клиентами, патенты, инновации и т. д.).

В этой связи целесообразно представляется градация интеллектуального капитала всего на две составляющие: человеческий и структурный. Данного подхода придерживаются многие ученые. Так, А. В. Бондарь, Н. А. Жебентяева и Э. Хостилович отмечают, что интеллектуальный капитал представляет собой сумму человеческого интеллектуального капитала в виде знаний, навыков, умений человека, его мобильности и креативности и структурного интеллектуального капитала в виде нематериального потенциала, обеспечивающего возможность создавать и реализовывать добавленную стоимость в ходе движения интеллектуального капитала [3, с. 51].

О. В. Лосева и Н. М. Абдикеев подчеркивают, что человеческий интеллектуальный капитал интегрирует в себе интеллектуально-аттестационные характеристики человеческого капитала, а также формализованные и отчуждаемые результаты своей интеллектуальной деятельности, которые в итоге включаются в организационный и рыночный капитал [9, с. 75].

Человеческий интеллектуальный капитал сконцентрирован в носителе знаний, который является его собственником. Именно человеческий интеллектуальный капитал в данном контексте является само-

возрастающей стоимостью. При этом инвестирование в интеллектуальный капитал работников связано со значительными рисками.

Современными учеными справедливо отмечается, что под влиянием цифровой трансформации структура интеллектуального капитала существенно изменяется – появляется новая уникальная составляющая – информационный (цифровой) капитал, представляющий собой данные в цифровом формате, обеспечиваемые развитым информационным пространством, приносящие ценность организации [10, с. 939]. Элементами цифрового капитала являются системы знаний о сборе, хранении и обработке информации, включая специально созданные программы, алгоритмы, коды и т. д., базы данных и информационные ресурсы, а также цифровые компетенции работников и цифровые способности [5, с. 6].

Однако в рамках градации интеллектуального капитала на человеческий и структурный считаем целесообразным цифровой капитал организации, выраженный в базах данных и информационных ресурсах, а также нейросетях, включать в структурный капитал, при этом человеческий интеллектуальный капитал расширяется на основе появления новых цифровых компетенций.

При этом, как верно отмечает Ю. Ю. Савченко, в структуре интеллектуального капитала человеческий капитал получает свое развитие в компетентностной компоненте, к которой относят не только компетенции сотрудников организации, которые приобретают особую значимость в условиях цифровой трансформации, но и возможности, создаваемые искусственным интеллектом [10, с. 940]. Кроме того, несомненно важным является способность индивида к инновационной активности, интеллектуальная возможность генерировать инновационные идеи.

Тогда на основе вышеизложенного считаем верным предложить следующие компоненты, формирующие человеческий интеллектуальный капитал в условиях цифровизации общества, не выделяя их в отдельные виды капиталов: явные знания, профессиональные компетенции, неявные знания в виде опыта и навыков, коммуникационные компетенции (цифровая этика), цифровые компетенции (владение ИКТ и нейросетями), инновационное мышление.

Развитие и применение искусственного интеллекта оказывает существенное влияние на экономический прогресс современного общества. Искусственный интеллект изменяет способы работы и взаимодействия в различных секторах экономики, что приводит к повышению производительности труда, оптимизации процессов и созданию новых возможностей для развития бизнеса.

На сегодняшний день среднегодовой темп роста рынка искусственного интеллекта составляет около 20 %. С 2018 по 2024 г. объем мирового рынка технологий искусственного интеллекта увеличился в 10 раз. Крупнейшие игроки на рынке ИИ – это компании с высокой рыночной капитализацией – корпорация IBM, Intel Amazon Microsoft Google [10, с. 941].

Эффективное взаимодействие искусственного интеллекта и интеллектуального капитала проявляется в первую очередь в автоматизации процессов, которая позволяет значительно снизить затраты и увеличить скорость выполнения работ. Автоматизация рутинных операций и задач позволяет высвобождать время и ресурсы для более сложных, творческих и стратегических задач и способствует эффективному использованию знаний и опыта сотрудников, повышению их профессионализма и как следствие – накоплению человеческого интеллектуального капитала компании.

Еще одним аспектом влияния искусственного интеллекта на человеческий интеллектуальный капитал является улучшение процессов принятия решений и повышение производительности труда. Благодаря алгоритмам машинного обучения и анализу больших данных, искусственный интеллект способен предоставлять прогнозы, рекомендации и стратегии, основанные на объективных данных и взвешенных фактах. Это помогает лучше понимать рыночные тенденции, прогнозировать спрос и адаптировать стратегии деятельности.

На макроуровне появление искусственного интеллекта может оказать влияние на структуру занятости в экономике, а значит на интеллектуальный капитал общества. Так, автоматизация рабочих мест неизбежно приведет к изменениям требованиям к квалификации работников. Современные технологии искусственного интеллекта способны заменить многие профессии и виды деятельности. Анали-

тики предсказывают, что ряд специальностей, особенно связанных с рутинными задачами, может исчезнуть. Труд без интеллектуального капитала может быть механизирован, рабочие места попадают под сокращения. В то же время многие рабочие места достаточно трудно автоматизировать, потому что они требуют творческого подхода и сложных рассуждений [14].

Таким образом, данные тенденции приведут к осознанию организациями необходимости инвестировать в обучение сотрудников для освоения новых технологий, что в долгосрочной перспективе может привести к повышению квалификации и конкурентоспособности рабочей силы. При этом важно отметить, что появление искусственного интеллекта способствовало созданию новых рабочих мест, требующих навыков, связанных с высокими технологиями.

Для эффективного накопления интеллектуального человеческого капитала в современных условиях необходимо научиться объединять возможности чат-ботов, генераторов изображений, аудио и видео для решения конкретных задач, а также развивать навык создавать цепочки запросов к нейросервисам. Это определяет новое понимание к элементам накопления человеческого интеллектуального капитала в условиях цифровой трансформации общества.

Повышение качества человеческого интеллектуального капитала общества проявляется еще и в том, что автоматизация рутинных задач освобождает время для творческой деятельности и

разработки инновационных проектов. При этом работников, обладающих прочным запасом интеллектуального капитала, заменить технологиями нейросетей окажется довольно сложно, поскольку в их компетенции входят и межличностное общение, и накопленный опыт. Кроме того в современных условиях и низкоквалифицированный труд уже требует когнитивных навыков более высокого порядка, а значит также определенных инвестиций в человеческий капитал.

Становление цифровой экономики базируется на ресурсе знаний, воплощающихся в интеллектуальном капитале, обеспечивающим развитие высоких, новых информационных технологий, на инновационной системе. Высокий уровень человеческого капитала и его цифровая грамотность создают стартовые возможности для создания инновационного продукта и обеспечивают дальнейшее возвышение человеческого интеллекта опять же генерирующего цифровизацию экономики.

Процессы цифровизации и информатизации, определяющие характер современной мировой экономики не обошли стороной и Республику Беларусь. Число организаций цифровой экономики, повысилось за последние 5 лет на 840 единиц (таблица 1). Динамично повышается количество абонентов сети Интернет, а также абонентов беспроводного широкополосного доступа в сеть Интернет – на 12 и 13 человек соответственно в период с 2019 по 2023 год.

Таблица 1 – Динамика статистических показателей развития цифровой экономики и человеческого капитала в Республике Беларусь за 2019–2023 гг.

Наименование показателя	2019	2020	2021	2022	2023
Число организаций цифровой экономики	6967	7045	7193	7368	7807
Количество абонентов сети Интернет на 100 человек населения по территории Республики Беларусь	139	141	145	148	151
Количество абонентов беспроводного широкополосного доступа в сеть Интернет на 100 человек населения по территории Республики Беларусь	90	93	98	101	103
Удельный вес населения в возрасте 6–72 лет, использующего сеть Интернет ежедневно, в общей численности населения в возрасте 6–72 лет, %	68,5	71,3	74,1	78,7	82,1
Удельный вес населения в возрасте 6–72 лет, использующего сеть Интернет для осуществления финансовых операций (для оплаты товаров, услуг, перевода денег и так далее), в общей численности населения в возрасте 6–72 лет по территории Республики Беларусь	37,8	42,2	47,1	50,7	56,1
Удельный вес населения в возрасте 6–72 лет, использующего сеть Интернет для осуществления взаимодействия с государственными органами и организациями, в том числе получения информации, в общей численности населения в возрасте 6–72 лет по территории Республики Беларусь	19	23,6	27,2	27	32,2
Удельный вес населения, обладающего навыками в области информационно-коммуникационных технологий по территории Республики Беларусь:					
принятие мер безопасности	–	–	–	25,8	29,6
копирование, вставка или перемещение информации в рамках одного документа	41	38,9	37,5	40,3	41,4
отправка электронной почты с прикрепленными файлами	37,3	34,3	32,2	36,2	36,9
использование базовых арифметических формул в электронных таблицах	19,7	18	18,4	20,3	21,5
подключение и установка новых устройств (модем, камера, принтер и так далее)	19,6	17,7	16,4	18,8	20
поиск, загрузка, установка и настройка программного обеспечения	23,3	20,1	20,2	26	29,5
создание электронных презентаций с использованием специального программного обеспечения	12,4	10,3	10,3	11,5	12,2
передача файлов между компьютером и другими устройствами	41,9	39,3	37,8	41,9	42,7
написание компьютерных программ с использованием специализированного языка программирования	2	1,3	1,4	1,2	1,5

Примечание – Источник: [15, 16].

В рамках цифровой трансформации общества закономерным представляется и изменение структуры интеллектуального человеческого капитала страны в сторону повышения цифровой грамотности населения ускоренными темпами. С одной стороны, перманентно растет удельный вес населения, использующего Интернет ежедневно – с 68,5 % в 2019 г. до 82,1 % в 2023 г. Однако при этом удельный вес населения в возрасте 6–72 года, использующего сеть Интернет для осуществления взаимодействия с органами государственного управления, в том числе получения информации, составляет лишь 32,2 %.

Навыки в области информационно-коммуникационных технологий распределились следующим образом: примерно 40 % населения могут скопировать и вставить информацию в рамках одного доку-

мента, отправлять файлы по электронной почте, а также передавать файлы между компьютером и другими устройствами; около 20 % могут использовать формулы в таблицах, подключать устройства или загружать программное обеспечение; 12 % создавать электронные презентации; 1,5 % населения писать компьютерные программы с использованием специализированного языка программирования. К сожалению, статистики по навыкам использования искусственного интеллекта население в Республике Беларусь пока нет.

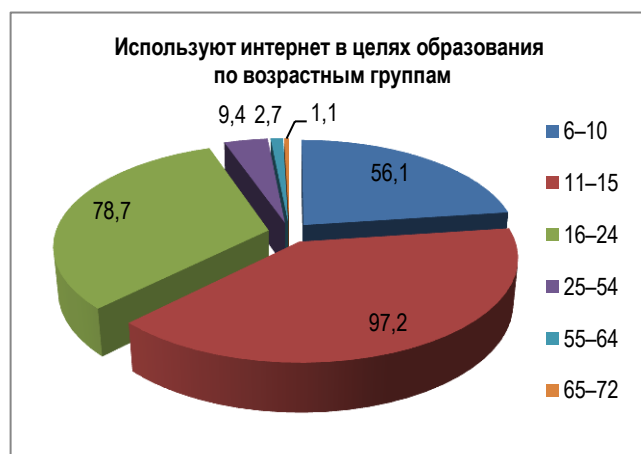
Если рассматривать интернет-пользователей по целям выхода в Интернет, то, к сожалению, наибольшая доля населения – 91,1 % использует Интернет для просмотра фильмов, скачивания музыки и компьютерных игр, а 86,9 % – для общения в социальных сетях (таблица 2). В целях образования использует Интернет лишь 22,5 % населения.

Таблица 2 – Удельный вес интернет-пользователей по целям выхода в сеть Интернет по территории Республики Беларусь

Цели выхода в Интернет:	2021	2022	2023
в целях образования	20,2	21,5	22,5
отправка, получение электронной почты, переговоры	82,4	89,1	89,7
оформление заказа или продажа товаров, услуг	44,6	47,2	53,3
поиск информации о товарах, услугах	75,5	76,1	78
общение в социальных сетях (на форумах, в чатах, блогах и так далее)	83,1	85,3	86,9
просмотр фильмов, прослушивание музыки, игры в компьютерные игры; скачивание	89	90,8	91,1
чтение, скачивание газет, журналов, художественной, научно-популярной, справочной литературы	70,5	74	78
осуществление финансовых операций (для оплаты товаров, услуг, перевода денег и так далее)	54,3	56,6	61,3
осуществление взаимодействия с государственными организациями и органами государственного управления	31,4	30,2	35,2

Примечание – Источник: [16, 17].

Особую тревогу вызывает доля населения, использующая Интернет в целях образования в возрастной группе 25–54 года – 9,4 % (рисунок 1). А это между тем самая продуктивная группа, нуждающаяся в непрерывном образовании и повышении уровня своего интеллектуального капитала в рамках концепции «life long learning».

**Рисунок 1** – Интернет-пользователи по целям выхода в сеть Интернет в 2023 году

Примечание – Источник: [18, с. 317].

Удельный вес населения, использующего сеть Интернет для осуществления финансовых операций (для оплаты товаров, услуг, перевода денег и т. д.), составлял 56,1 %.

В то же время, согласно данным Национального банка Республики Беларусь за 2023 год, количество пользователей электронных финансовых услуг возросло на 25 % по сравнению с предыдущим годом. Отмечается, что внедрение и использование новых финансовых технологий существенно ускорилось благодаря удобству и доступности цифровых платформ [19]. В 2023 году количество транзакций, совершенных через мобильные устройства, выросло на 40 % по сравнению с предыдущим годом. Такие сервисы, как Apple Pay, Google Pay и местные решения, например приложения белорусских банков, играют ключевую роль в популяризации безналичных расчетов [19]. В то же время, по данным опросов, пользователи испытывают трудности с пониманием сложных цифровых продуктов и, как следствие, подвержены рискам при их использовании.

Повышение цифровой грамотности населения, способствующей возвышению интеллектуального человеческого капитала на основе

цифровых компетенций, необходима и для восприятия технологий искусственного интеллекта.

Сегодня в Республике Беларусь разработка и внедрение технологий искусственного интеллекта идут ускоренными темпами. Так, в ближайшее время запланировано создание института искусственного интеллекта, прорабатывается вопрос по организации разработки государственных стандартов в сфере искусственного интеллекта, направленных на обеспечение безопасности систем искусственного интеллекта для людей и окружающей среды. В проекте Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь до 2040 года сделан акцент на развитии Республики Беларусь с применением технологий искусственного интеллекта в здравоохранении, образовании, промышленности, энергетике, транспортной сфере, сельском хозяйстве, туризме, жилищно-коммунальной сфере, торговле, культуре, сфере финансового рынка [20].

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что наблюдается рост цифровизации экономики Республики Беларусь. Цифровые технологии активно используются в финансовом, налоговом, таможенном, промышленном, государственном, банковском и других секторах.

Среди проблем можно выделить следующие: отсутствие компетенций в области искусственного интеллекта и низкий уровень цифровой грамотности населения, низкий уровень обеспеченности отечественного рынка искусственного интеллекта высококвалифицированными кадрами, существенный дефицит современных образовательных программ подготовки специалистов в сфере искусственного интеллекта, отток специалистов в сфере искусственного интеллекта за рубеж. Введение образовательных программ по цифровой грамотности является важным шагом для повышения уверенности пользователей в новых технологиях, в том числе технологиях нейросетей.

Таким образом, интеллектуальное развитие общества базируется в первую очередь на интеллектуальном человеческом капитале, который, накапливаясь и самовозрастая, воплощается в структурный капитал общества. С активным внедрением нейросетей в экономику и исчезновением некоторых профессий высококачественный интеллектуальный человеческий капитал оказывается генератором общественного воспроизводства и ключевым фактором с присущим им свойством редкости. Правильное использование этой технологии позволит ускорить темпы прогресса, увеличить эффективность бизнес-процессов и способствовать росту интеллектуального капитала, что в свою очередь благоприятно отразится на экономике в целом.

Список цитированных источников

- Абламейко, С. В. Искусственный интеллект в междисциплинарной перспективе: философско-правовые аспекты / С. В. Абламейко, М. С. Абламейко // Филос. Науки. – 2021. – № 64 (5). – С. 57–70. – DOI: 10.30727/0235-1188-2021-64-5-57-70.
- Абдикеев, Н. М. Управление знаниями корпорации и реинжиниринг бизнеса: учебник / Н. М. Абдикеев, А. Д. Киселев. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 382 с.
- Бондарь, А. В. Интеллектуальный капитал в экономической системе / А. В. Бондарь, Н. А. Жебентяева, Э. Хостилович // Научные труды Белорусского государственного экономического университета / редкол.: В. Н. Шимов (гл. ред.) [и др.]; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. экон. ун-т. – Минск: БГЭУ, 2019. – Вып. 12. – С. 47–55.
- Долятовский, В. А. Управление знаниями: уч. пособие / В. А. Долятовский. – Ростов н/Д: РГЭУ (РИНХ), 2018. – 251 с.
- Дайнеко, В. Г. Трансформация структуры интеллектуального капитала в период цифровизации экономики / В. Г. Дайнеко, Е. Ю. Дайнеко // Вестник ВГУ. Серия: Экономика и управление. – 2021. – № 1. – С. 3–12.
- Кузнецова, А. В. Искусственный интеллект и информационная безопасность общества: монография / А. В. Кузнецова, С. И. Самыгин, М. В. Радионов; под ред. П. С. Самыгина. – М.: РУСАИНС, 2016. – 118 с.

7. Колпаков, Д. В. Искусственный интеллект для экономического моделирования / Д. В. Колпаков // Материалы XXIV Междунар. науч. конф. «Ломоносов-2017», Москва, 10–14 апр. 2017 г. / МГУ им. М. В. Ломоносова. – М. : МАКС Пресс, 2017. – С. 150–154.
8. Кудина, М. В. Человеческий капитал: экономическая природа и влияние искусственного интеллекта в контексте устойчивости в период трансформации цивилизации / М. В. Кудина // Государственное управление. Электронный вестник. – 2024. – № 104 (S). – С. 34–48. – DOI: 10.55959/MSU2070-1381-104(S)-2024-34-48.
9. Лосева, О. В. Концепция человеческого интеллектуального капитала в условиях цифровизации экономики / О. В. Лосева, Н. М. Абдикеев // Экономика. Налоги. Право. – 2021. – № 14 (2). – С. 72–83.
10. Савченко, Ю. Ю. Интеллектуальный капитал и Индустрия 4.0: взаимодействие и факторы влияния / Ю. Ю. Савченко // Креативная экономика. – 2023. – Том 17. – № 3. – С. 935–954.
11. Бондарь, А. В. Управление интеллектуальным капиталом в постиндустриальном обществе // А. В. Бондарь, Ю. В. Гуц, Н. А. Жебентяева // Вестник Белорусского государственного экономического университета. – 2017. – № 4. – С. 5–12.
12. Бондарь, А. В. Знаниеемкие услуги как фактор формирования интеллектуального капитала / А. В. Бондарь, К. И. Рябова // Белорусский экономический журнал. – 2022. – № 3. – С. 87.
13. Стюарт, Т. Интеллектуальный капитал. Новый источник богатства организаций / Т. Стюарт // Новая постиндустриальная волна на Западе / под ред. В. Л. Инноземцева. – М. : Academia, 1999. – С. 372–400.
14. Булт, Р. Искусственный интеллект и экономика: Работа, богатство и благополучие в эпоху мыслящих машин : пер. с англ. / Булт Роджер. – М. : Альпина ПРО, 2024. – 424 с.
15. Информационно-коммуникационные технологии. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/informatsionno-telekommunikatsionnye-tehnologii> (дата обращения 12.03.2025).
16. Национальные статистические показатели развития цифровой экономики в Республике Беларусь // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 1998–2024. – URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/osids/rubric-info/10614> (дата обращения 12.03.2025).
17. Официальная статистическая информация // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 1998–2024. – URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/osids/rubric-info/home-page> (дата обращения 12.03.2025).
18. Статистический ежегодник Республики Беларусь: стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь ; редкол.: И. В. Медведева (пред.) [и др.]. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2024. – 317 с.
19. Статистика и анализ использования цифровых финансовых технологий в Беларуси // Национальный банк Республики Беларусь : [сайт]. – Минск, 1998–2024. – URL: <https://www.nbrb.by> (дата обращения 12.03.2025).
20. Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь : [сайт]. – Минск, 1998–2025. – URL: <https://gosstandart.gov.by> (дата обращения 12.03.2025).
4. Dolyatovskij, V. A. Upravlenie znaniyami : uch. posobie / V. A. Dolyatovskij. – Rostov n/D : RGEU (RINH), 2018. – 251 s.
5. Dajneko, V. G. Transformaciya struktury intellektual'nogo kapitala v period cifrovizacii ekonomiki / V. G. Dajneko, E. YU. Dajneko // Vestnik VGU. Seriya: Ekonomika i upravlenie. – 2021. – № 1. – С. 3–12.
6. Kuznecova, A. V. Iskusstvennyj intellekt i informacionnaya bezopasnost' obshchestva : monografiya / A. V. Kuznecova, S. I. Samygin, M. V. Radionov ; pod red. P. S. Samygina. – M. : RUSAINS, 2016. – 118 s.
7. Kolpakov, D. V. Iskusstvennyj intellekt dlya ekonomicheskogo modelirovaniya / D. V. Kolpakov // Materialy XXIV Mezhdunar. nauch. konf. «Lomonosov-2017», Moskva, 10–14 apr. 2017 g. / MGU im. M. V. Lomonosova. – M. : MAKS Press, 2017. – S. 150–154.
8. Kudina, M. V. Chelovecheskij kapital: ekonomicheskaya priroda i vliyaniye iskusstvennogo intellekta v kontekste ustojchivosti v period transformacii civilizacii / M. V. Kudina // Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyy vestnik. – 2024. – № 104 (S). – С. 34–48. – DOI: 10.55959/MSU2070-1381-104(S)-2024-34-48.
9. Loseva, O. V. Konceptiya chelovecheskogo intellektual'nogo kapitala v usloviyah cifrovizacii ekonomiki / O. V. Loseva, N. M. Abdikeev // Ekonomika. Nalogi. Pravo. – 2021. – № 14 (2). – С. 72–83.
10. Savchenko, YU. YU. Intellektual'nyj kapital i Industriya 4.0: vzaimodeystvie i faktory vliyaniya / YU. YU. Savchenko // Kreativnaya ekonomika. – 2023. – Tom 17. – № 3. – С. 935–954.
11. Bondar', A. V. Upravlenie intellektual'nym kapitalom v postindustrial'nom obshchestve // A. V. Bondar', YU. V. Guc, N. A. Zhebentyaeva // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. – 2017. – № 4. – С. 5–12.
12. Bondar', A. V. Znanieemkie uslugi kak faktor formirovaniya intellektual'nogo kapitala / A. V. Bondar', K. I. Ryabova // Belorusskij ekonomicheskij zhurnal. – 2022. – № 3. – С. 87.
13. Styuart, T. Intellektual'nyj kapital. Novyy istochnik bogatstva organizacij / T. Styuart // Novaya postindustrial'naya volna na Zapade / pod red. V. L. Inozemceva. – M. : Academia, 1999. – С. 372–400.
14. Bult, R. Iskusstvennyj intellekt i ekonomika: Rabota, bogatstvo i blagopoluchie v epohu myslyashchih mashin : per. s angl. / Bult Rodzher. – M. : Al'pina PRO, 2024. – 424 s.
15. Informacionno-kommunikacionnye tekhnologii. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/informatsionno-telekommunikatsionnye-tehnologii> (data obrashcheniya 12.03.2025).
16. Nacional'nye statisticheskie pokazateli razvitiya cifrovoj ekonomiki v Respublike Belarus' // Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – Minsk, 1998–2024. – URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/osids/rubric-info/10614> (data obrashcheniya 12.03.2025).
17. Oficial'naya statisticheskaya informaciya // Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – Minsk, 1998–2024. – URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/osids/rubric-info/home-page> (data obrashcheniya 12.03.2025).
18. Statisticheskij ezhegodnik Respubliki Belarus': stat. sb. / Nac. stat. kom. Resp. Belarus' ; redkol.: I. V. Medvedeva (pred.) [i dr.]. – Minsk : Nac. stat. kom. Resp. Belarus', 2024. – 317 s.
19. Statistika i analiz ispol'zovaniya cifrovyyh finansovyh tekhnologij v Belarusi // Nacional'nyj bank Respubliki Belarus' : [sajt]. – Minsk, 1998–2024. – URL: <https://www.nbrb.by> (data obrashcheniya 12.03.2025).
20. Gosudarstvennyj komitet po standartizacii Respubliki Belarus' : [sajt]. – Minsk, 1998–2025. – URL: <https://gosstandart.gov.by> (data obrashcheniya 12.03.2025).

References

1. Ablamejko, S. V. Iskusstvennyj intellekt v mezhdisciplinarnoj perspektive: filosofsko-pravovye aspekty / S. V. Ablamejko, M. S. Ablamejko // Filos. Nauki. – 2021. – № 64 (5). – С. 57–70. – DOI: 10.30727/0235-1188-2021-64-5-57-70.
2. Abdikeev, N. M. Upravlenie znaniyami korporacii i reinzhiniring biznesa: uchebnik / N. M. Abdikeev, A. D. Kiselev. – M. : INFRA-M, 2011. – 382 s.
3. Bondar', A. V. Intellektual'nyj kapital v ekonomicheskoy sisteme / A. V. Bondar', N. A. Zhebentyaeva, E. Hostilovich // Nauchnye trudy Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta / redkol.: V. N. SHimov (gl. red.) [i dr.]; M-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Belarus. gos. ekon. un-t. – Minsk : BGEU, 2019. – Vyp. 12. – С. 47–55.

Материал поступил 18.03.2025, одобрен 21.03.2025, принят к публикации 21.03.2025

УДК 338.242.2

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ В РЕГИОНАЛЬНЫХ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ПОМОЩЬЮ 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. Однако следует вспомнить и детально разобраться, что такое риск, логистическая система региона, искусственный интеллект и как этим всем можно эффективно управлять, минимизируя негативные последствия и приумножая только положительный эффект. В статье рассмотрен риск как неотъемлемый элемент теоретических проблем развития современной логистики, его трансформация представляет собой важный процесс, который позволяет предприятиям адаптироваться к быстро меняющейся бизнес-среде. Эффективное управление рисками становится неотъемлемой частью стратегического планирования и операционной деятельности, что подчеркивает необходимость постоянного анализа и пересмотра подходов к управлению рисками. Риск является неотъемлемой частью любой экономической деятельности, его управление имеет важное значение для достижения стабильности, успеха в современных бизнес-условиях, а также получения дополнительного дохода. Таким образом, чем больше возможная прибыль, тем выше риск. У понятия «риск» нет определенной формулировки. Однако можно получить синтез из многочисленных трактовок, которые в совокупности обозначают внутреннее или внешнее событие, оно, в свою очередь, влияет на достижение целей предприятия. Риск всегда имеет определенные причины и последствия, выражается через ущерб и вероятность. В зависимости от подготовки к возможным рискам зависит прибыль и безопасность ресурсов объекта управления в целом.

Ключевые слова: риск, логистическая система региона, искусственный интеллект, управление, эффективность управления рисками с помощью искусственного интеллекта, эффект.

RISK MANAGEMENT IN REGIONAL LOGISTICS SYSTEMS USING 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. However, it is necessary to remember and understand in detail what risk is, the regional logistics system, artificial intelligence and how all this can be effectively managed, minimizing negative consequences and increasing only the positive effect. The article considers risk as an integral element of theoretical problems of development of modern logistics, its transformation is an important process that allows enterprises to adapt to a rapidly changing business environment. Effective risk management is becoming an integral part of strategic planning and operational activities, which emphasizes the need for continuous analysis and revision of approaches to risk management. Risk is an integral part of any economic activity, its management is important for achieving stability, success in modern business conditions, and also for obtaining additional income. Thus, the greater the possible profit, the higher the risk. The concept of "risk" does not have a specific formulation. However, it is possible to obtain a synthesis of numerous interpretations, which together denote an internal or external event, which, in turn, affects the achievement of the enterprise's goals. Risk always has certain causes and consequences, expressed through damage and probability. Depending on the preparation for possible risks, the profit and safety of the resources of the management object as a whole depend.

Keywords: risk, regional logistics system, artificial intelligence, management, effectiveness of risk management using artificial intelligence, effect.

Введение

В настоящее время наша жизнь стремительно и динамично развивается, появляются новые технологии, совершенствуются старые и все больше разговоров идет об искусственном интеллекте, о его возможностях, положительных и отрицательных чертах. Следует разобраться, как можно применить искусственный интеллект с точки зрения экономики. В частности, возможно ли управлять рисками в региональных логистических системах с помощью искусственного интеллекта и какой от этого будет эффект. Но для начала следует разобраться детально, что такое риск, логистическая система региона, искусственный интеллект, его возможности, положительные и отрицательные стороны, эффективность управления рисками с помощью искусственного интеллекта.

Риски в региональных логистических системах

Риск – это неотъемлемая часть нашей повседневной жизни. Каждый день для достижения поставленных целей и задач суще-

ствует необходимость рисковать. Риск присутствует повсюду, всегда и постоянно. Считается, что риск — дело благородное. Что же такое риск? Риск – это важный аспект жизни, который требует внимательного анализа и управления для достижения желаемых результатов.

Понятие «риск» обладает многогранностью и разнообразными трактовками в зависимости от области применения – экономики, финансов, менеджмента, статистики и других. Ниже приведены определения риска от различных авторов и источников, а также их анализ.

Джон Т. Пирсон: «Риск – это возможность того, что событие произойдет, и его последствия, которые могут быть как позитивными, так и негативными». Это определение подчеркивает двойственную природу риска. Он может приводить как к убыткам, так и к выгодам, что важно учитывать при принятии решений [1].

Фредерик П. Мостер: «Риск – это измерение неопределенности, связанной с инвестированием, которое может привести к убыткам или потерям». Здесь акцент сделан на экономическом аспекте, ука-

заявая, что риск неразрывно связан с вложениями и инвестициями. Неопределенность воспринимается как основная характеристика риска [2, 3, 4–6].

ISO 31000: «Риск – это влияние неопределенности на цели. Риск может проявляться так как угроза, так и как возможность». Это определение является более современным и системным, позволяющим рассматривать риск в контексте управления. Указание на цели подчеркивает целенаправленный характер анализа рисков [7].

Др. П. Шумпетер: «Риск – это возможность того, что фактические результаты будут отличаться от ожидаемых, что может создать как угрозы, так и возможности». Др. П. Шумпетер акцентирует внимание на том, что риск связан с отклонениями от ожидаемого результата, что является важным аспектом при разработке стратегий управления рисками [8].

А. А. Мальцева: «Риск – это вероятность возникновения событий, способных привести к финансовым потерям, или неопределенность в принятии решений». Это определение подчеркивает финансовую природу риска и его влияние на принятие управленческих решений, что делает его актуальным для бизнеса [9, 10].

На основе приведенных определений можно сделать следующие выводы:

- Многообразие трактовок. Риск может иметь разные значения в зависимости от контекста. Это требует внимательного подхода к его оценке в конкретной сфере.

- Составляющие риска. Риск включает в себя как возможность потерь, так и возможность выгод, что делает его сложным для однозначного определения.

- Управление рисками. Современные подходы подчеркивают важность управления рисками и их влияние на достижение целей организаций. Разработка стратегий управления рисками становится необходимым элементом успешного ведения бизнеса.

- Неопределенность. Все определения признают связь риска с неопределенностью, что требует применения статистических и вероятностных методов для управления рисками.

Таким образом, понимание риска необходимо для эффективного управления в различных областях: от финансов до бизнеса и управления проектами.

Понятие «риск» непосредственно связано с последовательностью принятия решения субъектом.

Можно выдвинуть свое определение понятия риска. Риск – это возможность наступления исхода события с различной степенью отличия результата от поставленных целей и задач.

Изучив огромное множество научной литературы по рискам, можно отметить, что выведенное понятие риска отличается от других следующими аспектами:

- является свободным от влияния специфики какой-либо сферы деятельности;

- достаточно четкое и непротиворечивое;

- не требует каких-либо специальных оговорок или комментариев, то есть можно применить в любой сфере жизнедеятельности;

- лишено субъективных эмоций положительного и отрицательного характера [11–14].

Логистическая система региона

Логистическая система региона представляет собой комплекс взаимосвязанных процессов, структур и ресурсов, обеспечивающих эффективное управление движением товаров, услуг и информации в пределах определенной территории. Она включает в себя транспорт, складирование, распределение, управление запасами и другие элементы, которые взаимодействуют для достижения целей, связанных с удовлетворением потребностей потребителей и оптимизацией затрат.

Отличия логистической системы от просто системы:

- Целевое назначение. Логистическая система ориентирована на управление потоками товаров и услуг, в то время как просто система может иметь более широкий спектр целей и функций.

- Структура. Логистическая система включает в себя специфические компоненты, такие как транспортные средства, склады, информационные технологии и т. д., которые непосредственно свя-

заны с логистическими процессами. Просто система может состоять из более общих элементов, не обязательно связанных с логистикой.

- Процессы. В логистической системе акцент делается на оптимизацию процессов поставки, хранения и распределения, в то время как в других системах могут быть важны другие аспекты, такие как производство, управление качеством и т. д.

Следует выделить положительные стороны логистической системы региона:

- Эффективность. Оптимизация логистических процессов позволяет сократить время и затраты на доставку товаров, что повышает общую эффективность системы.

- Удовлетворение потребностей. Логистическая система помогает лучше удовлетворять потребности потребителей, обеспечивая своевременную доставку и доступность товаров.

- Конкурентоспособность. Эффективная логистика может стать конкурентным преимуществом для компаний, позволяя им быстрее реагировать на изменения на рынке.

- Инновации. Внедрение новых технологий и методов управления в логистике может привести к улучшению процессов и повышению качества обслуживания.

На ряду с положительными чертами логистической системы региона следует выделить и отрицательные:

- Сложность. Логистические системы могут быть сложными и требовать значительных ресурсов для управления, что может привести к ошибкам и сбоям.

- Зависимость от внешних факторов. Логистика подвержена влиянию внешних факторов, таких как погодные условия, политическая нестабильность и экономические колебания, что может негативно сказаться на ее эффективности.

- Экологические последствия. Логистические операции могут иметь негативное воздействие на окружающую среду, включая выбросы углерода и загрязнение.

- Капитальные затраты. Создание и поддержание эффективной логистической системы требует значительных инвестиций в инфраструктуру и технологии.

Логистическая система региона играет ключевую роль в экономике, обеспечивая эффективное управление потоками товаров и услуг. Понимание ее особенностей, преимуществ и недостатков позволяет более эффективно разрабатывать стратегии для оптимизации логистических процессов и управления рисками [15–19].

Искусственный интеллект – это область компьютерных наук, занимающаяся созданием систем, способных выполнять задачи, требующие интеллекта, такие как обучение, распознавание образов, принятие решений и решение проблем. Искусственный интеллект может использовать алгоритмы машинного обучения, нейронные сети и другие методы для анализа данных и автоматизации процессов.

Возможности применения искусственного интеллекта в логистике:

1. Оптимизация маршрутов. Искусственный интеллект может анализировать данные о трафике, погодных условиях и других факторах для определения наиболее эффективных маршрутов доставки, что позволяет сократить время и затраты на транспортировку.

2. Управление запасами. Системы искусственного интеллекта могут прогнозировать спрос на товары, что помогает оптимизировать уровень запасов и минимизировать издержки на хранение.

3. Автоматизация процессов. Искусственный интеллект может автоматизировать рутинные задачи, такие как обработка заказов, управление складом и планирование поставок, что повышает общую эффективность логистических операций.

4. Анализ данных. Искусственный интеллект способен обрабатывать большие объемы данных, выявляя закономерности и тренды, что позволяет принимать более обоснованные решения.

5. Улучшение обслуживания клиентов. Чат-боты и виртуальные помощники на основе искусственного интеллекта могут обеспечивать круглосуточную поддержку клиентов, отвечая на их вопросы и помогая с оформлением заказов.

Положительные стороны применения искусственного интеллекта в логистике:

- Повышение эффективности. Автоматизация и оптимизация процессов позволяют значительно сократить время и затраты на выполнение логистических операций.

– Снижение ошибок. Искусственные интеллект-системы могут минимизировать человеческий фактор, что снижает вероятность ошибок в управлении запасами и обработки заказов.

– Гибкость и адаптивность. Искусственный интеллект может быстро адаптироваться к изменениям в спросе и внешних условиях, что позволяет компаниям оставаться конкурентоспособными.

– Улучшение аналитики. Искусственный интеллект предоставляет более глубокую и точную аналитику, что помогает в стратегическом планировании и принятии решений.

Но стоит также отметить и отрицательные стороны применения искусственного интеллекта в логистике:

– Высокие первоначальные затраты. Внедрение искусственных интеллект-технологий требует значительных инвестиций в оборудование, программное обеспечение и обучение персонала.

– Сложность интеграции. Интеграция искусственного интеллекта в существующие системы может быть сложной и требовать времени и ресурсов.

– Зависимость от данных. Эффективность искусственных интеллект-систем зависит от качества и объема данных, что может быть проблемой в случае недостатка информации.

– Этические и правовые вопросы. Использование искусственного интеллекта может вызывать опасения по поводу конфиденциальности данных и возможных нарушений прав человека.

Искусственный интеллект имеет огромный потенциал для трансформации логистических процессов, обеспечивая более высокую эффективность и точность. Однако его внедрение требует тщательного планирования и учета возможных рисков и недостатков. Понимание возможностей и ограничений искусственного интеллекта поможет предприятиям более эффективно использовать эти технологии для оптимизации своих логистических систем.

Искусственный интеллект может значительно повысить эффективность управления рисками в логистике благодаря своим аналитическим возможностям, способности обрабатывать большие объемы данных и автоматизации процессов. Рассмотрим, как именно искусственный интеллект может помочь в этой области.

1. Прогнозирование рисков.

Искусственный интеллект может анализировать исторические данные и выявлять закономерности, что позволяет предсказывать потенциальные риски, такие как задержки в поставках, изменения в спросе или сбой в цепочке поставок. Это позволяет предприятиям заранее принимать меры для минимизации негативных последствий.

2. Мониторинг в реальном времени.

Системы на основе искусственного интеллекта могут отслеживать состояние логистических операций в реальном времени, включая транспортировку, складирование и распределение. Это позволяет быстро реагировать на изменения и оперативно устранять возникающие проблемы.

3. Оптимизация процессов.

Искусственный интеллект может помочь в оптимизации логистических процессов, что снижает вероятность возникновения рисков. Например, оптимизация маршрутов доставки может уменьшить вероятность задержек, а автоматизация управления запасами может предотвратить дефицит или избыток товаров.

4. Анализ данных и принятие решений.

Искусственный интеллект способен обрабатывать и анализировать большие объемы данных, что позволяет выявлять риски, которые могут быть неочевидны при ручном анализе. Это помогает менеджерам принимать более обоснованные решения на основе фактических данных.

5. Улучшение взаимодействия с партнерами.

Системы искусственного интеллекта могут улучшить коммуникацию и взаимодействие с поставщиками и клиентами, что позволяет быстрее реагировать на изменения и минимизировать риски, связанные с недопоставками или изменениями в спросе.

Использование искусственного интеллекта в управлении рисками в логистике открывает новые возможности для повышения эффективности и надежности операций. Однако для успешного внедрения искусственного интеллекта необходимо учитывать возможные риски, связанные с качеством данных, интеграцией технологий и

этическими аспектами. Предприятия, которые смогут эффективно использовать искусственный интеллект для управления рисками, получат значительное конкурентное преимущество на рынке.

Для иллюстрации применения искусственного интеллекта в управлении рисками в региональной логистической системе рассмотрим на примере ТУП «КАМАКО ПРОДЦЕНТР». ТУП «КАМАКО ПРОДЦЕНТР» входит в группу компаний КАМАКО, является единственным дистрибьютором на территории Республики Беларусь. Имеет 11 подразделений (Минск, Минская область, Брест, Гродно, Пинск, Гомель, Витебск, Могилев, Барановичи, Бобруйск, Борисов), в каждом из которых есть склад хранения готовой продукции.

Компания КАМАКО – ведущий производитель рынка соусов с широким ассортиментом. Компания объединяет производство, крупное торговое предприятие, осуществляющее дистрибуцию, складскую и транспортную логистику [20].

Ситуация

Предприятие ТУП «КАМАКО ПРОДЦЕНТР» осуществляет доставку собственной продукции к розничным магазинам. В процессе работы оно сталкивается с различными рисками, такими как задержки в поставках исходного сырья, изменения в спросе, погодные условия и сбой в цепочке поставок. Для минимизации этих рисков предприятие решило внедрить искусственную интеллект-систему.

Рассмотрим на примере изменения погодных условий. Прогнозирование погоды и управление рисками в региональных логистических системах – это сложные задачи, которые требуют анализа множества факторов. Рассмотрим, как можно использовать данные о погоде для управления рисками в логистике, а также как можно провести подробный расчет.

1. Сбор данных.

Для начала необходимо собрать данные о погоде, включая:

- температуру (максимальную и минимальную);
- вероятность осадков;
- атмосферное давление;
- ветер (скорость и направление);
- метеорологические условия (облачность, туман и т. д.).

2. Анализ данных.

На основе собранных данных можно провести анализ, который включает:

– Экстраполяцию. Использование текущих данных для прогнозирования будущих условий. Например, если температура постепенно снижается, можно ожидать, что она продолжит снижаться.

– Моделирование. Применение математических моделей для прогнозирования погоды. Это может включать использование статистических методов или машинного обучения.

3. Прогнозирование погоды.

На основе анализа можно составить прогноз погоды на неделю, как было сделано ранее с помощью искусственного интеллекта. Для более точного прогнозирования погоды на неделю, основываясь на данных о погоде в среду 5 февраля 2025 г., можно использовать метод экстраполяции, учитывая текущие метеорологические условия, такие как температура, вероятность осадков и атмосферное давление. Рассмотрим данные, которые у нас есть, и сделаем прогноз на неделю с помощью искусственного интеллекта на основе данных 5 февраля, а затем сравним данные с фактическими значениями погоды по мере прошедших дней (таблица 1), использовать будем Simple ML for Sheets (расширение для Chrome).

Данные о погоде в среду 5 февраля 2025 г.

Ночь: 0° (мин –2°), вероятность осадков 5 %, давление 760 мм рт. ст.

Утро: –1° (мин –1°), вероятность осадков 2 %, давление 760 мм рт. ст.

День: +2° (мин 0°), вероятность осадков 1 %, давление 760 мм рт. ст.

Вечер: +1° (мин –2°), вероятность осадков 2 %, давление 761 мм рт. ст.

Прогноз показывает, что температура будет постепенно понижаться в течение недели с увеличением вероятности осадков, особенно в выходные дни. Рекомендуется следить за обновлениями прогноза, так как погодные условия могут изменяться.

Таблица 1 – Прогнозные и фактические значения погоды с 6 по 11 февраля 2025 г.

Прогноз погоды на неделю (примерный)	Прогноз погоды на неделю (фактический)
Четверг, 6 февраля 2025 Ночь: –2° (вероятность осадков 10 %) Утро: –1° (вероятность осадков 5 %) День: +1° (вероятность осадков 5 %) Вечер: 0° (вероятность осадков 10 %) Пятница, 7 февраля 2025 Ночь: –3° (вероятность осадков 15 %) Утро: –2° (вероятность осадков 10 %) День: +2° (вероятность осадков 5 %) Вечер: 0° (вероятность осадков 10 %) Суббота, 8 февраля 2025 Ночь: –4° (вероятность осадков 20 %) Утро: –3° (вероятность осадков 15 %) День: +1° (вероятность осадков 10 %) Вечер: –1° (вероятность осадков 20 %) Воскресенье, 9 февраля 2025 Ночь: –5° (вероятность осадков 25 %) Утро: –4° (вероятность осадков 20 %) День: 0° (вероятность осадков 15 %) Вечер: –2° (вероятность осадков 25 %) Понедельник, 10 февраля 2025 Ночь: –6° (вероятность осадков 30 %) Утро: –5° (вероятность осадков 25 %) День: –1° (вероятность осадков 20 %) Вечер: –3° (вероятность осадков 30 %) Вторник, 11 февраля 2025 Ночь: –7° (вероятность осадков 35 %) Утро: –6° (вероятность осадков 30 %) День: –2° (вероятность осадков 25 %) Вечер: –4° (вероятность осадков 35 %)	Четверг, 6 февраля 2025 Ночь: –2° (вероятность осадков 10 %) Утро: –1° (вероятность осадков 5 %) День: +1° (вероятность осадков 3 %) Вечер: 0° (вероятность осадков 4 %) Пятница, 7 февраля 2025 Ночь: –3° (вероятность осадков 15 %) Утро: –2° (вероятность осадков 10 %) День: 0° (вероятность осадков 5 %) Вечер: –1° (вероятность осадков 6 %) Суббота, 8 февраля 2025 Ночь: –4° (вероятность осадков 20 %) Утро: –3° (вероятность осадков 15 %) День: –1° (вероятность осадков 10 %) Вечер: –2° (вероятность осадков 12 %) Воскресенье, 9 февраля 2025 Ночь: –5° (вероятность осадков 5 %) Утро: –4° (вероятность осадков 3 %) День: –2° (вероятность осадков 2 %) Вечер: –3° (вероятность осадков 4 %) Понедельник, 10 февраля 2025 Ночь: –6° (вероятность осадков 8 %) Утро: –5° (вероятность осадков 4 %) День: –3° (вероятность осадков 3 %) Вечер: –4° (вероятность осадков 5 %) Вторник, 11 февраля 2025 Ночь: –7° (вероятность осадков 6 %) Утро: –6° (вероятность осадков 3 %) День: –4° (вероятность осадков 2 %) Вечер: –5° (вероятность осадков 4 %)

Можно сделать промежуточный вывод о том, что прогнозные значения практически совпали с фактическими, минимальный процент отклонения.

4. Оценка рисков.

На основе прогноза погоды можно оценить риски для логистических операций:

- Проблемы с транспортировкой. Снижение температуры и вероятность осадков могут привести к ухудшению дорожных условий.
- Задержки в поставках. Непредсказуемые погодные условия могут вызвать задержки в доставке товаров.
- Повышенные затраты. Увеличение затрат на обогрев, обработку и хранение товаров.

5. Разработка стратегий управления рисками.

На основе оценки рисков можно разработать стратегии для их минимизации:

- Планирование маршрутов. Изменение маршрутов доставки в зависимости от погодных условий.
- Запасные планы. Создание резервных планов на случай ухудшения погодных условий.
- Мониторинг. Постоянный мониторинг погодных условий и оперативное реагирование на изменения.

Заключение

Таким образом, прогнозирование погоды и управление рисками в логистических системах требуют комплексного подхода, включающего сбор и анализ данных, прогнозирование, оценку рисков и разработку стратегий. Это позволяет минимизировать негативные последствия неблагоприятных погодных условий и обеспечить бесперебойную работу логистических операций. Внедрение искусственного интеллекта в управление рисками ТУП «КАМАКО ПРОДЦЕНТР» позволяет значительно повысить эффективность операций, снизить вероятность возникновения проблем и улучшить взаимодействие с партнерами. Предприятия, использующие искусственный интеллект для управления рисками, могут более эффективно адаптироваться к изменениям на рынке и обеспечивать высокий уровень обслуживания клиентов.

Список цитированных источников

1. Шкурко, В. Е. Управление рисками проектов / В. Е. Шкурко. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 184 с.
2. 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. – Изд. 2-е., испр. и доп. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2020. – 287 с.
3. Деминг, Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Эдвардс Деминг ; пер. с англ.: Ю. Адлер, В. Шперд, Н. В. Величко. – М. : Альпина Бизнес обозрение, 2007. – 147 с.
4. Репкина, О. Б. Предпринимательская деятельность в условиях риска / О. Б. Репкина // Путеводитель предпринимателя. – 2011. – № 10. – С. 238–243.
5. 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.
6. Троицкая, Н. Н. Управление рисками инвестиционного проекта / Н. Н. Троицкая // Индустриальная экономика. – Вологда, 2020. – С. 27–31.
7. Управление рисками – руководство : Международный стандарт ISO 31000:2018. – 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: 12.02.2025).
8. Шумпетер, Й. А. Теория экономического развития. Капитализм, социализм и демократия / Й. А. Шумпетер ; пер. с нем. В. С. Автономова, М. С. Любского, А. Ю. Чепуренко ; пер. с англ. В. С. Автономова, Ю. В. Автономова, Л. А. Громовой [и др.]. – М. : Эксмо, 2008. – 864 с.
9. Мальцев, А. А. Глобальные мета-риски в постковидную эру / А. А. Мальцев // Вестник Института экономики Российской академии наук. – 2024. – № 1. – С. 124–137.
10. Мальцева, А. П. Профессиональный стресс как фактор риска врачебной деятельности / А. П. Мальцева // Перм. мед. журн. – 2006. – №1. – С. 17–19.

11. 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. : Университет при МПА ЕврАзЭС, 2018. – Ч. 4. – С. 334–341.
12. 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.
13. 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 2024 г. / отв. ред. В. С. Лукинский. – СПб. : Изд-во ГУМРФ им. Адм. С. О. Макарова, 2024. – Ч. 2. – С. 302–309.
14. Шишко, Е. Л. Управление рисками в региональных логистических системах / Е. Л. Шишко. – Минск : ИВЦ Минфина, 2022. – 200 с.
15. 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 мира : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 13–14 декабря 2024 года. – СПб. : Изд-во СПбЦСА, 2024. – С. 413–416.
16. Шишко, Е. Л. Конкурентоспособность предприятий и внешние макроэкономические риски / Л. П. Зенькова, Е. Л. Шишко // Наука и инновации. – Минск, 2020. – № 7. – С. 61–66.
17. Шишко, Е. Л. Конкурентоспособность предприятий и внешние макроэкономические риски / Е. Л. Шишко, Л. П. Зенькова // Наука и инновации. – 2020. – № 7. – С. 61–66.
18. 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.
19. Шишко, Е. Л. Риски в логистических системах: региональный аспект / Е. Л. Шишко, Л. П. Зенькова. – Минск : ИВЦ Минфина, 2020. – 195 с.
20. КАМАКО [сайт]. – URL: <https://kamako.by> (дата обращения 05.02.2025).
6. Troickaya, N. N. Upravlenie riskami investicionnogo proekta / N. N. Troickaya // Industrial'naya ekonomika. – Vologda, 2020. – S. 27–31.
7. Upravlenie riskami – rukovodstvo : Mezhdunarodnyj standart ISO 31000:2018. – 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: 12.02.2025).
8. SHumpeter, J. A. Teoriya ekonomicheskogo razvitiya. Kapitalizm, socializm i demokratiya / J. A. SHumpeter ; per. s nem. V. S. Avtonomova, M. S. Lyubskogo, A. YU. CHepurenko ; per. s angl. V. S. Avtonomova, YU. V. Avtonomova, L. A. Gromovoj [i dr.]. – M. : Eksmo, 2008. – 864 s.
9. 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.
10. Mal'ceva, A. P. Professional'nyj stress kak faktor riska vrachebnoj deyatel'nosti / A. P. Mal'ceva // Perm. med. zhurn. – 2006. – №1. – S. 17–19.
11. SHishko, E. L. Risk-menedzhment kak effektivnyj 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. : Universitet pri MPA EvrAzES, 2018. – CH. 4. – S. 334–341.
12. SHishko, E. L. Ustojchivost' logisticheskoy sistemy regiona v usloviyah 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. – S. 179–183.
13. SHishko, E. L. Risk kak neot'emlemyj element teoreticheskikh problem sovremennoj logistiki / E. L. SHishko // Logistika: Sovremennye tendencii razvitiya: materialy XXIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 4–5 aprelya 2024 g. / otv. red. V. S. Lukinskij. – SPb. : Izd-vo GUMRF im. Adm. S. O. Makarova, 2024. – CH. 2. – S. 302–309.
14. SHishko, E. L. Upravlenie riskami v regional'nyh logisticheskikh sistemah / E. L. SHishko. – Minsk : IVC Minfina, 2022. – 200 s.
15. 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 : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Sankt-Peterburg, 13–14 dekabrya 2024 goda. – SPb. : Izd-vo SPbCSA, 2024. – S. 413–416.
16. SHishko, E. L. Konkurentosposobnost' predpriyatij i vneshnie makroekonomicheskie riski / L. P. Zen'kova, E. L. SHishko // Nauka i innovacii. – Minsk, 2020. – № 7. – S. 61–66.
17. SHishko, E. L. Konkurentosposobnost' predpriyatij i vneshnie makroekonomicheskie riski / E. L. SHishko, L. P. Zen'kova // Nauka i innovacii. – 2020. – № 7. – S. 61–66.
18. SHishko, E. L. Risk kak faktor ekonomicheskogo razvitiya deyatel'nosti hozyajstvuyushchih sub'ektov / E. L. SHishko // Ekonomicheskie i finansovyje mekhanizmy innovacionnogo razvitiya cifrovoy 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.
19. SHishko, E. L. Riski v logisticheskikh sistemah: regional'nyj aspekt / E. L. SHishko, L. P. Zen'kova. – Minsk : IVC Minfina, 2020. – 195 s.
20. КАМАКО [сайт]. – URL: <https://kamako.by> (data obrashcheniya 05.02.2025).

References

1. SHkurko, V. E. Upravlenie riskami proektov / V. E. SHkurko. – Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2014. – 184 s.
2. 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. – Izd. 2-e., ispr. i dop. – Vladimir : Izd-vo VIGU, 2020. – 287 s.
3. 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 obozrenie, 2007. – 147 s.
4. Repkina, O. B. Predprinimatel'skaya deyatel'nost' v usloviyah riska / O. B. Repkina // Putevoditel' predprinimatel'ya. – 2011. – № 10. – S. 238–243.
5. Troickaya, N. N. Problema diagnostiki riskov pri razrabotke investicionnogo proekta / N. N. Troickaya // Putevoditel' predprinimatel'ya : sb. nauch. tr. / Rossijskaya Akademiya predprinimatel'stva. – M., 2018. – Vyp. HKHKHVIII. – S. 171–177.

Материал поступил 13.02.2025, одобрен 20.02.2025, принят к публикации 20.02.2025

УДК 339.187+331.108.2

РОЛЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АГЕНТСКИХ КОМПАНИЙ НА РЫНКЕ МЕЖДУНАРОДНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОНСАЛТИНГА

Гао Юань¹, Юй Байнин², О. Н. Ерофеева³, М. Н. Гурнович⁴

¹ Магистрант, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: beiyuan0027@gmail.com

² Магистрант, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: beiyuan1127@gmail.com

³ К. э. н., доцент, доцент кафедры международного менеджмента, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: erofeevaon@bsu.by

⁴ Начальник отдела международных связей, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: mhurnovich@bsatu.by

Реферат

Изучены тенденции развития рынка международного образовательного консалтинга и всесторонне проанализирована роль образовательных агентов в функционировании исследуемого рынка. Показана деятельность образовательных агентов с точки зрения модели оказания услуг на рынке. Описаны основные субъекты, предлагающие услуги на рынке международных консалтинговых услуг по обучению за рубежом, типы образовательных агентов с позиций особенностей взаимодействия с учреждениями образования и оплаты услуг (агента, нанимаемые конкретным учебным заведением, и независимые консалтинговые компании). Выявлена роль образовательных агентов во взаимодействии с потребителями услуг, образовательными учреждениями, особо подчеркивается значение образовательных агентов по формированию социального капитала. Проанализировано влияние изменений спроса на рыночные стратегии образовательных агентов, которые на современном этапе включают расширение географической специализации, рост транснациональных образовательных организаций, расширение спектра оказываемых услуг, изменение бизнес-моделей на основе использования современных технологий и образовательных платформ и др. Охарактеризованы практики регулирования деятельности образовательных агентов, показаны субъекты регулирования с акцентом на роли профессиональных ассоциаций в сфере консалтинга и оказания услуг. Особо выделены возможные лучшие практики и первоочередные меры регулирования деятельности образовательных агентов, которые могут быть рекомендованы к применению на развивающихся рынках. Они, в частности, включают проактивное использование потребительских отзывов в маркетинговых стратегиях субъектов рынка, использование этических кодексов, установление входных рыночных барьеров, разработку политик по работе с образовательными агентами как отдельными образовательными организациями, так и их ассоциациями.

Полученные результаты могут быть использованы для формирования маркетинговых стратегий образовательных учреждений и образовательных агентов на рынке международного образовательного консалтинга и рекрутинга.

Ключевые слова: образовательный консалтинг, сервисная модель образовательного консалтинга, образовательный агент, иностранные студенты, асимметрия информации, кодексы деловой этики, маркетинговые стратегии, деловая репутация.

THE ROLE OF SPECIALISED AGENCY COMPANIES IN THE INTERNATIONAL EDUCATIONAL CONSULTING MARKET

Gao Yuan, Yu Beining, O. N. Erofeeva, M. N. Hurnovich

Abstract

The trends in the development of the international educational consulting market are studied and the role of educational agents in the functioning of the market under study is comprehensively analyzed. The activity of educational agents in terms of the service delivery model in the market is shown. The main entities offering services in the market of international consulting services for studying abroad, types of educational agents are described in terms of the specifics of interaction with educational institutions and payment for services (agents hired by a specific educational institution and independent consulting companies). The role of educational agents in interaction with consumers of services and educational institutions is revealed, and the importance of educational agents in the formation of social capital is emphasized. The impact of demand changes on the market strategies of educational agents is analyzed, which at the present stage include the expansion of geographical specialization, the growth of transnational educational organizations, the expansion of services provided, business models changes based on the use of modern technologies and educational platforms, etc. The practices of regulating the activities of educational agents are characterized, the subjects of regulation are shown with an emphasis on the role of professional associations in the field of consulting and service provision. Possible best practices and priority measures for regulating the activities of educational agents that can be recommended for use in emerging markets are highlighted. In particular they include the proactive use of consumer reviews in the marketing strategies of market subjects, the use of ethical codes, the establishment of market entry barriers, the development of policies for working with educational agents, both by individual educational organizations as well as by their associations.

The obtained results can be used to form marketing strategies of educational institutions and educational agents in the international educational consulting and recruiting market.

Keywords: educational consulting, service model of educational consulting, education agent, foreign students, information asymmetry, codes of business ethics, marketing strategies, business reputation.

Введение

Современные возможности и вызовы глобализации и динамики международных рынков труда определяют интернационализацию рынка образовательных услуг и процессы международной студенческой мобильности. Число иностранных студентов в мире существенно возросло: с 2,1 миллиона в 2000 году до 3,79 млн в 2010 году и более чем 6,8 миллиона в 2022 году [1], и очевидно продолжит расти в долгосрочной перспективе.

Процесс поступления в университеты, и особенно зарубежные, характеризуется высокой неопределенностью. До четверти студентов, поступающих в четырехлетние учебные заведения США, нанимали

независимых образовательных консультантов по крайней мере на часть процесса поиска колледжа и подачи заявления [2]. По данным Hagedorn and Zhang [3], примерно две трети иностранных китайских студентов, обучающихся в четырех вузах США, пользовались консультационными услугами образовательных консультантов. Услуги образовательных агентов активно востребованы абитуриентами также для поступления в образовательные учреждения за пределами США и Великобритании – в европейских странах, Китае, Малайзии, странах Южной Америки [4]. С ростом числа иностранных студентов услуги образовательного консалтинга, предоставляемые образовательными агентами, пользуются

все большим спросом. Тенденция роста рынка образовательного консалтинга связана также с развитием государственного управления системой образования и акцентом на использовании рыночных механизмов в оказании образовательных услуг [5, С. 92–93].

Основная цель исследования заключается в анализе роли образовательных агентских компаний (далее – образовательных агентов) на рынке услуг международного образовательного консалтинга и особенностей рыночных отношений в этой сфере, что создает информационную основу для формирования маркетинговых стратегий образовательных учреждений и образовательных агентов на рассматриваемом рынке.

Исследование вносит вклад в изучение рынка образовательного консалтинга по обучению за рубежом, восполняя дефицит исследований обозначенный, например в работе Kenneth Han Chen [6, С. 9], и дополняя актуальные результаты исследований [4], [7], [8] и др.

С учетом изменений на белорусском рынке образовательных услуг в соответствии с выводами И. Л. Акулича «наиболее перспективными направлениями для продвижения образовательных услуг являются магистратура и образовательные программы, адаптированные для обучения иностранных граждан» [9, С. 36] исследуемые вопросы имеют особую актуальность для формирования маркетинговых стратегий субъектов рынка.

Особенности рыночной деятельности образовательных агентов

Характер различных направлений консалтинга в сфере образования исследован в работах С. В. Бисеновой [10], Н. В. Грищенко [11], Н. В. Василенко [12], Н. Б. Саханского [13] и др. Основной целью консалтинга является предоставление заказчику конкретных услуг или рекомендаций по оптимизации деятельности. Образовательный консалтинг как услуга, сочетающая в себе профессиональные знания, индивидуальный подход и динамичное взаимодействие по поводу выработки образовательных целей и траекторий, на современном становится неотъемлемой частью современной системы образования.

Под сервисной моделью образовательного консалтинга понимается деятельность образовательных консалтинговых организаций или связанных с ними специалистов-практиков по предоставлению

целевых решений, основанных на потребностях клиентов, с использованием систематических методов, инструментов и процессов. Одной из особенностей рынка образовательных консалтинговых услуг является уникальная модель услуг: суть их заключается в том, чтобы консультант четко определил сильные и слабые стороны клиента с помощью профессионального диагностического консалтинга и помог клиенту разработать стратегии дальнейшей деятельности и развития в соответствии с его потребностями, причем каждый тип услуги имеет свои аспекты.

В краткосрочной перспективе услуга обычно носит диагностический характер, и ее целью является проведение предварительного анализа академического или профессионального статуса оцениваемого лица, который также включает оценку академических знаний, способностей к обучению, психологических и поведенческих особенностей, образовательной среды и другой информации, для того чтобы облегчить точное суждение о текущей академической или профессиональной ситуации оцениваемого лица.

Наиболее востребованным на рынке международного образования, по мнению авторов, является консалтинг по вопросам развития – среднесрочная или долгосрочная консультационная услуга, целью которой является помощь клиенту в достижении постоянного прогресса и развития посредством разработки индивидуализированной траектории обучения и систематической программы по ее осуществлению. В процессе реализации консультант помогает клиенту поддерживать адаптивность и гибкость стратегии посредством циклических итеративных оценок и механизмов обратной связи для приспособления к изменяющимся условиям рынка.

Кризисный консалтинг – это экстренная услуга, которая необходима для помощи клиентам в преодолении внезапных кризисов или чрезвычайных ситуаций, например, для помощи студентам, пережившим психологический срыв из-за учебного стресса, или внезапно уволенным профессионалам.

Характеристики рассмотренных групп услуг представлены в таблице. Услуги выбираются и адаптируются исключительно на основе реальной ситуации и потребностей клиента.

Таблица – Основные характеристики типов образовательных консалтинговых услуг по стратегичности целей их оказания

Тип образовательной консалтинговой услуги	Профиль и основные потребности клиента	Характеристики услуг
Развивающая (среднесрочная и долгосрочная)	Стремление к устойчивому улучшению, фокусировка на персонализации, разработка долгосрочных путей развития	Работа с учетом динамичных изменений рыночной среды, а значит необходимость корректировки плана развития в соответствии с изменениями, с акцентом на динамичные корректировки для достижения целей, гибкое реагирование на изменения внешней среды
Диагностика, разовый консалтинг (краткосрочная)	Минимальный бюджет, краткосрочные четкие цели	Запрос можно решить с помощью стандартизированных инструментов оценки, за короткое время, зачастую с возможностью использования информационных платформ и технологий
Кризисные (экстренные, краткосрочные)	Внезапный жизненный кризис, необходимость обеспечить программу немедленного вмешательства	Требуются немедленные действия для разрешения кризисных ситуаций, при этом высока степень зависимости от профессионализма консультанта

Образовательные агенты предоставляют студентам стратегически ориентированные услуги по проектированию индивидуальной образовательной траектории на основе тщательного анализа и оценки. Такое профессиональное руководство часто может кардинально изменить представление абитуриентов и студентов об образовании, помогая им прояснить свои учебные цели и спланировать дальнейшее развитие.

Основными субъектами, предлагающими услуги на рынке международных консалтинговых услуг по обучению за рубежом, являются специализированные компании и независимые консультанты, которые могут объединяться в профессиональные партнерства либо действовать индивидуально.

Оценке особенностей и эффективности работы образовательных консалтинговых организаций и образовательных агентов в различных странах мира посвящены публикации [3], [8], [14], [15], [16], [17] и др. Исследуются объем рынка, мотивация потребителей, организация оказания услуг и структура доходов, нормы регулирования деятельности, вопросы репутации и доверия по вопросам качества оказания услуг и другие аспекты.

Существует два основных типа образовательных агентов:

- компания либо предприниматель, которая нанимается конкретным учебным заведением с целью привлечения иностранных студентов в страны их проживания только в это учебное заведение,

оплата комиссии осуществляется учебным заведением. Поскольку конкуренция за привлечение иностранных обучающихся между различными странами и учебными заведениями становится все более жесткой, такие посредники играют все большую роль и все чаще используются образовательными учреждениями принимающих стран;

- независимая консалтинговая компания в сфере образования, которая взимает плату с клиентов-физических лиц за предоставление образовательных консалтинговых услуг, а также может выполнять международный подбор персонала либо рекрутинг абитуриентов для учреждений по заключенным договорам.

В Китае крупные независимые консалтинговые компании предоставляют широкий спектр услуг для клиентов, планирующих обучаться за рубежом, в различных странах назначения. Целевыми учреждениями для обучения могут быть средние школы, университеты или колледжи; общие услуги включают подготовку к тестированию, консультации при поступлении, услуги по подаче заявлений в учебные заведения, перевод документов, подачу заявлений на визу, а также спектр услуг, помогающий клиентам успешно интегрироваться в международную среду и культурной среде пребывания.

Студенты и их родители пользуются услугами агентов, которые помогают им выбрать страну, учебное заведение и программу обучения из множества, как правило, незнакомых вариантов, а также

подготовить необходимые документы. Факторами выбора образовательного агента являются рекомендации знакомых, публикации в социальных сетях, маркетинговая политика самой образовательной консалтинговой компании, а также информация, распространяемая на образовательных выставках и ярмарках.

Влиятельная работа Рональда Берта [17] о «структурной дыре» доказывает, что брокеры играют ключевую роль в объединении ресурсов и сетей между организациями и институтами, на рассматриваемом рынке эту функцию выполняют образовательные агенты. Они фактически преобразуют сложный процесс организации обучения за рубежом в структурированную программу действий, а также используют свои компетенции, эмоциональные навыки и социальные связи, чтобы преобразовать опыт обучения за рубежом в построение эффективных социальных сетей. Существенная доля услуг образовательных агентов ориентирована на понимание межкультурных различий, помощь в адаптации и предполагает коммерциализацию именно на этой основе.

Несомненные преимущества использования услуг агентов для образовательных учреждений состоят в том, чтобы помочь выявить ключевые факторы динамики набора, оценить уровень подготовленности потенциальных абитуриентов, спрогнозировать тенденции на рынках соответствующих стран и регионов. Немаловажные преимущества состоят в аутентичном понимании языка и культуры, участии в социальных сетях и развитые контакты в стране пребывания. С точки зрения администрации университетов, агенты по образованию являются важными культурными связующими звеньями, которые помогают иностранным студентам адаптироваться к местным правовым и социальным нормам в стране пребывания.

Агенты участвуют в формировании социального капитала, который существенно влияет на образовательный процесс в академической среде [19].

Для клиентов – физических лиц ключевые факторы обращения к услугам образовательных агентов – экономия времени и сокращение информационной асимметрии. Как показано в работе [7], на рассматриваемом рынке существует взаимная информационная асимметрия. По мере роста числа студентов, обучающихся за рубежом, информация, связанная с подачей заявлений в зарубежные университеты, распространяется на многочисленных форумах, в социальных сетях, особенно во время пандемии COVID-19. В этих условиях критически важным является доступ к надежной и достоверной информации. В то же время, в условиях жесткой конкуренции за поступление, возникает вопрос о том, как иностранные абитуриенты интерпретируют соответствующую информацию и позиционируют себя.

Учебные заведения часто используют агентов, чтобы компенсировать отсутствие узнаваемости имен и развитого бренда на зарубежных рынках. Отсутствие достаточных маркетинговых усилий и выстроенных маркетинговых коммуникационных компаний со стороны принимающих стран и университетов в условиях увеличения информационных потоков и растущего спроса на образование за рубежом фактически способствует увеличению спроса на услуги образовательных агентов и конкуренции среди потенциальных потребителей образовательных консалтинговых услуг.

Одна из причин того, что абитуриенты активно обращаются к услугам образовательных консультантов, состоит в том, что университеты недостаточно четко и понятно представляют потенциальным студентам свои услуги и процесс поступления, что приводит к асимметрии информации о продукте.

Плата за услуги агента может соответствовать локальному или региональному «отраслевому стандарту», определяемому в условиях конкуренции, или варьироваться в зависимости от рынка, на котором работает агент. На некоторых рынках учебные заведения оплачивают полную стоимость услуг агента, и, как правило, она составляет определенную долю стоимости обучения поступающего студента. На других рынках абитуриенты также оплачивают услуги агентов, и эта плата может быть вдвое больше, чем взимается с учебного заведения агентом [17, с. 2]. Рыночной инновацией при сильной переговорной позиции и высокой репутации университета является внесение договорных условий со стороны университета, запрещающих его агентам взимание дополнительной платы с абитуриентов.

Влияние изменений спроса и регулирования рынка на рыночные стратегии образовательных агентов

Согласно соответствующим данным ЮНЕСКО, число иностранных китайских студентов в период с 2000 по 2022 год имело тенден-

цию к росту. В 2000 году оно составляло 156 814 человек. После вступления Китая в ВТО в 2001 году число иностранных студентов из Китая быстро выросло до 580 542 человек в 2010 году, причем среднегодовой темп роста достиг 45 %. Благодаря быстрому экономическому развитию Китая и активным инвестициям китайских семей в образование, число китайских иностранных студентов выросло с 818 615 в 2015 году до 1 052 283 человек в 2022 (рассчитано по данным [1]). При этом географическая структура направлений обучения китайских иностранных студентов в 2022 году меняется от Великобритании и США как основных мест обучения к многополярному выбору стран обучения, таких как Канада, Южная Корея, Малайзия и т. п., что отражает влияние изменения международной ситуации на выбор направлений обучения.

Актуальная тенденция такова, что в условиях возрастающей конкуренции иностранные абитуриенты начинают собирать информацию о возможностях обучения за рубежом заблаговременно и как правило обращаются к различным каналам получения информации об обучении за рубежом, таким как образовательные агентства, социальные сети, официальные аккаунты в WeChat, рекомендации других пользователей и официальные веб-сайты и др.

Также отмечается тенденция, что иностранные абитуриенты обращаются во большее число университетов и рассматривают различные направления, поддерживаемые глобально ориентированными службами консультирования студентов. Так, по данным опроса консультантов по образованию, проведенного INTO University Partnerships, «в настоящее время каждый десятый агент отправляет сообщения в 100 учреждений и более; большинство агентств ориентируют студентов на несколько направлений – специалистов по одному направлению сравнительно немного» [20, с. 3]. Фактически это означает, что образовательные консалтинговые агентства по международному образованию в процессе развития в рамках жизненного цикла организации зачастую расширяют свою географическую специализацию.

В период после пандемии COVID-19 в практике китайских образовательных консалтинговых компаний отмечается возросший интерес к другим азиатским направлениям (особенно в Юго-Восточной Азии) по сравнению с преобладавшим ранее спросом на обучение в США, Европе и Австралии, при этом растет интерес к вариантам международного школьного образования, более локализованному предоставлению услуг, культурной близости. Агенты из Восточной Азии также подчеркивают растущий интерес к возможностям обучения за рубежом в их регионе, а также в Китае. Эти результаты свидетельствуют о том, что существуют значительные возможности для будущего роста транснациональных образовательных организаций [20, с. 6].

Очевидной тенденцией на рынке консалтинговых услуг по обучению за рубежом является расширение спектра услуг и углубление распространения информации. В прошлом международное образование было в основном сосредоточено на уровне высшего образования, например обучение за рубежом и программы обмена студентами. С развитием экономики и увеличением доходов населения все больше родителей обращаются за услугами образовательного консалтинга на все более ранних этапах, таких как детский сад, начальная школа, а спектр оказываемых услуг становится все более диверсифицированным. Этот разнообразный спрос обеспечивает более широкое рыночное пространство для международной индустрии образовательного консалтинга.

В ответ на диверсифицированный спрос появилось множество инноваций в сфере предложения. С одной стороны, традиционные агентства по обучению за рубежом начали расширять свою деятельность в области дошкольного образования и диверсифицированных форм обучения; с другой стороны, начали появляться новые компании, которые основывают свои бизнес-модели на использовании Интернет и современных технологических средств для предоставления более удобных и персонализированных образовательных услуг. Эта инновация со стороны предложения не только удовлетворяет рыночный спрос, но и является активной движущей силой международной индустрии образовательного консалтинга.

В сфере консалтинговых услуг по организации обучения за рубежом репутация и бренд университета, а также рекомендации потребителей являются важным фактором, влияющим на потребительский выбор. Довольные клиенты часто делятся своим положительным опытом через устные рекомендации или социальные сети. Можно ожидать, что в будущем, в связи с быстрым развитием цифровизации и экономики опыта, потребители будут иметь все большее влияние на формирование репутации и бренда как учреждений

образования, так и развитие репутации образовательных агентов через социальные сети и платформы онлайн-обзоров.

Практики регулирования деятельности образовательных агентов на национальных рынках включают, например, получение образовательными учреждениями одобрения правительства для набора и зачисления иностранных студентов; регуляторные нормы для учреждений образования, предписывающие указывать информацию о том, какие агенты их представляют; правила, обязывающие агентов соблюдать кодекс поведения и практики. Кодексы могут быть как национально-специфичными, так и иметь отраслевую международную специфику (в случае разработки влиятельными профессиональными ассоциациями). В качестве примера можно привести Ethical Guidelines for the Profession of Educational Consulting, разработанные IECA (Independent Educational Consultants Association), правила Society of Education Consultants (SEC), Agent Quality Framework (AQF), применяемый Ассоциацией международных связей британских университетов (The British Universities' International Liaison Association (BUILA)), кодекс поведения Канадского бюро международного образования (CBIE) и др.

Правительства, учреждения образования и профессиональные ассоциации имеют значимую роль в продвижении лучших практик, настаивая на прозрачности и соблюдении кодексов поведения, а также исключая недобросовестных участников из дальнейшего доступа на рынок, в том числе через установление барьеров рыночного входа. На рынках стран назначения, которые являются относительно новыми для иностранных абитуриентов, чрезвычайно высокое значение имеет деятельность государственных регулирующих органов для защиты интересов учреждений образования и абитуриентов.

В ряде стран с развитыми рынками образовательного консалтинга разработана нормативно-правовая база, которая требует соблюдения самых высоких стандартов управления и этических норм как со стороны учебных заведений, так и со стороны агентов и дает основания для привлечения их к соответствующей ответственности при необходимости [17, С. 39].

Управление отношениями с агентами со стороны университетов значительно различается. Заслуживает внимания опыт канадских учебных заведений, где лучшие практики регулирования включают тщательный отбор потенциальных агентов, их дополнительное постоянное обучение, надзор за деятельностью агентских компаний. При появлении признаков неправомерного поведения возможно расторжение заключенных контрактов с агентскими компаниями. Разработка политик по работе с агентами проводится при поддержке ключевых стейкхолдеров университетов с целью поддержания репутации бренда, а также обеспечения защиты прав и справедливого обращения с потенциальными абитуриентами.

Сами иностранные студенты могут дать неоценимую информацию об особенностях сотрудничества и удовлетворенности качеством услуг со стороны образовательных агентов, даже в случае если университеты не имеют долгосрочных партнерских отношений с теми или иными агентами. Регулярный опрос иностранных студентов, обучающихся в учреждениях образования, может содействовать администрации в выявлении недобросовестных агентов, совершенствовать процедуры взаимодействия с иностранными абитуриентами.

Расширение возможностей для менеджеров образовательных учреждений по обмену опытом помогает выявлять новые передовые практики и поощрять их внедрение в других учреждениях либо других странах.

Отсутствие регулирования деятельности агентов на национальных рынках и управления этими отношениями со стороны учреждений образования означает повышение значимости этических и репутационных рыночных факторов для успешной деятельности агентов. Однако жесткая горизонтальная и вертикальная конкуренция между образовательными агентами может вызывать их стремление к получению краткосрочных рыночных результатов, невзирая на долгосрочные интересы клиентов.

До настоящего времени на рассматриваемом рынке существует множество независимых агентов, которые оказывают услуги по организации обучения в странах пребывания, не имея глубокого понимания социально-экономического контекста, культурных различий и т. д. В результате студенты не получают устойчивого позитивного опыта относительно качества услуг, транслируя его тем, кто находится в процессе рассмотрения возможностей обучения за рубежом. Это, несомненно, приводит к потере части потенциальных потребителей. Поэтому образовательным агентам может быть выгодно совместно поддерживать здоровый и легальный рынок услуг по организации обучения за рубежом.

Заключение

Услуги образовательных агентов все более востребованы на рынке международного образовательного консалтинга, и спрос на их услуги продолжит расти.

Выполняя ряд важных функций на рынке по предоставлению консалтинговых услуг иностранным абитуриентам, обеспечению качественного международного академического рекрутинга для учреждений образования, объединению ресурсов и сетей, созданию социального капитала и др., образовательные агенты работают в условиях высокой конкуренции и быстро меняющейся внешней среды. Это определяет необходимость изменения их маркетинговых стратегий в соответствии с изменениями спроса, технологий, используемых информационных каналов, технологий и доступных бизнес-моделей оказания услуг. Стратегически ориентированные образовательные агенты заинтересованы в создании устойчивой положительной репутации для обеспечения спроса на свои услуги. В условиях повышения значимости потребительских отзывов в формировании репутации бренда как учреждений образования, так и образовательных агентов в маркетинговых стратегиях названных субъектов целесообразно проактивное использование инструментов по сбору и размещению потребительских отзывов и мнений (в социальных сетях, официальных аккаунтах в наиболее используемых мессенджерах страны происхождения абитуриентов – например, WeChat).

Деятельность образовательных агентов в международной лучшей практике регулируется как государственными органами, так и профессиональными ассоциациями, ассоциациями университетов, в том числе с использованием этических кодексов и путем введения входных рыночных барьеров, регулярного мониторинга деятельности. Вопросы прозрачности, этики и ответственности в международном образовательном консалтинге находят все большую практическую значимость, обеспечивая снижение информационной асимметрии для всех субъектов рынка и повышение качества оказания услуг.

На основе обобщения передового опыта регулирования деятельности образовательных агентов можно рекомендовать учреждениям образования разработку политик по работе с образовательными агентами, в том числе с учетом мнений ключевых стейкхолдеров, используя также результаты опросов иностранных студентов о качестве услуг образовательных агентов.

Список цитированных источников

1. UNESCO database : UNESCO. – URL: <https://databrowser.uis.unesco.org/browser/EDUCATION/UIS-EducationOPRI> (date of access: 19.02.2025).
2. Sklarow, M. H. Educational Consulting: Justification to Partnership / M. Sklarow // Journal of College Admission. – 2012. – P. 69. – URL: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ992743.pdf> (date of access: 19.02.2025).
3. Hagedorn, L. S. The use of agents in recruiting Chinese undergraduates / L. Hagedorn, L. Zhang // Journal of Studies in International Education. – 2011. – Vol. 15(2). – P. 186–202.
4. Nikula, P.T. Hiring education agents for international student recruitment / P. Nikula, J. Kivistö // Perspectives from agency theory. Higher Education Policy. – 2018. – Vol. 31. – P. 535–557. – DOI: 10.1057/s41307-017-0070-8.
5. Современные виды консалтинга в системе управления образовательной организацией / И. Коршунов, Г. Чахоян, А. Тюнин, Е. Ляховецкая // Образование и наука. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 73–101.
6. Kenneth, H.C. Higher education under market forces how the "transnational shadow education" industry emerged and persisted to help Taiwanese students to study in the U.S / H. C. Kenneth / Legacy Theses & Dissertations (2009–2024) // State University of New York at Albany. – 2021. – URL: <https://scholarsarchive.library.albany.edu/legacy-etd/2652> (date of access: 19.02.2025).
7. Yang, Y. The Effect of the Wide Use of Education Agents in International Student Recruitment on the International Higher Education Sector / Y. Yang // Boston College, Center for International Higher Education. – 2023. – No. 22. – P. 10–13. – URL: https://research.manchester.ac.uk/files/280983711/Perspectives_22_WES_CIHE_Summer_2023.pdf (date of access: 19.02.2025).

8. Nikula, P. T. Student Recruitment Agents in International Higher Education: A Multi-Stakeholder Perspective on Challenges and Best Practices / P. Nikula, V. Raimo, E. West. – New York : Routledge, 2023. – 286 p.
9. Акулич, И. Л. Тенденции развития рынка образовательных услуг в Республике Беларусь / И. Л. Акулич, М. А. Скерсь // Вестник Белорусского государственного экономического университета. – 2020. – № 3. – С. 32–39.
10. Бисенова, С. В. Использование опыта зарубежного консалтинга в Национальной инновационной системе РФ / С. В. Бисенова // Вестник ЛГУ им. А.С. Пушкина. – 2013. – Т. 6, № 2 – С. 51–60. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-opyta-zarubezhnogo-konsaltinga-v-natsionalnoy-innovatsionnoy-sisteme-rf> (date of access: 19.02.2025).
11. Hryshchenko, N. V. Formation and structuring of the global market of consulting services: autoref. thesis Ph.D. economy Sciences: 08.00.02; Kyiv National economy University named after Vadym Hetman / N. V. Hryshchenko. – Kyiv, 2014. – 28 p.
12. Василенко, Н. В. Консалтинг в образовании : учебное пособие / Н. В. Василенко – Санкт-Петербург : КультИнформПресс, 2011. – 274 с. – URL: <https://znaniy.com/catalog/product/463073> (date of access: 19.02.2025).
13. Саханский, Н. Б. Основные виды консультационной деятельности в сфере образования / Н. Саханский // Управление образованием: теория и практика. – 2014. – № 3 (15) – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-vidy-konsultatsionnoy-deyatelnosti-v-sfere-obrazovaniya> (date of access: 19.02.2025).
14. Kenneth, H. C. Education Consultants' Work and International Education: An Examination of the Technical and Emotional Dimensions / H. Kenneth // Student Recruitment Agents in International Higher Education. Routledge. – London : Routledge, 2023. – P. 54–67.
15. Education agents poised to play a greater role in international student recruitment https with Education Agents : ICEF Monitor. 2021. – URL: <https://monitor.icef.com/2021/11/education-agents-poised-to-play-a-greater-role-in-%20international-student-recruitment> (date of access: 19.02.2025).
16. Tian, J. The role of education consulting in the internationalization of higher education. 2017 / J. Tian // The University of British Columbia. – URL: <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/graduateresearch/42591/items/1.0355747> (date of access: 19.02.2025).
17. Coffey, R. N. The role of education agents in Canada's education systems / R. Coffey, L. Perry // Council of Ministers of Education, Canada. Ottawa, Ontario. – 2014. – URL: <https://coilink.org/20.500.12592/8h7f5p> (date of access: 19.02.2025).
18. Burt, R.S.. Brokerage and Closure. An Introduction to Social Capital / R.S. Burt. – New York : Oxford University Press, 2005. – 279 p.
19. Canals, A. Social capital in online environments: Effects of social structure on academic performance in an online university / A. Canals, J. Cobarsi-Morales, E. Ortoll // Online Learning. – 2025. – Vol. 29 (1). – P. 238–265.
20. INTO Global Agent Survey 2024 : INTO. – URL: <https://www.intoglobal.com/media/0vtmkjwd/education-agent-survey-report-2024.pdf> (date of access: 19.02.2025).
5. Sovremennye vidy konsaltinga v sisteme upravleniya obrazovatel'noj organizatsiej / I. Korshunov, G. Chahoyan, A. Tyunin, E. Lyahoveckaya // Obrazovanie i nauka. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 73–101.
6. Kenneth, H.C. Higher education under market forces how the "transnational shadow education" industry emerged and persisted to help Taiwanese students to study in the U.S / H. S. Kenneth / Legacy Theses & Dissertations (2009–2024) // State University of New York at Albany. – 2021. – URL: <https://scholarsarchive.library.albany.edu/legacy-ethd/2652> (date of access: 19.02.2025).
7. Yang, Y. The Effect of the Wide Use of Education Agents in International Student Recruitment on the International Higher Education Sector / Y. Yang // Boston College, Center for International Higher Education. – 2023. – No. 22. – P. 10–13. – URL: https://research.manchester.ac.uk/files/280983711/Perspectives_22_WES_CIHE_Summer_2023.pdf (date of access: 19.02.2025).
8. Nikula, P. T. Student Recruitment Agents in International Higher Education: A Multi-Stakeholder Perspective on Challenges and Best Practices / P. Nikula, V. Raimo, E. West. – New York : Routledge, 2023. – 286 p.
9. Akulich, I. L. Tendencii razvitiya rynka obrazovatel'nykh uslug v Respublike Belarus' / I. L. Akulich, M. A. Skers' // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. – 2020. – № 3. – С. 32–39.
10. Bisenova, S. V. Ispol'zovanie opyta zarubezhnogo konsaltinga v Nacional'noj innovacionnoj sisteme RF / S. V. Bisenova // Vestnik LGU im. A.S. Pushkina. – 2013. – Т. 6, № 2 – С. 51–60. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-opyta-zarubezhnogo-konsaltinga-v-natsionalnoy-innovatsionnoy-sisteme-rf> (date of access: 19.02.2025).
11. Hryshchenko, N. V. Formation and structuring of the global market of consulting services: autoref. thesis Ph.D. economy Sciences: 08.00.02; Kyiv National economy University named after Vadym Hetman / N. V. Hryshchenko. – Kyiv, 2014. – 28 p.
12. Vasilenko, N. V. Konsalting v obrazovanii : uchebnoe posobie / N. V. Vasilenko – Sankt-Peterburg : Kul'tinformPress, 2011. – 274 s. – URL: <https://znaniy.com/catalog/product/463073> (date of access: 19.02.2025).
13. Sahanskij, N. B. Osnovnye vidy konsul'tacionnoj deyatel'nosti v sfere obrazovaniya / N. Sahanskij // Upravlenie obrazovaniem: teoriya i praktika. – 2014. – № 3 (15) – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-vidy-konsultatsionnoy-deyatelnosti-v-sfere-obrazovaniya> (date of access: 19.02.2025).
14. Kenneth, H. C. Education Consultants' Work and International Education: An Examination of the Technical and Emotional Dimensions / H. Kenneth // Student Recruitment Agents in International Higher Education. Routledge. – London : Routledge, 2023. – P. 54–67.
15. Education agents poised to play a greater role in international student recruitment https with Education Agents : ICEF Monitor. 2021. – URL: <https://monitor.icef.com/2021/11/education-agents-poised-to-play-a-greater-role-in-%20international-student-recruitment> (date of access: 19.02.2025).
16. Tian, J. The role of education consulting in the internationalization of higher education. 2017 / J. Tian // The University of British Columbia. – URL: <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/graduateresearch/42591/items/1.0355747> (date of access: 19.02.2025).
17. Coffey, R. N. The role of education agents in Canada's education systems / R. Coffey, L. Perry // Council of Ministers of Education, Canada. Ottawa, Ontario. – 2014. – URL: <https://coilink.org/20.500.12592/8h7f5p> (date of access: 19.02.2025).
18. Burt, R.S. Brokerage and Closure. An Introduction to Social Capital / R. S. Burt. – New York : Oxford University Press, 2005. – 279 p.
19. Canals, A. Social capital in online environments: Effects of social structure on academic performance in an online university / A. Canals, J. Cobarsi-Morales, E. Ortoll // Online Learning. – 2025. – Vol. 29 (1). – P. 238–265.
20. INTO Global Agent Survey 2024 : INTO. – URL: <https://www.intoglobal.com/media/0vtmkjwd/education-agent-survey-report-2024.pdf> (date of access: 19.02.2025).

References

1. UNESCO database : UNESCO. – URL: <https://databrowser.uis.unesco.org/browser/EDUCATION/UIS-EducationOPRI> (date of access: 19.02.2025).
2. Sklarow, M. H. Educational Consulting: Justification to Partnership / M. Sklarow // Journal of College Admission. – 2012. – P. 69. – URL: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ992743.pdf> (date of access: 19.02.2025).
3. Hagedorn, L. S. The use of agents in recruiting Chinese undergraduates / L. Hagedorn, L. Zhang // Journal of Studies in International Education. – 2011. – Vol. 15(2). – P. 186–202.
4. Nikula, P.T. Hiring education agents for international student recruitment / P. Nikula, J. Kivistö // Perspectives from agency theory. Higher Education Policy. – 2018. – Vol. 31. – P. 535–557. – DOI: 10.1057/s41307-017-0070-8.

Материал поступил 10.03.2025, одобрен 02.04.2025, принят к публикации 02.04.2025

ВЕСТНИК БРЕСТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ (СТРОИТЕЛЬСТВО, МАШИНОСТРОЕНИЕ, ГЕОЭКОЛОГИЯ);
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ
№ 1 (136). 2025 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор	Баханович А. Г.
Зам. главного редактора	Шалобыта Н. Н.
Ответственный секретарь	Ковальчук Е. Н.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ответственный редактор по разделу «Строительство»	Тур В. В.
Зам. ответственного редактора по разделу «Строительство»	Павлова И. П.
Ответственный редактор по разделу «Машиностроение»	Онысько С. Р.
Зам. ответственного редактора по разделу «Машиностроение»	Парфиевич А. Н.
Ответственный редактор по разделу «Геоэкология»	Волчек А. А.
Зам. ответственного редактора по разделу «Геоэкология»	Мешик О. П.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ответственный редактор по разделу «Экономика»	Касперович С. А.
Зам. ответственного редактора по разделу «Экономика»	Зазерская В. В.
Технический редактор	Ковальчук Е. Н.
Дизайн	Якимук К. С.
Корректор	Дударук С. А.

Лицензионный № в ERL: 38200000065722 от 27.03.2014 г.
Подписано в печать 20.05.2025 г. Формат 60×84 ¹/₈. Бумага
«Performer». Гарнитура «Arial». Уч.-изд. л. 30,63. Усл. печ. л. 28,48.
Заказ № 443. Тираж 100 экз. Печать цифровая. Изготовлено и
отпечатано в типографии учреждения образования «Брестский
государственный технический университет».
Адрес редакции: 224017, г. Брест, ул. Московская, 267,
УО «Брестский государственный технический университет».
Тел. 32 17 40, e-mail: rio@bstu.by, <http://journal.bstu.by>

