



ISSN 1818-1112

№ 1(133)

Научно-практический журнал  
Scientific and practical journal

# ВЕСТНИК

Брестского государственного  
технического университета



VESTNIK  
of Brest State  
Technical University

[WWW.BSTU.BY](http://WWW.BSTU.BY)

DOI 10.36773/1818-1112-2024-133-1

# 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)  
д-р техн. наук, профессор **ПОЙТА ПЁТР СТЕПАНОВИЧ** (зам. ответственного редактора)

д-р техн. наук, профессор **БАТЯНОВСКИЙ ЭДУАРД ИВАНОВИЧ**  
д-р техн. наук, профессор **БОЛТРЫК МИХАИЛ**  
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 **ЛЕОНОВИЧ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ**

### **Раздел «Машиностроение»**

канд. техн. наук, доцент **НЕРОДА МИХАИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ** (ответственный редактор)  
канд. техн. наук, доцент **ПОДДУБКО СЕРГЕЙ 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 **ХВИСЕВИЧ ВИТАЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ**

### **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 **ВЫСОЦКИЙ ОЛЕГ АРСЕНТЬЕВИЧ**  
д-р экон. наук, доцент **БЕЛЯЦКАЯ ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА**  
д-р экон. наук, профессор **ТАРАСОВ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ**  
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 входит в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).



# ВЕСТНИК

Брестского государственного технического университета

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

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

1(133)'2024

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

#### СТРОИТЕЛЬСТВО

**КАШИРИПУР М. М.** Основные градостроительные проекты (планы развития городов) в Иране и их проблемы выполнения.....**3**

**МАКАРЕВИЧ Н. Ю., ЯГЛОВ В. Н.** Способы переработки техногенного отхода фосфогипса ОАО «Гомельский химический завод».....**10**

**KRAVCHENKO V. V.** Modelling of the Voxel-Based Microstructure of the Cement Paste.....**14**

**ДЕРКАЧ В. Н., ДЕМЧУК И. Е., МАТЯС П. И.** Прочность на растяжение при изгибе каменной кладки из поризованных керамических блоков.....**19**

**НОВИК П. А.** Причины образования трещин в ячеистобетонном стеновом ограждении здания с монолитным железобетонным каркасом.....**24**

**ТУР Э. А., БАСОВ С. В., АКУЛОВА О. А., РУСАК Е. Ю.** Комплексные научные исследования объектов, являющихся историко-культурными ценностями г. Пинска.....**28**

**ЕВСТРАТЕНКО А. В., ВЕЛЮГИНА Н. Е.** Проблема повышения привлекательности городской среды на примере набережной р. Сож в г. Гомеле.....**34**

**КРИВИЦКИЙ П. В., НЕВДАХ А. А., ТКАЧУК И. В., ШЕПЕСТ Е. В.** Модели сопротивления срезу балочных элементов из легких бетонов с продольным и поперечным армированием.....**41**

**БОЧКАРЕВ Д. И., ПЕТРУСЕВИЧ В. В.** Моделирование технологического процесса профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог.....**48**

**КУЗЬМЕНКОВ М. И., РУМЫНСКАЯ Е. И.** Разработка состава огнезащитного покрытия по стальным строительным конструкциям.....**53**

**ДЕРЕЧЕННИК С. С.** Непараметрическое интервальное оценивание квантилей эмпирических распределений в задаче прогнозирования характеристических значений снеговых нагрузок.....**58**

**ДЕРЕЧЕННИК С. С., МЕШЕЧЕК Н. Н.** Численное решение задачи оценивания эмпирической функции распределения для малых выборок с заданной достоверностью.....**67**

**РУДОЛЬФ В. С., КУДРЯШОВ В. А., НАДОЛЬСКИЙ В. В.** Сопоставление нормируемых значений снеговых нагрузок с многолетними метеонаблюдениями для определения стратегии безаварийной эксплуатации.....**72**

**НЕВЗОРОВА А. Б., САВКОВ Н. С.** Методология разработки интегрированного информационно-строительного проекта с использованием BIM-технологий.....**85**

**ЛАЗОВСКИЙ Д. Н., ЛАЗОВСКИЙ А. Д.** Влияние поперечного давления на сцепление предварительно напряженной проволочной арматуры с бетоном многоспустотных плит.....**95**

**ЖЕЛТКОВИЧ А. Е., МОЛОШ В. В., ПАРХОЦ К. Г., СОВЕЙКО Н. Г., ЦЗЫЕН ХУАН, ЮХАН РЕН, ХАОТЯНЬ ЦЗИНЬ.** Применение нейросетевых алгоритмов при разработке акустических методов контроля прочности бетона.....**101**

#### МАШИНОСТРОЕНИЕ

**ХАЗЕЕВ Е. В., СТАСЕНКО Д. Л.** Повышение энергоэффективности гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке.....**110**

**СТАРОВОЙТОВ Н. А., РОГОВ С. В.** Исследование амплитудно-фазово-частотных характеристик абразивно-отрезного станка с качающейся шпиндельной бабкой.....**116**

**КАПИТОНОВ А. В.** Расчет и компьютерное моделирование напряжений и деформаций планетарных шариковых и роликовых передач.....**120**

**МЕДВЕДЕВ О. А., САВЧУК С. В., ДАРЧИЧ Б. С.** Оптимизация допусков неподвижных компенсаторов разной толщины для достижения точности сборки машин методом регулирования.....**125**

**АКУЛА И. П., ЧЕКАН Н. М., ХОМА М. Ю.** Морфология поверхности, адгезия и элементный состав покрытий AlCrN, полученных из сепарированной плазмы катодно-дугового разряда.....**130**

**САВЧУК С. В., ПАРФИЕВИЧ А. Н., МОНТИК С. В., МЕДВЕДЕВ О. А.** Гидравлическая система агрегата почвообрабатывающе-посевного многофункционального АППМ-6.....**136**

**ГЕОЭКОЛОГИЯ**

**УРЕЦКИЙ Е. А., МОРОЗ В. В.** Исследование и разработка технологии очистки масло- и нефтесодержащих сточных вод дорожно-транспортных предприятий.....**140**

**КЛЯУСОВА Ю. В., ЦЫГАНОВА А. А., БЕЛЬСКАЯ Г. В.** Управление осадком метанового брожения биомассы для получения биогумуса.....**144**

**ШТЕПА В. Н., КУДИНОВ В. А., ПРОКОПЕНЯ О. Н., МУСЛИМОВ Э. Н.** Предиктивное управление процессом биологической очистки сточных вод на основе нейросетевого прогнозирования рН.....**149**

**ВОЛЧЕК А. А., ЗУБРИЦКАЯ Т. Е.** Влияние различных отраслей экономики на динамику водопотребления в Беларуси.....**156**

**ГЕРМЕНЧУК М. Г., ЦЫБУЛЬКО Н. Н.** Основные механизмы управления рисками в сфере радиационной безопасности и мониторинг окружающей среды.....**160**

**ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**КЛИМЕНКО В. А., МОТЬКО Н. А., КАЗАНЦЕВА В. А.** Социальный капитал университетов как фактор развития их взаимодействия с промышленными предприятиями на основе модели тройной спирали.....**169**

**МАТЮШКОВА Г. Л., САВОНЮК В. А., МИХНЯЕВ А. Л., САМОЛЮК О. Ю., РЫЖОВ А. С., МЕЛЕНЧУК В. В.** Об особенностях восполнения морального вреда жителям умного города.....**172**

**МЕСНИК Д. Н., ХОДАС А. К.** Конъюнктурные особенности перевозок грузового транспорта Республики Беларусь.....**175**

**БОГДАНОВИЧ Е. Г., И. Н. КАНДРИЧИНА Е. Г.** Инвестиции в человеческий капитал как фактор экономического роста: к истории зарождения теории.....**180**

**СЕРГИЕВИЧ Т. В.** Роботизация промышленности как драйвер перехода Республики Беларусь к устойчивому экономическому росту в условиях новых технологических и геоэкономических реалий.....**183**

**САМОХОВЕЦ М. П.** Финансовый потенциал аграрного бизнеса Брестской области: ресурсный подход.....**187**

**ЕРМАКОВА Э. Э., МИШКОВА М. П.** Классификация рисков интеллектуальной деятельности.....**194**

**ДЕРБИНСКАЯ Е. А.** Инновационные подходы к продвижению бренда университета в цифровой среде.....**198**

**ЯЩУК А. И.** Влияние демографических процессов на человеческое развитие.....**204**

**ZORYNA T. G., XUEYAO LIU.** The Connotation and Mechanism of Regional Green Development.....**208**

## СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 711.435(55)

### ОСНОВНЫЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ (ПЛАНЫ РАЗВИТИЯ ГОРОДОВ) В ИРАНЕ И ИХ ПРОБЛЕМЫ ВЫПОЛНЕНИЯ

**М. М. Каширипур**

Кандидат архитектуры, доцент кафедры строительных материалов и технологии строительства  
УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: mkashiripour@gmail.com

#### Реферат

В последние годы урбанизация Ирана претерпела различные трансформации в результате различных событий национального и международного масштаба. С созданием Планово-бюджетной организации Ирана в 1948 году комплексное планирование стало осуществляться с помощью иностранных советников. Эта модель городского планирования, которая основана на существующих американских и европейских моделях, имела очень большое влияние в Иране, особенно после переворота 1953 года. Комплексное планирование стало доминирующим дискурсом городского развития и планирования в Иране. В Иране, как и в других странах, возникла необходимость во внедрении эффективных современных методов городского планирования, поскольку население городов резко увеличивалось из-за явления городского дрейфа.

**Актуальность исследования:** изучение и анализ этапов градостроительства в Иране и выявление основных методов решения проблем, связанных с планами развития городов Ирана.

**Цель исследования:** всесторонний обзор и анализ современной и исторической литературы, градостроительной документации и законодательства иранских городов. Таким образом, основные **задачи исследования** можно выделить следующие: обзор исторической литературы и градостроительного законодательства Ирана, рассмотрение основных планов развития городов Ирана и их теоретические основы и процессы, основные различия выполнения таких планов между Ираном и другими странами.

В процессе исследования используется **метод анализа** научной и исторической литературы и государственных документов, связанных с градостроительным законодательством Ирана, и их реализация и выполнение для достижения и формулировки выводов. **Вывод исследования** заключается в рассмотрении градостроительного законодательства и градостроительных проектов Ирана и выявлении основных особенностей решения проблем, связанных с планами развития городов.

**Научная новизна** исследования заключается в анализе, изучении и определении планов развития городов Ирана и выявлении основных проблем и недостатков, связанных с применением планов развития городов.

**Ключевые слова:** градостроительство, иранские города, градостроительное законодательство, план города, развитие города, урбанизация.

### MAJOR URBAN PROJECTS (URBAN DEVELOPMENT PLANS) IN IRAN AND THEIR IMPLEMENTATION PROBLEMS

**M. Kashiripour**

#### Abstract

In recent years, Iran's urbanization has undergone various transformations as a result of various national and international events. With the establishment of the Iranian Budgetary Organization in 1948, integrated planning began to be carried out with the help of foreign advisers. This urban planning model, which is based on existing American and European models, had a very large impact in Iran, especially after the 1953 coup. Integrated planning has become the dominant discourse of urban development and planning in Iran. In Iran, as in other countries, there was a need to introduce effective modern methods of urban planning, since the population of cities increased dramatically due to the phenomenon of urban drift.

**The relevance of research:** studying and analyzing the stages of urban development in Iran and identifying the main methods for solving problems related to the urban development plans of Iran.

**Purpose of the study:** a comprehensive review and analysis of modern and historical literature, urban planning documentation and legislation of Iranian cities. Thus, the main **objectives of the study** can be identified as follows: a review of the historical literature and urban planning legislation in Iran; consideration of the main plans for the development of cities in Iran and their theoretical foundations and processes; the main differences in the implementation of such plans between Iran and other countries.

The research process uses the **method of analyzing** scientific and historical literature and state documents related to the urban planning legislation of Iran, and their implementation and performance in order to reach and formulate conclusions. The **conclusion of the study** is to consider the urban planning legislation and urban planning projects of Iran, and identify the main features of solving problems related to the urban development plans.

The **scientific novelty** of the study lies in the analysis, study and determination of the urban development plans in Iran, and identifying the main problems and shortcomings associated with the application of the urban development plans.

**Keywords:** urban planning, Iranian city, urban planning legislation, city plan, city development, urbanization.

#### Введение

**Актуальность работы.** Иран, как развивающаяся страна, пережил стремительную урбанизацию за последний век. За последние несколько десятилетий различные события побудили людей мигрировать из сельской местности в крупные города. В результате этого социального движения в городах возник ряд городских проблем, таких как нехватка жилья, отсутствие городской инфраструктуры и отказ от традиционного сельскохозяйственного процесса близ городов. Неподходящие функции городов и населенных пунктов привели

к неконтролируемому росту городов и рождению нескольких неформальных поселений внутри и вокруг городов.

Опыт быстрого роста городского населения в Иране после 1940-х годов повлиял на процесс планирования и развития, установил новую эру для иранских городов. Городское планирование как часть общего процесса планирования серьезно рассматривалось в Иране в конце 1960-х годов, когда правительство приняло Третий национальный план развития. Правительство использовало комплексный подход для подготовки планов городского развития. После 1960-х годов со страте-

гией индустриализации проблемы городского развития обострились из-за нефтяной экономики, ухудшения сельской экономики, быстрого роста населения и государственных инвестиций в крупные города. Следовательно, в эту эпоху в городской системе Ирана возникло множество социальных, экономических, культурных, физических, экологических и управленческих проблем.

Именно планирование заставило правительство задуматься об урбанизации, процессе городского развития и предотвращении расширения города. Хотя правительству в контроле за городским развитием помогали различные меры, спустя долгие годы эти усилия так и не были реализованы.

Поэтому настоящее исследование сосредоточено на осуществлении законодательства о планировании городского развития в Иране. Кроме того, в нем описывается эволюция иранского городского планирования, разные планирования городского развития, теоретические основы и процесс планов развития городов Ирана для того, чтобы определить текущую ситуацию с процессом городского развития в иранских городах. Последняя часть исследования направлена на изучение преимуществ и недостатков планов городского развития в иранских городах и завершается с выявлением барьеров, препятствующих реализации планов городского развития в иранских городах в отличие от других развивающихся стран.

Цель исследования заключается в изучении и анализе исторических документов о законодательстве градостроительства Ирана, теоретических основ, процесса проектирования планов развития городов Ирана с учётом реализации и их особенностей в сравнении с другими развивающимися странами.

Таким образом, задачи исследования следующие:

- ✓ обзор и анализ исторической литературы и градостроительного законодательства Ирана;
- ✓ выявление основных планов развития городов Ирана и этапов градостроительного законодательства в Иране;
- ✓ изучение основных теоретических основ проектов городского развития и их процессов;
- ✓ рассмотрение важнейших проблем планов развития городов в Иране и особенности различия таких планов с планами в других развивающихся странах.

Методологический обзор проводится на основе имеющихся вторичных данных и документов из отчетов правительства Ирана, а также ряда международных организаций, таких как Программа ООН по населенным пунктам ООН-Хабитат (UN-Habitat) и ПРООН-Хабитат (UNPD-Habitat). Кроме того, был проведен систематический обзор исследований, в которых сообщается о процессе городского планирования в Иране.

### Основная часть

Быстрая урбанизация во многих развивающихся странах выявила несколько проблем в различных аспектах. Учреждения городского планирования в развивающихся странах столкнулись с рядом проблем в последнее пятидесятилетие. Это связано с неэффективными градостроительными подходами к управлению процессом застройки. Как и во многих других развивающихся странах, в Иране в последние десятилетия наблюдается стремительная урбанизация. Хотя за последние несколько десятилетий процессы городского планирования применялись для развития иранских городов, городское планирование не смогло решить проблемы, стоящие перед городами. Подходы к урбанизации и урбанизму в Иране из-за быстрых темпов урбанизации борются с такими проблемами, как неэффективный транспорт, нехватка открытых городских пространств, низкокачественная архитектура, снижение качества городской жизни, особенно в мегаполисах, нехватка жилья и неравные возможности трудоустройства [1, 2].

Модель всеобъемлющего и детального планирования, преобладавшая в Иране со времен Второй мировой войны, была вдохновлена Геддесом, Аберкромби и Мамфордом [3]. Она стала укоренившимся официальным подходом к городскому планированию, но подвергалась критике как с теоретической, так и с практической точек зрения за многочисленные недостатки, а с 1960-х годов была заменена в западных странах другими, более подходящими моделями. Однако в развивающихся странах, таких как Иран, эта модель продолжает использоваться

ся, как и в течение пяти десятилетий, оставаясь официально предпочтительной парадигмой городского планирования. Реализация планов, разработанных на основе модели всеобъемлющего и детального планирования, на городском уровне в Иране оказалась не столь успешной и создала другие градостроительные проблемы, помимо того, что оказалась неспособной решить существующие проблемы, для решения которых она изначально была предназначена.

Планы городского развития готовятся и реализуются на основе конкретного подхода к городскому планированию, в то время как каждый подход и процесс должны быть локализованы в зависимости от исключительной ситуации в иранском контексте. Этот вопрос относится к различиям условий в административных, правовых и социальных характеристиках между Ираном и другими странами. В иранских городах не признается единый орган управления городским хозяйством, поскольку в процесс принятия решений по городскому развитию вовлечено несколько департаментов, офисов и бюро.

### Краткая история по современному градостроительному законодательству Ирана

Современную градостроительную систему страны можно найти в трёх разных периодах. *Первый период* соответствует периоду Каджаров (до 1925 г.), *второй период* соответствует Пехлевийскому периоду (с 1925 до 1979 г.), а *третий период* – исламской революции, официально продолжается до настоящего времени (с 1979 г. до настоящего времени).

В основном деятельность по реконструкции и благоустройству иранских городов началась в период Каджаров, когда правительство приняло «Акт о муниципалитетах» в 1907 году. Бюро, посольства, новые постройки, театры, кинотеатры, магазины и гостевые дома были построены на основе новейших принципов проектирования, с небольшим количеством договоренностей или правил. Однако официальное планирование и управление землепользованием в Иране началось в 1933 году с принятием правительством закона о строительстве и расширении улиц и переулков. Из-за Второй мировой войны (1939–1945 гг.) градостроительная деятельность в иранских городах ухудшилась, однако в этот период в крупных городах, особенно в Тегеране, были реализованы некоторые функции городского развития в направлении городской модернизации [1, 4]. Впоследствии городское планирование было сосредоточено после Второй мировой войны. Правительство приняло два закона, которые обеспечили правовую основу для реализации функций городского развития. Современное городское планирование началось с 1961 года, когда иранские города испытали подготовку генерального плана на основе политики Третьего национального плана развития. Первоначальные генеральные планы не учитывали все аспекты, такие как проблемы роста городов, но они были подготовлены с использованием комплексного метода планирования и уделяли особое внимание физическим аспектам. Следовательно, эти планы способствовали спекуляциям городской землей, физическому расширению и развитию пригородов. В тот же период было создано Министерство жилищного строительства и мелиорации, за которым последовал секретариат Высшего совета по архитектуре и городскому развитию (AUDHC), который был основан в 1964 году и отвечал за надзор за подготовкой генеральных планов. С началом Четвертого национального плана развития в 1968 году Первый генеральный план был принят секретариатом AUDHC. Правительство заказало подготовку генеральных планов еще для 20 городов. В то же время правительство пыталось реализовать стратегии городского планирования за счет повышения авторитета муниципалитетов, однако развитие городов не полностью соответствовало рекомендациям планов городского развития. Следовательно, правительство продолжало свои усилия по обеспечению соответствующей правовой базы для функций планирования, включая подготовку подробных планов для тех городов, которые утвердили генеральные планы. В соответствии с пунктом 5 Закона о градостроительстве в Иране 1972 г. комплексные городские планы включали генеральные планы и детальные планы. Кроме того, в 1984 году было утверждено соглашение о планах городского развития, получившее название «Двенадцатое соглашение» (Таблица 1) [5, 6].

Таблица 1 – Этапы реализации градостроительного законодательства в Иране

Этап	Год	Градостроительные законы	Описание
1	1907	Акт о муниципалитетах	Основная деятельность по реконструкции и благоустройству городов
2	1933	Закон о строительстве и расширении улиц и переулков	Планирование и управление землепользованием
3	1961	Политика третьего национального плана развития	Подготовка генерального плана. Планы способствовали спекуляции городской землей, физическому расширению и развитию пригородов
4	1968	Четвертый национальный план развития	Подтверждение первого генерального плана, реализация стратегии городского планирования
5	1972	Пункт 5 Закона о градостроительстве в Иране	Комплексные городские планы (генеральные и детальные планы)
6	1984	Двенадцатое соглашение	Планы городского развития

### План развития городов Ирана

В результате принятия закона 1972 года AUDHC ввёл механизм для подготовки окончательного отчета по градостроительным генеральным планам. Соответственно, комиссия в каждой провинции отвечала за пересмотр и утверждение подробных городских планов. Комиссию возглавлял генерал-губернатор каждой провинции. В 1974 г. название Министерства жилищно-коммунального хозяйства и мелиорации было изменено на Министерство жилищно-коммунального хозяйства и городского развития (MHUD) [5].

Закон о планах городского развития был разделен на три категории, а именно на *генеральные планы* (master plan), *детальные планы* (detail plan) и *гид-планы* (guidance plan), каждая из которых была определена в Законе. Кроме того, MHUD отвечало за подготовку комплексного городского плана и подробного плана частными консультантами по городскому планированию. После этого был предоставлен план руководства для решения критических городских проблем в тех городах, где не было генеральных планов. Полномочия, отвечающие за планы, с 1974 г. предоставлялись Министерством по делам страны [1, 7, 8].

*Генеральный план города.* Для определения направлений развития города, а также для своевременного удовлетворения городских нужд, в рамках генерального плана региона и на основе прогнозов на 10-летний период разрабатывается генплан города.

*Проект детальной планировки (детальный план).* Генплан служит основой для подготовки детальных планов. Данный вид проектной документации разрабатывается на всю территорию города как развитие основных положений и принципов генплана и необходим для разделения территории города на участки с различным целевым назначением и правовым режимом. В данном документе отражаются необходимые технико-геодезические параметры инженерно-транспортных коммуникаций, пешеходных путей.

*Гид-план.* Гид-план составляется для малых городов, не имеющих генерального плана, с численностью населения до 35 000 человек и представляет собой сокращенную его версию. В гид-плане определяются границы перспективного развития города и характер городского землепользования для решения неотложных проблем в краткосрочной перспективе [4].

Обзор процесса планирования городского развития показывает, что, хотя планы городского развития были реализованы, городское развитие не соответствовало правилам и рекомендациям планов. Результаты показывают, что различные парадигмы пытаются обеспечить подходящее городское развитие с учетом нескольких аспектов общества, включая экономические, социальные и культурные, а также физические аспекты.

### Теоретические основы градостроительного развития в Иране

Поскольку в иранских городах использовался комплексный подход к планированию, этот подход рассматривается с теоретической точки зрения. Как правило, обзор литературы показывает, что схема комплексного планирования была введена Геддесом, Аберкромби и Мамфордом. Они сформировали всеобъемлющие модели планирования на основе принципов экологии и биологии. Мнения и принципы комплексного планирования Геддеса фактически применялись в городах по всему миру более пятидесяти лет.

Тем не менее, хотя комплексная модель планирования больше не применялась с 1960-х годов, эта модель продолжала использоваться для городского планирования в некоторых развивающихся странах, включая Иран [9].

Мнения и принципы комплексного планирования Геддеса основаны на рационализме, целостном подходе и вере в прогресс. Фалуди (1973 г.) считает, что логические особенности всестороннего планирования привели к подготовке планов на основе детального подхода, в которых прогнозируются детали. Таким образом, такой комплексный шаблон планирования известен как «голубая печать планирования» (анг. Blueprint planning). Комплексная модель планирования подвергалась различной критике с 1960-х годов и считается устаревшей в системе городского планирования в развитых странах. Основываясь на большом количестве литературы, комплексное планирование включает в себя различные недостатки, когда проводится развитие городов. В ответ на недостатки развитые страны, когда генеральное планирование не отвечало городским требованиям, содержащимся в процессе городского развития, частично с 1980-х по 1990-е годы внедрили стратегическое пространственное планирование [10]. Большой объем литературы показал, что стратегическое пространственное планирование адаптировано с учетом особенностей окружающей среды для использования в городском планировании. Можно сделать вывод, что стратегическое пространственное планирование формируется тремя основными элементами, которыми являются:

- ✓ анализ окружающей среды;
- ✓ участие заинтересованных сторон;
- ✓ выполнение.

Стратегическое пространственное планирование имеет прямую связь с вышеупомянутыми элементами, которые считаются сильным инструментом для вмешательства в застроенную среду. Стратегические пространственные планы, как следствие стратегического пространственного планирования, поощряют определенную форму городов к созданию «компактной городской формы». Кроме того, в таком планировании можно найти прочную основу для местных проектов, которые являются элементами градостроительства. Не следует забывать, что на стратегическое пространственное планирование влияют различные эффективные элементы, такие как система организаций, различные правила и традиционная культура. Стратегическое пространственное (или территориальное) планирование может быть успешно реализовано в странах из-за сильной независимости, продемонстрированной среди государственного сектора. Несомненно, что местное самоуправление как важный официальный элемент также играет значительную роль в создании успешного городского планирования. Власти должны иметь сильное влияние на процесс градостроительства в качестве главных координаторов и финансовых ресурсов на местном уровне. Наконец, стратегическое пространственное планирование пытается организовать использование пространства. Таким образом, это может способствовать уменьшению пространственных нарушений человека в городах. Следовательно, его должны исполнять органы местного самоуправления, обладающие соответствующими полномочиями.

Стратегические пространственные планы были реализованы в иранских городах, когда города развивались незапланированным и недисциплинированным образом. Таким образом, планы подтолкнули города к более планомерному развитию, вызвали положительные эффекты в области городского планирования, основанные на изменении взглядов среди градостроителей, менеджеров и экспертов. Данное исследование выявило сильные и слабые стороны комплексного планирования на основе различных научных документов и мнений ученых.

Сильные стороны (преимущества) нынешнего подхода в городском планировании в иранских городах можно объединить в пять основных частей:

1) доказательство необходимости градостроительного планирования для надзора, управления и контроля за градостроительной деятельностью в городах;

2) рассмотрение трансформации городского планирования как междисциплинарного знания для решения проблем и ответа на требования, высказанные новым обществом;

3) попытка использовать различные методы и концепции для улучшения качества жизни;

4) рассмотрение земель как основных основ для организации деятельности;

5) попытка внедрить инновации в жилищное строительство и модернизировать транспортную сеть [11].

С другой стороны, последствия реализации планов городского развития на основе комплексного подхода к планированию выявили заметную разницу между прогнозированием планов и достижением результатов среди иранских городов, слабость которых показана в таблице 2.

**Таблица 2 – Классификация недостатков комплексного планирования в различных областях**

Области	Недостатки
Теоретическая	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Подготовка на основе рационализма, целостности, позитивизма и функционализма.</li> <li>2. Отсутствие реалистичного взгляда на надзор и вмешательство.</li> <li>3. Отсутствие должного внимания к динамичности и сложности природы городов.</li> <li>4. Невозможность прогнозирования.</li> <li>5. Неоднозначность знаний о городском планировании среди различных наук, таких как инженерия, биология и социальные науки.</li> <li>6. Сосредоточить городское планирование на физическом планировании, пренебрегая городским пространством.</li> <li>7. Невнимательность к процессу принятия решений, целям и постановке политики.</li> <li>8. Пренебрежение качеством жизни, социальной справедливостью и ценностями коренных народов.</li> </ol>
Метод и процедура	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Планы готовятся и утверждаются методами пролонгированными, властными (повелительными) и нисходящими.</li> <li>2. Градостроительные планы готовятся на основе детальных, обзорных, непрозрачных и беспричинных исследований.</li> <li>3. Упор на количественные методы, абстракцию и статистику.</li> <li>4. Отсутствие преемственности между этапами городского планирования (подготовка, реализация и управление).</li> <li>5. Акцент на количественные измерения, искусственные перегородки и тому подобные шаблоны.</li> <li>6. Ограничить направление развития городов в будущем негибкими и статичными картами землепользования.</li> <li>7. Невнимание к особенностям местных сообществ и их желаниям и запросам.</li> </ol>
Административная (управление)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Политические взгляды влияют на решение и направление планов городского развития.</li> <li>2. Невнимание к применимости инструментов и возможности объектов.</li> <li>3. Отсутствие участия общественности и бенефициарных групп в «принимать решения и принять решения» (decision making and decision taking).</li> <li>4. Отсутствие трансформации в градостроительном процессе как совокупности административных процедур, так и статических регламентов.</li> <li>5. Недостаточное внимание к финансовым, техническим и организационным ресурсам.</li> <li>6. Отсутствие пересмотра и улучшения прогнозов.</li> <li>7. Отсутствие участия общественности и местных средств, используемых на этапе исполнительной власти и управления.</li> </ol>

**Процесс разработки планов городского развития в Иране**

Что касается комплексной концепции планирования, то подготовка планов городского развития в Иране состоит из трех этапов. Рамочный процесс для планов городского развития был установлен правительством Ирана, который называется «Двенадцатое соглашение». Согласно Двенадцатому соглашению, *первый этап* относится к изучению и познанию города, результатом которого является получение базовой информации о городе, такой как география, история и экономика. *Второй этап* относится к анализу полученных данных на предыдущем этапе. Наконец, *на третьем этапе* описываются планы развития, включая прогнозирование, рекомендации и правила. Как объяснялось ранее, планы городского развития были подготовлены на основе комплексного планирования. Спустя пять десятилетий после реализации этих планов для большинства иранских городов большинство проблем должно было быть решено. Однако выполнение планов показывает, что идеи и цели каждого генерального плана едва ли (вряд ли) соответствуют первоначальным целям и задачам планов при их выполнении. Согласно литературным данным, можно выделить несколько барьеров для невыполнения технико-экономических планов, однако текущее исследование сосредоточено на тех, которые значительно повлияли на города и жителей. Они подразделяются на три основные категории: *подготовка, предварительное утверждение и реализация.*

**1 Подготовка**

Планы предоставляются на основе подхода комплексного планирования, несмотря на то что метод комплексного планирования больше не используется в странах, в которых он зародился, т. е. в развитых странах. На самом деле эти планы составляются на основе теории функционализма. Поскольку теория функционализма имеет ограничения из-за собственной природы, большая часть этих планов считается физическим аспектом городов [1]. Эти условия привели к тому, что городское планирование было сведено к физическому планированию, которое не учитывает социальные и культурные вопросы в этих планах [11, 12].

Планы готовятся, несмотря на то что они не связаны с планами верхнего и нижнего уровней (такими как национальный план социально-экономического развития, планы улучшения и реконструкции). Следовательно, планы готовятся без учета основной политики правительства на городском уровне. Из этого следует, что градостроительный план может не соответствовать разным уровням. С другой стороны, на цели в этих планах влияет мнение политических властей [5]. Кроме того, неподходящие правила, такие как фиксированная плотность застройки, привели к тому, что эти планы не учитывали запросы и требования граждан после того, как планы были подготовлены. Планы были подготовлены без учета экономических аспектов, что отражает ситуацию в городской экономике, такую как стои-

мость городской земли после реализации планов городского развития. Наконец, в действующих генеральных планах процессы принятия решений не разделены, а различные организации, учреждения и городское управление не скоординированы из-за отсутствия четких регламентов при подготовке планов. Таким образом, мнения людей не учитываются в процессе подготовки.

Кроме того, правительство заключает контракты с частным сектором (компаниями-консультантами по городскому планированию) для подготовки планов развития на основе соглашения, аналогичного Двенадцатому соглашению, которое типично для каждого иранского города. С принятием Двенадцатого соглашения в 1984 году, оно считается одним из основных критериев в процессе подготовки планов. Кроме того, оно не обновлялось в течение многих лет, в отличие от различных стран, которые трансформируют свой процесс подготовки планов городского развития каждые несколько лет.

### 2 Предварительное утверждение

В основном планы городского развития были подготовлены благодаря возможностям, запросам и политике центрального правительства. Таким образом, мнения центрального правительства полностью реализуются в процессе подготовки и утверждения. Другими словами, запросы и возможности муниципалитетов не обязательно учитываются ни в процессе подготовки, ни в процессе утверждения. Это может произойти из-за того, что эти планы являются линейными сверху вниз. В этом отношении централизация государственной системы сделала процесс утверждения очень трудоемким [3]. Следовательно, политики и стратегии не обновляются. Более того, муниципалитеты не играют непосредственной роли в процессе утверждения, так как первоначально ответственность за этот процесс несут провинциальные власти. Кроме того, в большом количестве литературы указывается, что люди не играют никакой роли в процессе утверждения генеральных планов. Следовательно, их запросы и мнения не учитываются в процессе утверждения генеральных планов. Обычно процесс пересмотра и утверждения планов городского развития не является интегрированным. Например, городские власти (городской совет и муниципалитет) и профессиональные учреждения не играют никакой роли в процессе пересмотра и утверждения. Планы пересматриваются или утверждаются в течение длительного периода времени.

Еще одной причиной в данном случае является отсутствие четких правил и критериев городского развития. К сожалению, планы были пересмотрены и утверждены без всеобъемлющих правил в процессе пересмотра и утверждения. Поэтому функциональные цели плана могут быть изменены даже на финальном совещании процесса утверждения. Кроме того, отсутствие всеобъемлющих законов и правил привело к отсутствию интеграции планов городского развития с региональными и национальными планами.

### 3 Реализация

Правительство Ирана практиковало систему централизации, которая влияла на полномочия организаций, учреждений и ведомств при реализации планов градостроительства. Кроме того, различные организации в процессе городского планирования не были должным образом скоординированы из-за отсутствия всеобъемлющих законов, правил и политики в области городского планирования. Таким образом, между различными городскими властями нет интегрированного управления городским хозяйством. Более того, муниципалитеты не считаются городским управлением. Таким образом, различные бюро и организации на провинциальном или городском уровне могут ограничивать функции муниципалитетов в реализации процесса градостроительства с точки зрения их юридических обязанностей и отсутствия надлежащей координации между муниципалитетами и другими организациями. Например, права собственности и полномочия по вмешательству в городские земли были делегированы различным учреждениям, организациям и советам, таким как MHUD (Министерство жилищно-коммунального хозяйства и городского развития), ULO (Организация городских земель), Управлению регистрации документов и Организации природных ресурсов.

Кроме того, муниципалитеты сталкиваются с препятствиями в реализации планов из-за того, что им не хватает финансовых и человеческих ресурсов, а человеческие ресурсы муниципалитетов не

соответствуют тому, что они должны делать в отношении планов городского развития. На практике не проводятся консультации между муниципалитетами и частным сектором, а также посредниками неправительственных организаций в процессе реализации. Фактически реализация градостроительных планов в этих муниципалитетах представляется невозможной. Кроме того, множество законов и правил в системе городского планирования Ирана вызвало некоторую путаницу в реализации планов городского развития [11].

Еще одна трудность возникает, когда на процесс реализации довольно сильно влияет рынок земли, который вызвал противодействие частной выгоде и общественной выгоде из-за отсутствия квалифицированных законов и правил в городах. Как правило, физические и функциональные взгляды нынешнего подхода к городскому планированию низвели определение землепользования до единственной основной цели планов городского развития в Иране. Карта фиксированного землепользования и таблицы фиксированных критериев являются основными аспектами текущих планов городского развития благодаря уделению особого внимания физическому расширению городов. С другой точки зрения, отсутствие интегрированной системы, включающей законы, положения и политику планирования землепользования, вызвало некоторые социальные, экономические и правовые проблемы для реализации планов городского развития, особенно землеустройства, которое является основным элементом в осуществлении градостроительной деятельности. Это способствовало упадку городского управления и структурному росту городов в последние годы.

### **Особенности различия планов городского развития между Ираном и другими развивающимися странами**

Основное внимание в исследовании планов развития городов Ирана уделялось развитию территории города как основному инструменту правительства для управления ростом городов. Обзор процесса планирования городского развития показывает, что, хотя планы городского развития были реализованы, городское развитие не соответствовало правилам и рекомендациям планов. Следовательно, в документе (план развития городов) была предпринята попытка определить препятствия для реализации планов в иранских городах. Таким образом, процесс планирования городского развития был пересмотрен на основе всестороннего обзора литературы, чтобы понять различный опыт других стран. Результаты показывают, что различные парадигмы пытаются обеспечить подходящее городское развитие с учетом нескольких аспектов общества, включая экономические, социальные и культурные, а также физические аспекты.

Это исследование признает и вводит определенные препятствия для успешных планов городского развития. Эти барьеры можно увидеть и в других развивающихся странах из-за сходства особенностей институтов и общества. Как правило, учреждения городского планирования сталкиваются с рядом проблем в развивающихся странах.

В иранских городах не признается единый орган управления городским хозяйством, поскольку в процесс принятия решений по городскому развитию вовлечено несколько департаментов, офисов и бюро. Таким образом, развитие и инвестиции в городскую инфраструктуру и коммунальные услуги смешиваются или игнорируются. Это заставляет соответствующие учреждения пытаться обеспечить городскую инфраструктуру и основные услуги посредством планов городского развития.

Отсутствие достаточных городских услуг и несоответствующая городская инфраструктура означают, что потребности повседневной жизни людей не удовлетворяются планами городского развития [13, 14]. Следовательно, это условие побуждает людей игнорировать правила и политику, а это значит, что рекомендации градостроительных планов недостижимы.

С другой стороны, есть еще одно серьезное препятствие в подготовке и реализации парадигм городского планирования. Этот барьер можно назвать нестабильностью экономической и социальной инфраструктуры в городах. Фактически Иран, как развивающаяся страна, быстро претерпел изменения и преобразования в своих политических, экономических и социальных структурах в отношении эффективных внутренних и внешних элементов. Изменения в сельскохозяйственной системе и политике индустриализации привели к быстрой урбанизации Ирана за последние несколько десятилетий.

Эти события повлияли на нормальное распределение населения в обитаемых районах Ирана. Следовательно, быстрые изменения можно увидеть почти во всех иранских жилых комплексах, включая города, поселки и деревни. Эти изменения в жилых районах указывают на то, что нынешняя плановая и административная структура не в состоянии реагировать на быстрые изменения в распределении населения.

Обзор процесса развития иранских городов показывает, что городские земли играют ключевую роль в осуществимости городских планов. Ограничение городских земель и растущий спрос усилили потребность в эффективной роли городских земель для успешного процесса городского развития. Таким образом, перед каждым действием по улучшению системы городского планирования в Иране необходимо выполнить несколько предварительных функций. Эти обязательные функции должны решить проблему нехватки городских земель, отсутствия соответствующей городской инфраструктуры, несовместимости административных организаций и отсутствия участия общественности.

### Выводы

Это исследование представлял собой всесторонний обзор современной литературы по концепции городского планирования и оценку процесса планирования городского развития в иранских городах. На основе обобщения данного исследования можно сделать следующие выводы:

- реализацию градостроительного законодательства Ирана можно разделить на 6 этапов начиная с 1907 г. (в основном деятельность по реконструкции и благоустройству городов) до 1984 г. (планы городского развития);

- планы развития городов Ирана можно разделить на три основных категории, а именно генеральные планы (master plan), детальные планы (detail plan) и гид планы (guidance plan), каждый из них имеет свое определенное основное содержание и описание проекта;

- стратегическое пространственное планирование городов было реализовано в иранских городах (на основе мнения и принципов комплексного планирования Геддеса, Аберкромби и Мамфорда), когда города развивались незапланированным и недисциплинированным образом. После нескольких десятилетий применения такого теоретического подхода к планам развития городов в Иране зафиксировали 5 основных преимуществ и недостатки в трех областях градостроительства: теоретической, метод и процедура и административной (управление);

- рамочный процесс, который называется «Двенадцатое соглашение», был установлен правительством Ирана для планов городского развития. Подготовка планов городского развития в Иране состоит из трех этапов: первый этап – изучение и познание города, второй этап – анализ полученных данных на предыдущем этапе, третий этап – описание планов развития, включая прогнозирование, рекомендации и правила;

- выполнение планов развития городов в Иране показывает, что идеи и цели каждого генерального плана вряд ли соответствуют первоначальным целям и задачам планов при их выполнении. Процесс разработки планов городского развития в Иране подразделяется на три основные категории, включая подготовку, предварительное утверждение и реализацию;

- выявление несколько барьеров в процессе планирования городского развития, которые можно объединить в пять основных категорий: контекст, структура городского планирования, закон, участие общественности и финансовые ресурсы. Таким образом, процесс городского планирования в Иране можно улучшить за счет институционального сотрудничества, использования подхода на основе участия, децентрализации механизма власти в пользу местных органов власти и создания интерактивных возможностей для различных заинтересованных сторон в городе. Вышеупомянутые функции будут затронуты, когда правительство решит провести модификацию системы планирования в сторону большей гибкости, должным образом адаптировать статус законодательства, пересмотреть процесс принятия решений, повысить общественное доверие и повысить социальную ответственность в городе.

### Заключение

Представленное исследование сосредоточено на осуществимости планов городского развития в Иране, в нем описывается эволюция иранского городского планирования, основная методика выполнения и процесс подготовки планов городского развития, направлено на выявление барьеров, препятствующих реализации планов городского развития в иранских городах в отличие от других развивающихся стран.

Данное исследование заключается в том, что процесс планирования городского развития в Иране может достичь оптимальной эффективности, если общие аспекты потребностей общества будут учтены в парадигмах городского планирования. Следует отметить, что иранское общество имеет особые ситуации с точки зрения социальных, культурных и экономических условий. Таким образом, в будущую работу было бы полезно включить оценку иранской системы городского планирования для использования новых парадигм городского планирования, таких как стратегия развития города (CDS) или оценка устойчивости города по разным стандартам (LEED, BREEAM, Casbee, DNGB, Green Star и т. д.) в соответствии со специфическими особенностями иранских городов [4, 7, 8]. Такое направление поддерживает иранское градостроительное планирование для лучшего понимания влияния особенностей новых парадигм на эффективность защиты городских земель и окружающей среды в иранских городах.

Невозможно, чтобы планы городского развития готовились и реализовывались на основе конкретного подхода к городскому планированию, в то время как каждый подход и процесс должны быть локализованы на основе исключительной ситуации в иранском контексте. Этот вопрос относится к различиям условий в административных, правовых и социальных характеристиках между Ираном и другими странами.

### Список цитированных источников

1. A View to Urban Planning of Iran. Published report. – Tehran : Ministry of country publication, 2000. – 261 p.
2. Каширипур, М. М. Методологические основы и критерии оценки архитектурно-планировочной структуры малых городов Ирана с учетом требований устойчивого развития / М. М. Каширипур // Архитектура : сборник научных трудов. – 2016. – № 9. – С. 138–142.
3. Saeidnia, A. Urban development plans: Problems & strategies / A. Saeidnia // Shahr-dariha Journal. – 1999. – № 8. – С. 6–10.
4. Каширипур, М. М. Особенности разработки градостроительных проектов для малых городов Ирана / М. М. Каширипур // Архитектура : сборник научных трудов. – 2014. – № 7. – С. 116–122.
5. Mozayani, M. Urban Development with Planning or without Planning / M. Mozayani // Municipals Magazine. – 2001. – № 17 (1). – С. 45–57.
6. Каширипур, М. М. Некоторые особенности формирования архитектурно-планировочной структуры малых городов Ирана / М. М. Каширипур // Архитектура : сборник научных трудов. – 2017. – № 10. – С. 83–89.
7. Каширипур, М. М. Анализ планировочной структуры малых городов Ирана / М. М. Каширипур // Наука и техника. Строительство. – 2014. – Серия 2. – № 5. – С. 85–91.
8. Каширипур, М. М. Совершенствование архитектурно-планировочной структуры малых городов региона Ближнего Востока на основе концепции устойчивого развития : дис. ... канд. арх.: 05.23.23 / М. М. Каширипур ; Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2017. – 208 с.
9. Panahandeh Khah, M. A critique of the prevailing comprehensive urban planning paradigm in Iran: the need for strategic planning / M. Panahandeh Khah, R. Farhoodi, M. Gharakhlou-N, M. Ghadami // Plann. Theory. – 2009. – Issue 4. – Vol. 8. – С. 335–361.
10. Inclusive and Sustainable Urban Planning: A Guide for municipalities / UN-Habitat. – New York: Un-Habitat, 2007. – Vol. 1. – 55 p.
11. Appropriate methods to prepare of urban development plans in Iran / Sharmand Company. – Tehran : Shahr-dari publication, 2003. – 108 p.
12. Каширипур, М. М. Пути совершенствования нормативно-правовой базы градостроительного проектирования в Иране и её соответствие концепции устойчивого развития / М. М. Каширипур // Наука и техника. – 2017. – № 5. – С. 498–505.
13. Enacted collection report: architecture & urban development high council / AUDHC. – Tehran : Nashr e tosehe, 2010. – 218 p.

14. Kheirabadi, M. Iranian Cities / M. Kheirabadi, X. Hataminezhad, E. Mafi. – Tehran : Mashhad, 2000. – 159 p.
- References**
1. A View to Urban Planning of Iran. Published report. – Tehran : Ministry of country publication, 2000. – 261 p.
  2. Kashiripoor, M. M. Metodologicheskie osnovy i kriterii ocenki arhitekturno-planirovochnoj struktury malyh gorodov Irana s uchedom trebovanij ustojchivogo razvitiya / M. M. Kashiripoor // Arhitektura : sbornik nauchnyh trudov. – 2016. – № 9. – S. 138–142.
  3. Saeidnia, A. Urban development plans: Problems & strategies / A. Saeidnia // ShahrDariha Journal. – 1999. – № 8. – P. 6–10.
  4. Kashiripoor, M. M. Osobennosti razrabotki gradostroitel'nyh proektov dlya malyh gorodov Irana / M. M. Kashiripoor // Arhitektura : sbornik nauchnyh trudov. – 2014. – № 7. – S. 116–122.
  5. Mozayani, M. Urban Development with Planning or without Planning / M. Mozayani // Municipals Magazine. – 2001. – № 17 (1). – P. 45–57.
  6. Kashiripoor, M. M. Nekotorye osobennosti formirovaniya arhitekturno-planirovochnoj struktury malyh gorodov Irana / M. M. Kashiripoor // Arhitektura : sbornik nauchnyh trudov. – 2017. – № 10. – S. 83–89.
  7. Kashiripoor, M. M. Analiz planirovochnoj struktury malyh gorodov Irana / M. M. Kashiripoor // Nauka i tekhnika. Stroitel'stvo. – 2014. – Seriya 2. – № 5. – S. 85–91.
  8. Kashiripoor, M. M. Sovershenstvovanie arhitekturno-planirovochnoj struktury malyh gorodov regiona Blizhnego Vostoka na osnove koncepcii ustojchivogo razvitiya : dis. ... kand. arh.: 05.23.23 / M. M. Kashiripoor ; Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet. – Minsk, 2017. – 208 s.
  9. Panahandeh Khah, M. A critique of the prevailing comprehensive urban planning paradigm in Iran: the need for strategic planning / M. Panahandeh Khah, R. Farhoodi, M. Gharakhlou-N, M. Ghadami // Plann. Theory. – 2009. – Issue 4. – Vol. 8. – P. 335–361.
  10. Inclusive and Sustainable Urban Planning: A Guide for municipalities / UN-Habitat. – New York: Un-Habitat, 2007. – Vol. 1. – 55 p.
  11. Appropriate methods to prepare of urban development plans in Iran / Sharmand Company. – Tehran : ShahrDariha publication, 2003. – 108 p.
  12. Kashiripoor, M. M. Puti sovershenstvovaniya normativno-pravovoj bazy gradostroitel'nogo proektirovaniya v Irane i eyo sootvetstvie koncepcii ustojchivogo razvitiya / M. M. Kashiripoor // Nauka i tekhnika. – 2017. – № 5. – S. 498–505.
  13. Enacted collection report: architecture & urban development high council / AUDHC. – Tehran : Nashr e tosehe, 2010. – 218 p.
  14. Kheirabadi, M. Iranian Cities / M. Kheirabadi, X. Hataminezhad, E. Mafi. – Tehran : Mashhad, 2000. – 159 p.

*Материал поступил 06.03.2023, одобрен 01.05.2023, принят к публикации 02.05.2023*

УДК 504.062.2

## СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО ОТХОДА ФОСФОГИПСА ОАО «ГОМЕЛЬСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ ЗАВОД»

**Н. Ю. Макаревич<sup>1</sup>, В. Н. Яглов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Аспирант кафедры «Инженерная экология», УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: selyavi8@mail.ru

<sup>2</sup> Д. х. н., профессор кафедры «Инженерная экология», УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь

### Реферат

В Республике Беларусь считается актуальной экологическая проблема рациональной переработки техногенного массива фосфогипса ОАО «Гомельского химического завода», которые занимают третье место по объему образования отходов после ОАО «Беларускалий» (солевые галитовые отходы и глинисто-солевые шламы). Многотоннажный отход является обременительным материалом для региона и общей экообстановки республики, воздействуя на экосистемы и обостряя социальное напряжение близлежащих населенных пунктов. Целью данного исследования является анализ существующей информации относительно фосфогипса: химический состав, условия хранения, возможные области использования и способы переработки данного отхода, а также выявленные в связи с его образованием экологические риски, радиоактивные опасности, взаимодействие его с другими экосистемами и негативное влияние на них. Приведены некоторые пути решения существующих проблем.

Рассмотрены перспективные направления практического использования фосфогипса в исходном или переработанном виде (извлечение РЗЭ, в дорожном строительстве, мелиорации почв, в строительном секторе) проанализирована значимость переработки фосфогипса для снижения техногенной нагрузки и получения целевой востребованной продукции, а также важность минимизации негативных последствий накопления и хранения отхода на все составляющие окружающей среды.

**Ключевые слова:** фосфогипс, состав, свойства, переработка отхода, редкоземельные элементы, химическая промышленность, экологическая проблема, композиционные смеси.

## METHODS OF PROCESSING TECHNOGENIC WASTE OF PHOSPHOGYPSUM JSC "GOMEL CHEMICAL PLANT"

**N. Yu. Makarevich, V. N. Yaglov**

### Abstract

In the Republic of Belarus, the ecological problem of rational processing of technogenic phosphogypsum of JSC "Gomel Chemical Plant" is considered urgent, which occupy the third place in terms of waste generation after JSC "Belaruskali" (salt halite waste and clay-salt sludge). Multi-tonnage waste is burdensome material for the region and the general ecological situation of the republic, affecting ecosystems and exacerbating the social tension of nearby settlements. The purpose of this study was to analyze the existing information regarding phosphogypsum: chemical composition, storage conditions, possible areas of use and methods of processing this waste, as well as environmental risks, radioactive hazards identified in connection with its formation, its interaction with other ecosystems and its negative impact on them. Some ways of solving existing problems are given.

Promising areas of practical use of phosphogypsum in its original or processed form (extraction of REE, in road construction, soil reclamation, in the construction sector) are considered, the importance of processing phosphogypsum to reduce the anthropogenic load and obtain target products in demand, as well as the importance of minimizing the negative effects of waste accumulation and storage on all components of the environment is analyzed.

**Keywords:** phosphogypsum, composition, properties, waste processing, rare earth elements, chemical industry, environmental problem, composite mixtures.

### Введение

Промышленный сектор Республики Беларусь неизбежно формирует давление техногенного массива отходов на экологическое состояние и загрязнение природной среды скоплением некондиционного материала в терриконы, которые в свою очередь концентри-

руют многотоннажный объем отходов в силу несовершенства технологических процессов переработки полезных ископаемых. Образование отходов в Республике Беларусь по данным статистического комитета [1] в таблице 1.

**Таблица 1** – Образование отходов в Республике Беларусь по отраслям 2010–2022 гг.

Виды деятельности: 1000 т/г:	2010	2015	2019	2020	2021	2022
Сельское хозяйство, лесоводство и рыболовство	440,4	414,0	727,4	997,1	702,4	702,8
Горнодобывающая промышленность	1 431,3	4 161,0	1 248,8	455,9	1 607,8	1675,6
Обрабатывающая промышленность	39 228,9	38 605,0	50 887,6	50 016,6	50 506,8	27890,6
Снабжение разными видами энергии	170,4	1 002,0	661,4	499,3	511,3	1487,3
Строительство	1 136,8	493,0	1 976,6	1 857,0	1 756,9	1713,2
Другие виды деятельности	1 367,6	5 190,3	5 335,0	7 357,7	7 101,8	6617,3
<b>ВСЕГО:</b>	<b>43 775,4</b>	<b>49 865,3</b>	<b>60 836,8</b>	<b>61 183,4</b>	<b>62 250,0</b>	<b>40086,74</b>

С 2010 до 2021 года наблюдается стойкое увеличение отходов, в 2022 году резкое снижение практически на треть от предыдущего года. Рассматривая каждую категорию деятельности, можно с уверенностью сказать, что увеличение образования отходов происходит в каждом секторе, за исключением обрабатывающей промышленности – сократилось фактически вдвое. К обрабатывающей промышленности относится дея-

тельность ОАО «Гомельского химического завода», ОАО «Беларускалий», ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» и др. – всего 15 422 организации по стране. Сокращение образования отходов данной деятельности не связано с их переработкой или масштабной утилизацией, а по причине снижения объемов производства, обусловленного экспортными ограничениями и проблемами логистического характера.



а – вид со спутника по данным интернет-ресурса Google Карты;  
б – фотография состояния отвалов фосфогипса (состояние на 01.05.2023)  
**Рисунок 1** – Терриконы фосфогипса ОАО «Гомельский химический завод»

Одним из видов отходов обрабатывающей промышленности является фосфогипс –  $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$  — хвостовой многотоннажный материал химической промышленности, образующийся при переработке Кольского апатита для получения фосфорной кислоты и минеральных удобрений.

На 1 т целевой продукции (фосфорной кислоты) образовывается порядка 5 тонн – фосфогипса. За период деятельности завода терриконы достигли в высоту свыше 100 м (уклон насыпей от 25–40 °) и объема – более 22 млн т. Данный гипсонакопитель занимает территорию более 90 га (рисунок 1).

Накопление, транспортировка отхода в шламохранилище, хранение и малый процент переработки создают экологические проблемы в регионе на экосистемы: пыление (летнее время) – загрязнение воздушного пространства, нарушение состава водных систем, использование земель, пригодных для сельского хозяйства, слабая радиоактивность отхода требуют разработки комплексного метода или усовершенствование существующих способов утилизации техногенного массива с целью повышения экологического и экономического показателей, а также снижение социальной напряженности в области промышленного комплекса. Концептуальное ориентирование на принцип ресурсосбережения, обращение промышленных отходов в востребованный продукт, сберегая природу от негативных последствий, – является актуальным направлением.

### Основная часть

На территории Республики Беларусь, Российской Федерации и других стран мира фосфогипса скопилось 7 млрд т, занимаемые терриконами площади составляют более 12,5 млн га. Фосфогипс относится к материалу 4 класса опасности – малоопасные вещества согласно ГОСТ 12.1.007 – и представляет собой кристаллический порошок белого или с сероватого цвета, без запаха, рыхлый, способный к комкованию. В воде данный отход практически не растворим (2 г/л), имеет насыпную плотность 1460–1670 кг/м<sup>3</sup>. Влажность отхода составляет от 20–40 %, поэтому отход имеет склонность к слеживанию и при этом плотность его увеличивается до 2300–2350 кг/м<sup>3</sup>. Постоянная масса определяется при сушке 60–65 °С. Гранулометрический состав отхода: преобладающий размер частиц до 0,1 мм – 50–85 %, от 0,1 мм до 0,3 мм – 10–25 %, и крупнее частицы – 10–25 %. При образовании фосфогипса имеет усредненный показатель pH ≈ 3, вовремя нахождения в шламонакопителе отход постоянно промывается атмосферными осадками и через 5–7 лет показатель увеличивается pH ≈ 5–6. Промерзает при невысоких отрицательных температурах в пределах от –4 °С до –5 °С.

В зависимости от технологического процесса и поставляемого сырья при переработке возможно образование дигидрата  $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$  или полугидрата  $(CaSO_4 \cdot 0.5H_2O)$  фосфогипса, которые существенно различаются по своим свойствам. Полугидрат (образованный не менее 3 суток) имеет вяжущие свойства, дигидрат в свою очередь ими не обладает, теряя свободную влагу, переходит в порошкообразную форму.

Переработка и использование данного отхода затрудняется рядом причин, связанных с его физико-химическими свойствами примесей. В отличие от природного гипса (сульфатный минерал), фосфогипс отличается природой происхождения (промышленный отход) и наличием примесей, как фтор и остатки кислот, значительно влияют на схватывание и прочность вяжущих на основе отхода, изменяются также влагостойкость, гигроскопичность, плотность и другие свойства.

Наличие в отходе фторидных соединений в зависимости от их содержания (в среднем 0,1 %) значительно снижает прочностной показатель вяжущего практически вдвое. При термообработке фосфогипса данные соединения образуют газовую фазу, что негативно влияет на используемое оборудование в виде прогрессирующей коррозии.

На вяжущие свойства гипса влияет присутствие в отходе остатков кислот, поэтому для переработки обязательным является этап нейтрализации. Одним из способов является отмывка водой, что является образованием новых отходов и дополнительных финансовых вложений. Второй способ нейтрализации в практике чаще всего используют известь при механической активации для лучшего перемешивания всего объема смеси, количество реагента зависит от начального показателя кислотности отхода (1–3 % от массы).

Также для данного этапа нейтрализации возможно рассмотреть органическую добавку в виде карбамидоформальдегидной смолы (КФЖ), которая полимеризуется в среде с водородным показателем до 7. Для процесса с использованием КФЖ из операционных этапов применяется только перемешивание смеси для получения химбетона с оптимальным содержанием фосфогипса до 50 %. Существенным недостатком является короткий период затвердения (2–5 минут), что ведет к применению дополнительных соединений замедлителя и, как следствие, к удорожанию смесей.

Как альтернативу гидроксиду кальция стоит рассмотреть отход шлам химводоподготовки (ХВО) для нейтрализации фосфогипса, расход данного реагента несколько выше порядка 5–7 % от массы, но поскольку шлам ХВО нигде не используется, данная замена весьма актуальна с точки зрения вовлечения в оборот еще одного техногенного отхода.

На этапе нейтрализации с механоактивационным измельчением, во время которых происходит изменение физико-механических свойств, и добавлением извести, особую роль играют истирающие силы при тщательном равномерном перемешивании всего объема смеси от 10–15 минут с повышением реакционных свойств. После нейтрализации для последующего применения фосфогипса нужно избавиться от свободной влаги 25–40 %, что подразумевает предварительную сушку.

Гипсовое вяжущее возможно получить, смешивая нейтрализованный фосфогипс с цементом, повышая водостойкий показатель изделия производя автоклавную обработку. Также для повышения водостойкости рассматривают портландцемент, различные шламы, гидрофобизаторы. Высокообжиговые вяжущие из фосфогипса обладают быстрым набором прочности и твердеют без добавок активаторов [2].

Разработка безобжиговых технологий и составов смесей на основе фосфогипса рассматривает способ прессования. Уменьшение количества воды находится в прямой зависимости с показателем прочности, как так уменьшается количество пор при полной стабилизации изделия. Это связано со строением кристаллов фосфогипса, с помощью давления они сближаются и образуют новые игольчатые структуры. Оптимальным давлением стоит считать от 10–15 МПа, с ростом давления до 20 МПа уменьшается пористость материала и

повышается плотность материала. Наблюдается также прирост прочность изделий из отхода на 28–30 суток порядка 10–20 %.

Фосфогипс по своим свойствам подходит для использования в дорожном строительстве в качестве заполнителя и основы для бетонных дорожных полотен, если не учитывать его низкую морозостойкость и примеси тяжелых металлов, однако стоит учитывать климатические зоны эксплуатации. В Республике Беларусь имеется автомобильная дорога построена с использованием в составе земляного полотна отвалного фосфогипса (дорога Гомель – Добруш). Фосфогипс может служить альтернативным сырьем в замене традиционных материалов (песок, щебень) при строительстве и ремонте дорожных путей в виде строительства основания для последующего укладывания асфальтовых смесей или же полностью составлять все части дорожного покрытия. Ограничением является переработка «свежего» фосфогипса, отход в отвалах является непригодным для дорожного строительства [3].

На территории Гомельского химического завода в шламоотвалах хранится порядка 450 тыс. т ценного стратегического сырья в виде соединений РЗЭ – ценный стратегический материал, который не добывается в республике, а закупается в других странах. Усредненный химический состав отхода приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Усредненный химический состав фосфогипса ОАО «Гомельский химический завод»

Компоненты	CaO	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	R <sub>2</sub> O	ΣРЗЭ	H <sub>2</sub> O
Массовая доля, % мас.	31.8	44.6	0.42	0.33	1.44	0.77	0.1	0.58	19.6

В апатитовом концентрате с помощью метода атомно-эмиссионной спектроскопии определили содержание индивидуальных РЗЭ и примесей, из таблицы 3 можно сделать

вывод – преобладает цериевая группа металлов (от лантана до неодима) – 94,7 % мас. от суммы РЗЭ. Наличие соединений РЗЭ отрицательно сказывается на свойствах вяжущего из фосфогипса.

Таблица 3 – Содержание оксидов РЗЭ в фосфогипсе ОАО «Гомельский химический завод»

Оксиды РЗЭ	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Y
Содержание, % мас.	27,2	47,0	3,7	16,7	1,9	0,49	1,39	0,07	0,36	0,08	0,07	0,98

По извлечению соединений РЗЭ сравнительную результативность показали научные работы с использованием ионнообменных смол, минеральных кислот и разных их концентраций, конверсионный метод, биоготехнологическое выщелачивание. Обладая уникальными физико-химическими свойствами, комплекс РЗЭ является ценным сырьем и широко используется в современном технологическом мире во многих отраслях. Направление весьма разнообразно научными экспериментами и опытами, но в настоящее время методы извлечения не приносят удовлетворительных результатов. Проблема состоит в полноразмерном извлечении соединений РЗЭ из отхода и предложенных технологиях. К недостаткам относятся:

- трудоемкость процесса (многостадийность, фильтрации, промывка и т. д.);
- стоимость предлагаемых реагентов/сорбентов;
- высокая коррозия оборудования;
- энергозатратность (предварительная сушка, обжиг);
- неполное извлечение РЗЭ;
- образование других видов отходов и др.

Разработки в данном направлении ведутся и по сей день.

Природный минерал гипса обладает радиоактивностью – 29 Бк/кг, фосфогипс – 574 Бк/кг, что сильно затрудняет широкое и полномасштабное применение отхода для переработки его в строительный материал. Немаловажно учитывать показатели радиоактивности (U и Th, и ряда изотопов Po, Ra и Rn) в фосфогипсе, которые не позволяют повсеместно использовать отход в качестве мелиоранта, накопление и превышение ПДК колеблется от 2–12 раз. На солонцовых почвах вносили фосфогипс в первозданном виде и в комплексных соединениях. Результативность проявляется на аэрации почвы, что влияет на повышение скорости влагопитываемости на 33–35 % и понижении плотности почв дерново-подзолистых, серых лесных и черноземах. [4] Также совместная переработка фосфогипса и сельского хозяйства (отходы свиноподкомплексов) с получением орга-

номинерального удобрения в реагент для получения в дальнейшем востребованных органоминеральных удобрений открывает новое направление и последующие разработки переработки и применения техногенного наследия.

Влияние складирования и хранения фосфогипса на экосистемы региона вызывает опасность загрязнения водной территории (поверхностные и грунтовые), растительного покрова, воздушной среды. Под цехами завода и отвалами сформировалась единая зона загрязнения до 7 км<sup>2</sup>, представленная сильноминерализованными водами (общее солесодержание от 8 до 31,5 г/л) с превышающими ПДК значениями по фтор-, фосфат- и сульфат-ионам [5]. Поверхностные воды вблизи терриконов имеют сильно выраженную кислую среду (рН = 2–3). Часть загрязнения наносится розой ветров во время оседания частиц фосфогипса из воздуха, часть загрязнения непосредственно от промышленного комплекса – в речное русло. Нарушается активность биоты в ближайших водоемах, повышается рост водорослей и снижается количество кислорода.

Происходит загрязнение и воздушного пространства в сухое теплое время года. Фосфогипс способен подсушиваться и пылить в радиусе до 10 км от промышленного комплекса. В этой связи особенно стоит выделить фтор и стронций и их превышение ПДК. В пыли, поднимающейся над отвалами, содержится в среднем до 8–10 г фтора на 1 т фосфогипса (радиус распространения пыли до 1–2 км), примерно 10 % фтора вымывается осадками [6]. Выбросы газов (пары кислот, аммиак) непосредственно заводом негативно влияют на деградацию лесных пород, в частности хвойные породы, вблизи промзоны на расстоянии до 2 км.

Экологически нарастающая проблема переработки техногенного отхода затрагивает ряд других стран, таких как Российская Федерация, Тунис, Украина, Бразилия, Китай, США. По статистике ежегодное образование в мире фосфогипса – от 150 до 280 млн т, что представляет собой глобальную экокатастрофу. В США спорная позиция использования фосфогипса для дорог: Агентство по окружа-

ющей природе в 2020 г. разрешило использовать, в 2021 г. оно же запретило. Агентство ссылается на разработку рекомендаций и технологий до 2024 г. В Китае частично фосфогипс используют для замедления схватывания бетонных смесей, при производстве гипсокартона, а также в виде мелиоранта для почвы, но процентное соотношение мало по сравнению с темпами его образования. По данным литературных источников только Япония полностью утилизирует данный отход. В Российской Федерации существует несколько промплощадок с фосфогипсом общим числом свыше 200 млн т. Самым большим является шламохранилище «Белая гора» [7] расположенное вблизи г. Воскресенск – порядка 60 млн т. Последнее десятилетие фосфогипс в Российской Федерации нашел применение в сельском хозяйстве (поликкомпонентное удобрение), а также при благоустройстве, ремонте и строительстве автополюсов.

#### Заключение

Из вышеизложенного следует, что фосфогипс является аналогом природного гипса с рядом существенных примесей, извлечение которого предшествуют операции нейтрализации, предварительная механическая активация, сушка и др. С экономической точки зрения данный фактор добавляет стоимости к готовой продукции и этим делает непривлекательным на рынке, снижая конкурентоспособность. Разработка технологии безотходной переработки с минимальными энергозатратами решит спектр экологических проблем:

- производство востребованной целевой продукции для строительного сектора;

- переработка скопившегося техногенного груза означает снижение финансовых потерь на транспортировку, складирование, налоговые вычеты;

- при комплексном подходе в переработке фосфогипса необходимо извлечение соединений РЗЭ;

- высвобождение и рекультивация земель, занимаемая отходом, в дальнейший оборот сельского хозяйства;

- использование в композиционных смесях из фосфогипса в соотношении с другими некондиционными материалами (гранитный отсев, шлак химводоподготовки, шлаки металлургического завода) промышленных производств Республики Беларусь, учитывая их физико-химические свойства.

Фосфогипс следует расценивать как альтернативу в рациональном природопользовании переработки техногенной нагрузки с широким диапазоном: в строительстве дорог, гражданском строительстве, в сельском хозяйстве, сырьевая платформа, содержащая комплексы РЗЭ. Грамотная глубокая переработка позволит минимизировать негативную обстановку в стране, улучшить геологическую нагрузку ландшафта и других экосистем, снизить социальную тревогу в регионе производственного комплекса.

#### Список использованной литературы

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.belstat.gov.by>. – Дата доступа: 04.11.2023.
2. Левашова, А. К. Изучение вяжущих свойств продуктов дегидратации фосфогипса / А. К. Левашова, Л. И. Сычева // Успехи в химии и химической технологии. – 2015. – № 7 (166). – С. 47–49.
3. Современные направления переработки фосфогипса / В. В. Головнева [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – № 4 (227). – С. 65–67.
4. Перспективы применения фосфогипса, как химического мелиоранта, в земледелии Российской Федерации / Р. В. Некрасов [и др.] // МСХ. – 2019. – № 6. – С. 93–98.
5. Утилизация отходов Гомельского химического завода с получением товарной продукции/ А. Г. Губская [и др.] // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС ; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 89–107.
6. Гончаров, В. М. Проблемы и пути утилизации фосфогипса с разработкой эффективных технологий и новых стройматериалов с соответствующими потребительскими характеристиками / В. М. Гончаров, С. В. Скориков // Евразийский Союз Ученых. – 2014. – № 7(1). – С. 50–52.
7. Гордин, И. В. Некоммерческая рекультивация терриконов / И. В. Гордин, Ю. С. Новожилова // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2021. – № 3(1). – С. 144–147.

#### References

1. Nacional'nij statisticheskiy komitet Respubliki Belarus' [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.belstat.gov.by>. – Data dostupa: 04.11.2023.
2. Levashova, A. K. Izuchenie vyazhushchih svojstv produktov degidracii fosfogipsa / A. K. Levashova, L. I. Sycheva // Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii. – 2015. – № 7 (166). – S. 47–49.
3. Sovremennye napravleniya pererabotki fosfogipsa / V. V. Golovneva [i dr.] // Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii. – 2020. – № 4 (227). – S. 65–67.
4. Perspektivy primeneniya fosfogipsa, kak himicheskogo melioranta, v zemledelii Rossijskoj Federacii / R. V. Nekrasov [i dr.] // MSKH. – 2019. – № 6. – S. 93–98.
5. Utilizaciya othodov Gomeľ'skogo himicheskogo zavoda s polucheniem tovarnoj produkcii/ A. G. Gubskaya [i dr.] // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : sb. nauch. tr. / In-t BelNIIS ; redkol.: O. N. Leshkevich [i dr.]. – Minsk, 2019. – Vyp. 11. – S. 89–107.
6. Goncharov, V. M. Problemy i puti utilizacii fosfogipsa s razrabotkoj effektivnyh tekhnologij i novyh strojmaterialov s sootvetstvuyushchimi potrebitel'skimi harakteristikami / V. M. Goncharov, S. V. Skorikov // Evrazijskij Soyuz Uchenyh. – 2014. – № 7(1). – S. 50–52.
7. Gordin, I. V. Nekommercheskaya rekul'tivaciya terrikonov / I. V. Gordin, YU. S. Novozhilova // Ekonomika i biznes: teoriya i praktika. – 2021. – № 3(1). – S. 144–147.

Материал поступил 13.11.2023, одобрен 11.12.2023, принят к публикации 11.12.2023

## MODELLING OF THE VOXEL-BASED MICROSTRUCTURE OF THE CEMENT PASTE

V. V. Kravchenko

Ph.D in Engineering, Doctoral Student, Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: vkravchenko@g.bstu.by

### Abstract

Microstructural modelling of the cement paste is a hard task due to its extremely complex and heterogeneous structure. At the same time, accurate predicting of early age properties of the cement paste is directly dependent on how close the microstructural model is to the real structure.

There are two approaches in modelling microstructure development of the cement paste: vector and discrete, both generate a structure of the cement paste with randomly distributed phases. The voxel-based discrete approach is best suited for generating and processing random morphology of cement in the cement paste, in contrast to the vector approach limited by its regular geometric shape. A major challenge the voxel-based discrete approach faces is to reconstruct the real random distribution of cement in the fresh cement paste.

The paper presents a voxel-based microstructural model of the cement paste based on the Gaussian blur method to generate the initial spatial distribution of phases in it.

**Keywords:** cement paste, microstructural model, voxel, Gaussian blur, pore size distribution.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ НА ОСНОВЕ ВОКСЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ

В. В. Кравченко

### Реферат

Моделирование микроструктуры цементного камня является достаточно сложной задачей из-за его чрезвычайно сложной и неоднородной структуры. В то же время точность прогнозирования свойств цементного камня в раннем возрасте находится в прямой зависимости от того, насколько модель микроструктуры близка к реальной структуре.

Существует два подхода к моделированию развития микроструктуры цементного теста: векторный и дискретный, оба позволяют генерировать структуру цементного камня, в которой фазы распределены случайным образом. Дискретный подход на основе воксельной модели лучше всего подходит для генерации и обработки морфологии цемента случайной формы в структуре цементного камня, в отличие от векторного подхода, ограниченного правильной геометрической формой. Основная задача, решаемая в рамках дискретного воксельного подхода, заключается в воссоздании начального распределения фазы цемента в структуре цементного камня максимально приближенного к реальному распределению.

В статье представлена воксельная модель микроструктуры цементного камня, основанная на методе размытия по Гауссу для создания начального пространственного распределения фаз в его структуре.

**Ключевые слова:** цементный камень, микроструктурная модель, воксель, размытие по Гауссу, распределение пор по размерам.

### Introduction

The primary phase of cement-based composites is a cement paste, which is normally regarded as a matrix. It holds dispersed phases of aggregates and shares a load with them. Being a matrix, the cement paste has a significant impact on basic properties of cement-based composites. That is why, researching the microstructure of the cement paste is an important objective in concrete technology.

The cement paste is a porous solid with an extremely complex and heterogeneous structure formed during hydration process. It causes the fact, that microstructural modelling can be a hard task, depending on what properties of the cement paste need to be evaluated.

Accurate predicting of early age properties of the cement paste requires a microstructural model that is as close as possible to its real structure. To achieve this goal, two approaches are currently used:

1) A vector approach [1, 2] based on the random placement of cement particles in a representative volume. Typically, cement particles have a geometrically regular shape in the form of a sphere. The number of spheres and their radii are determined by the particle size distribution of cement. During hydration, the volume of each sphere decreases, while a layer of hydrates around it increases.

2) A discrete approach [3] based on splitting up of a representative volume into cubic cells with a certain edge length, called voxels. Each voxel represents a specific phase of the cement paste, for instance, at the initial time it can only be marked as water or cement. During hydration, a voxel either updates its phase state, and is marked as hydrated or remains the same.

Both of these approaches have the same feature. They are computationally complexity. This is a price to pay for getting closer to a real microstructure of the cement paste.

The discrete approach looks to be a more preferable due to easy spatial distribution of phases in an arbitrary shape and easy of computations. Basically, it suffers from two limitations:

1) The model resolution. Since, it is limited by the voxel size, some fine cement particles cannot be taken into consideration.

2) The initial spatial distribution of cement. It is extremely difficult to reconstruct the real random distribution of cement in the fresh cement paste.

The main complaint about the vector approach are as follows:

1) The regular (spherical) shape of cement particles.

2) Numerical techniques used to evaluate the pore size distribution are extremely computationally expensive. In consequence of this, even vector models use discrete techniques to approximate the pore size distribution [2].

3) Limited details of the microstructure. Normally, such a microstructure of the cement paste includes the only aggregated phases: unhydrated cement, hydration products, and pores.

The serious problem of the vector approach is the particle size distribution of cement, which is used to generate the initial structure of the cement paste. Commonly, the Rosin-Rammler distribution correlated with cement fineness is used. Since, the cement paste is made by mechanical mixing cement and water, one must wonder whether we consider that the particle size distribution of cement in the fresh cement paste is the same as before mixing.

The paper presents the microstructural model of the cement paste based on the voxel discrete approach. It is aimed at obtaining pore characteristics of the cement paste, which can be used in modelling the moisture transport in porous media. Meanwhile, the model has limitations and simplifications for reducing its computational complexity in numerical simulations, enabling to be incorporated into complex models to predict mechanical properties of concrete.

**Microstructural model***Model limitations and simplifications*

- 1) The microstructure of the cement paste consists of four aggregated phases: unhydrated cement, hydrated products, water, and void space occupied with air.
- 2) The voxels marked as unhydrated cement and hydrated products represent solid phase of the cement paste.
- 3) The interaction of adjacent voxels occurs along the normal direction.
- 4) Porosity is a space between solid phase i.e., occupied with voxels marked as water and air. This type of porosity is characterized mainly by capillary pores in which a concave meniscus occurs between water and solid.
- 5) Stoichiometry of hydration reactions is used to find the volume fractions of the cement paste phases during hydration.
- 6) The evolution of the microstructure is considered in sealed conditions i. e., without the loss of water to the environment.

*3D Microstructure generation*

The discrete model of the microstructure of the cement paste is a 3D array<sup>1</sup> consisting of a set of voxels, each of which represents one of the four phases at an arbitrary time step. By voxel in this context is meant a numeric value in the 3D array associated with a certain phase.

At the initial time ( $t=0$ ), only voxels representing unhydrated cement and water are randomly distributed in the 3D array. There are several ways to spatially distribute voxels in the 3D array: from the simplest random shuffle to complex reconstruction with the help of correlation functions that convert 2D microstructure images under an electron microscope to 3D. The last way is used in the well-known discrete model CEMHYD3D [3].

However, if there is no need to separate cement into clinkers phases, the Gaussian blur method can be directly applied to generate the initial distribution of cement and water in the cement paste. It is often applied to generate the porous media where parameters of the microstructure need to be controlled. The flowchart of a generation process using the Gaussian blur method is presented in Figure 1 [4].

The standard deviation of the Gaussian distribution normally controls the morphology of a solid in the porous media. In the case of the cement paste, the standard deviation can be correlated with the fineness of cement, which will ensure control of the size and number of cement particles in the generated array.

*Model resolution*

A discrete model of a random system has three sources of error: statistical fluctuation, finite size effect, and resolution [5]. Statistical fluctuation error occurs due to the modelled system is random, while finite size effect error occurs due to the model covers a very small part of the real object, which in the theory of composite materials is called a representative elementary volume (abbreviated REV).

Statistical fluctuation error is unavoidable, while finite size effect error directly depends on the REV size. In most of conducted researches, REV of the cement paste was generally considered no more  $100 \times 100 \times 100 \mu\text{m}$  in size.

The 3D image representing REV of the cement paste is dimensionless (independent of physical sizes of REV) and is characterized by a resolution expressed by the number of voxels it contains.

Resolution error occurs when the random system contains elements that are smaller than the voxel size. Finite size error and statistical fluctuation are not important for a cement hydration model with a resolution of  $1 \mu\text{m}^3/\text{voxel}$  and REV size of  $100 \times 100 \times 100 \mu\text{m}$ . A further increase in the REV size does not produce to significant accuracy in the hydration model prediction [5].

The following relationship can be given to determine the number of voxels ( $n_{\text{vox}}$ ), which helps to convert a dimensionless 3D image to real sizes of REV and vice versa:

$$n_{\text{vox}} = \frac{V_{\text{RVE}}}{r_{\text{es}}} \quad (1)$$

where  $V_{\text{RVE}}$  – is the physical volume of RVE,  $\mu\text{m}^3$ ;  
 $r_{\text{es}}$  – is the model resolution,  $\mu\text{m}^3/\text{voxel}$ .

Consequently, a 3D image should contain of 1000000 voxels for REV of  $100 \times 100 \times 100 \mu\text{m}$  in size with a resolution of  $1 \mu\text{m}^3/\text{voxel}$  to avoid expected errors.

The phase volume contained in each voxel is computed as  $\frac{1}{n_{\text{vox}}} \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^3$ .

*Mechanism of microstructure initialization and evolution*

The basic steps of microstructure modelling are listed below:

- 1) The number of voxels in REV ( $n_{\text{vox}}$ ) is computed. The parameters of  $V_{\text{RVE}}$  and  $r_{\text{es}}$  are adjusted to provide a cubic volume with a domain size of  $\sqrt[3]{n_{\text{vox}}}$  (in voxels).
- 2) The initial volume fraction of cement ( $V_{c,0}$ ) and water ( $V_{w,0}$ ) is computed by the following equation:

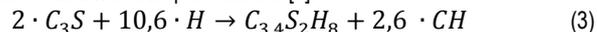
$$V_{c,0} + V_{w,0} = V_{c,0} \cdot \left(1 + \frac{\rho_c \cdot w/c}{\rho_w}\right) = 1 \quad (2)$$

where  $w/c$  – is the water to cement ratio;

$\rho_c$  and  $\rho_w$  – is the density of the cement and water, respectively,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

- 3) The initial microstructure of the cement paste is generated using the Gaussian blur method. The porosity threshold is taken equal to the value of  $V_{w,0}$ . The output is a binary 3D image represents each voxel by either a zero (for the water voxels) or one (for the cement voxels).

- 4) Since, the microstructural model processes the volume change of the phases, the hydration reactions are expressed in term of volumes per unit volume of the clinker phase rather than masses. For instance, the hydration reaction of  $\text{C}_3\text{S}$  presented in [7]:



can be rewritten in term of volumes as:

$$1 \cdot V_{\text{C}_3\text{S}} + 1,34 \cdot V_{\text{H}} \rightarrow 1,52 \cdot V_{\text{C}_{3,4}\text{S}_2\text{H}_8} + 0,61 \cdot V_{\text{CH}} \quad (4)$$

where  $V_{\text{C}_3\text{S}}$ ,  $V_{\text{H}}$ ,  $V_{\text{C}_{3,4}\text{S}_2\text{H}_8}$ , and  $V_{\text{CH}}$  – is the volume fraction of alite, water, CSH gel, and portlandite per unit volume of reacting  $\text{C}_3\text{S}$ , respectively.

- 5) The following algorithm of the microstructure evolution is applied at each time step ( $t$ ):

5.1) Based on stoichiometric calculations, the volume fractions of clinker minerals, hydration products, and water are determined.

5.2) The volume fractions of the aggregated phases of the cement paste are determined as:

$$\begin{aligned} V_c &= \sum_i V_{cl,i}; \\ V_{\text{hyd}} &= \sum_j V_{\text{hyd},j}; \\ V_{\text{air}} &= 1 - V_c - V_{\text{hyd}} - V_w \end{aligned} \quad (5)$$

where  $V_c$ ,  $V_{\text{hyd}}$ , and  $V_{\text{air}}$  – is the volume fraction of the unhydrated cement, hydration products, and air, respectively.

5.3) The number of consumed voxels of cement and water and newly formed voxels of hydrated products and air are computed.

5.4) At first, the voxels of cement adjacent to voxels of water are randomly selected. Voxels with the most neighbours have the highest selection priority i.e., voxels with six neighbours have the highest selection priority, while voxels with one have the lowest. Each selected voxel of cement is combined with a randomly selected adjacent voxel of water.

5.5) The phase state of each pair of voxels «cement-water» is updated to hydration products.

5.6) The number of voxels of water, hydration products, and air is balanced. This means that some voxels of water are additionally updated as hydration products and air to balance the phase volume. For clarification, we can transform the equation (4) into a simpler form:

$$1 \cdot V_c + 1,34 \cdot V_w = 2,13 \cdot V_{\text{hyd}} + 0,21 \cdot V_{\text{air}} \quad (6)$$

It follows that after step 5.5 it is still necessary to update  $(0,34 \cdot V_w)$  voxels of water to  $(0,13 \cdot V_{\text{hyd}})$  voxels of hydration products and  $(0,21 \cdot V_{\text{air}})$  voxels of air.

5.7) After, the step 5.4 cannot be completed (there are no longer cement voxels adjacent to water voxels), voxels of cement with at least one adjacent o voxels of hydration products are randomly selected. Each selected voxel of cement is combined with the nearest voxel of water found along the normal to a randomly selected adjacent voxel of hydration products.

<sup>1</sup> The term «image» is also often come across

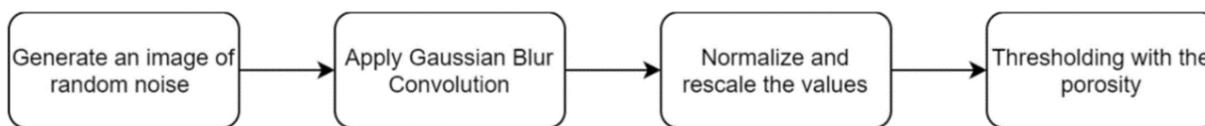


Figure 1 – Flowchart of porous media generation process

**Pore size distribution**

One of the obvious advantages of the discrete approach is a possibility to approximate the pore size distribution. Existing approximation ways are mainly based on the pixel-erosion method of a binary image.

However, they have two serious weaknesses:

- 1) The high computational complexity, superimposed on the inherent complexity of the discrete approach.
- 2) The resulting distribution is quite difficult to use in practice, since it is normally presented in the form of a histogram, which requires additional effort to fit a distribution function.

For this reason, the different approach is used here, including the following:

- 1) The distribution function is taken in advance.
- 2) The parameters of the distribution function are estimated based on the porosity data extracted from the microstructural model.

The unimodal Raleigh–Ritz distribution function is taken to provide the pore size distribution of the cement paste [6]:

$$\phi(r) = 1 - \exp(-B \cdot r) \tag{7}$$

where  $\phi(r)$  – is the porosity fraction up to pore radius  $r$ ;

$B$  – is the pore structure parameter corresponding the peak of porosity distribution on a logarithmic scale, 1/m.

The pore structure parameter can be approximately computed by two ways.

- 1) Assuming that representative pore radius ( $r_{peak}$ ) can be expressed as  $r_{peak} = \frac{2 \cdot V_{p,peak}}{S_p} = \frac{2 \cdot \phi(r_{peak}) \cdot V_p}{S_p}$ , which together with the expression (7) leads to the following relationship:

$$B = -\frac{S_p}{V_p} \cdot \frac{\ln(1 - \phi(r_{peak}))}{2 \cdot \phi(r_{peak})} \tag{8}$$

2) Using the relationship presented in [6], which has been obtained by fitting a large number of data-sets which relate  $B$  as a function of  $\frac{S_p}{V_p}$ :

$$B = \exp \left[ \left( \frac{\ln(\frac{S_p}{V_p} + a)}{b} \right)^c \right] \tag{9}$$

where  $V_{p,peak}$  – is the pore volume up to pore radius  $r_{peak}$ , m<sup>3</sup>;

$S_p$  – is the total pore surface, m<sup>2</sup>;

$V_p$  – is the total pore volume, m<sup>3</sup>;

$a$ ,  $b$ , and  $c$  – are the fitting constants.

Hence, in order to determine pore structure parameter  $B$ , it just needs values of  $S_p$  and  $V_p$  obtained from the microstructural model. Actually, these values are pretty easy to extract for any random structure using a voxel discrete model.

The value of  $V_p$  is a sum of the voxel volumes marked as water or porosity, while  $S_p$  is a sum of the voxel surfaces marked as water or porosity, and adjacent to the voxels marked as unhydrated cement or hydrated products.

**Modelling results**

The Portland cement paste with parameters reported in Table 1 was used for the simulation.

Table 1 – Parameters of the cement paste

Mix proportions, kg/m <sup>3</sup>		Water to cement ratio	Density of cement, kg/m <sup>3</sup>	Fineness of cement, m <sup>2</sup> /kg	Mineral composition of cement (mass %)
Portland Cement	Water				
370	185	0,5	3150	345	C <sub>3</sub> S: 54,5; C <sub>2</sub> S: 17,3; C <sub>3</sub> A: 8,9; C <sub>4</sub> AF: 7,6; Gypsum: 5

Sets of hydration reactions and phase characteristics of Portland cement contained in [7] were used to carry out the stoichiometry calculations.

The Parrot and Killoh model [8] was taken for evaluate hydration kinetics of Portland cement.

The actual temperature was assumed to be 20 °C.

The model resolution of 1 μm<sup>3</sup>/voxel was considered. A 3D image of 1000000 voxels requires significant computational resources to generate and process the microstructure. An edge size of REV was considered in the range of 30, 40 and 50 μm to reduce the computational cost.

The standard deviation of the Gaussian distribution ( $\sigma$ ) as a function of the blobiness was computed as follows:

$$\sigma(b) = \frac{\sqrt[3]{n_{vox}}}{40 \cdot b} \tag{10}$$

where  $b$  – is the blobiness.

The blobiness is the variable that controls the morphology of cement. By reducing its value, the standard deviation increases, and smaller blobs of cement are expected in the microstructure. The value of  $b = 1$  was used in the simulation.

The pore structure parameter was approximated by the relationship (8), where  $\phi(r_{peak}) = 0,5$ .

The modeling results are presented in Figures 2–7.

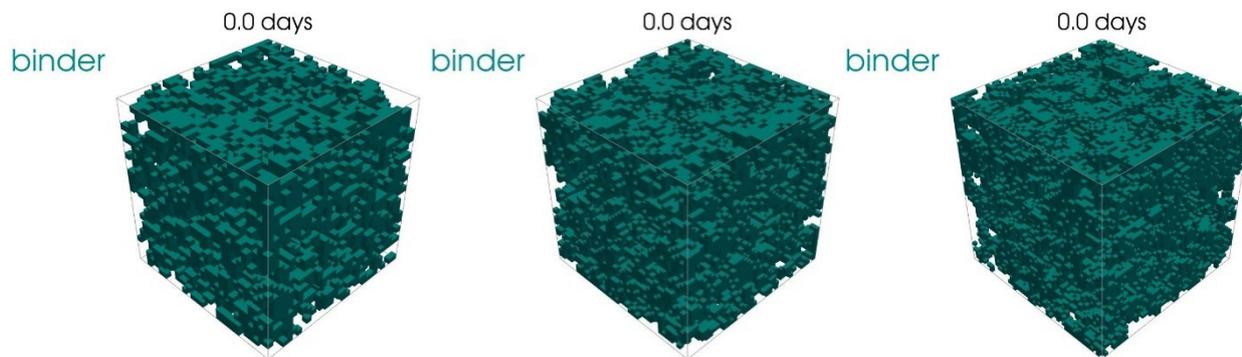


Figure 2 – The comparison of the initial spatial distribution of cement in the cement paste (Left: REV size of 30 μm; Middle: REV size of 40 μm; Right: REV size of 50 μm)

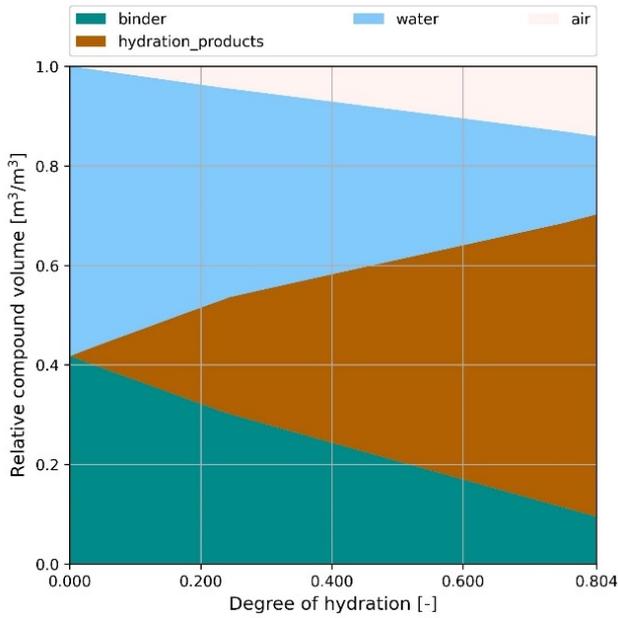


Figure 3 – The predicted volumetric composition of the cement paste over 100 days

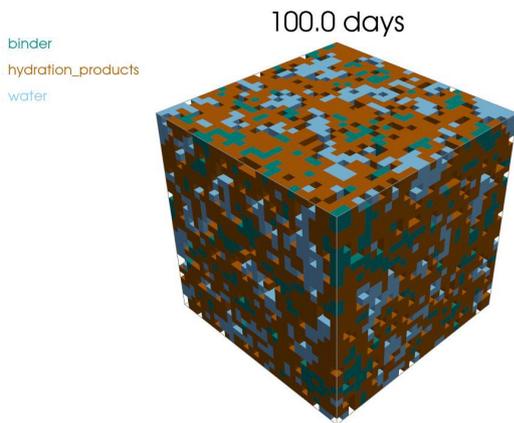


Figure 4 – The microstructure evolution of the cement paste with the REV size of 30 µm (Empty cells refer to air voxels)

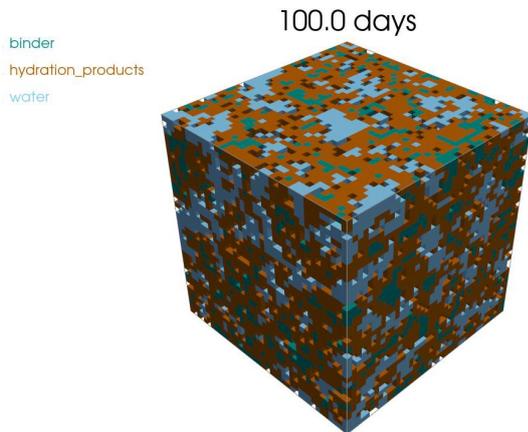


Figure 5 – The microstructure evolution of the cement paste with the REV size of 40 µm (Empty cells refer to air voxels)

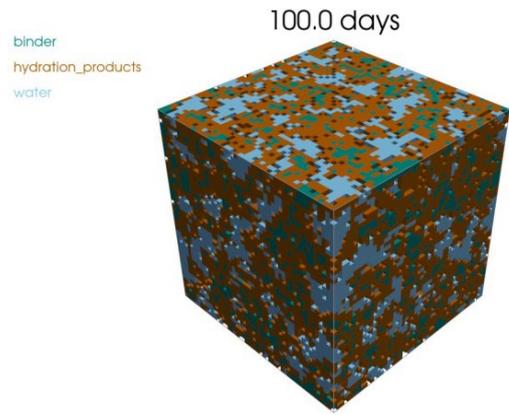


Figure 6 – The microstructure evolution of the cement paste with the REV size of 50 µm (Empty cells refer to air voxels)

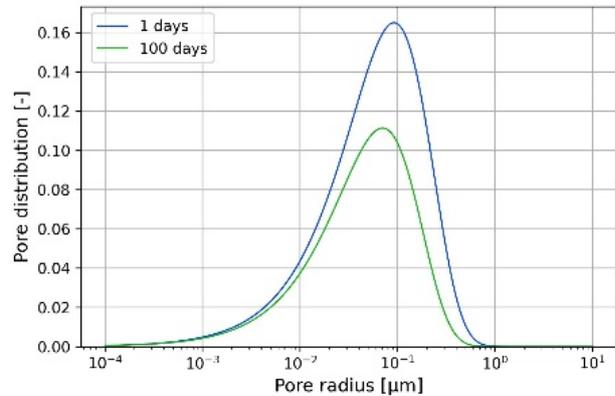
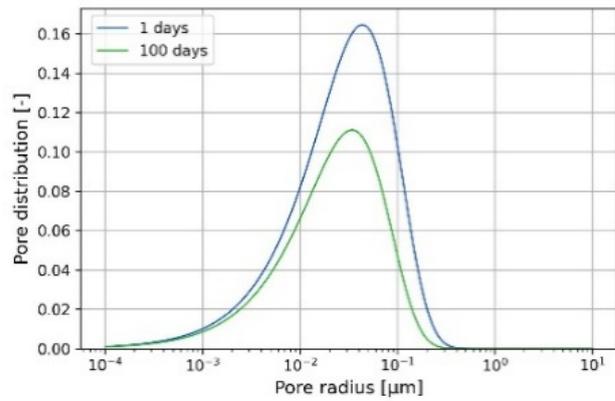
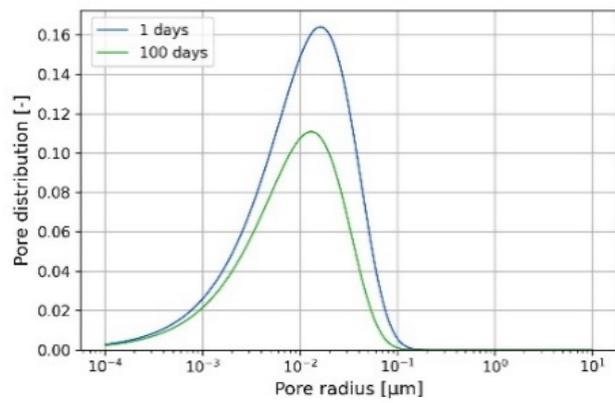


Figure 7 – The predicted size distribution of capillary pores of the cement paste (Left: REV size of 30 µm; Middle: REV size of 40 µm; Right: REV size of 50 µm)

### Conclusions

1. The presented discrete model of microstructure of the cement paste is computationally complex, but provides the evolution of random structures generated by the Gaussian blur method. Such structures are as close as possible to real structures, which in practice should lead to more accurate estimates of their parameters, for instance, porosity parameters.

2. The crucial parameter of the model is a resolution expressed by the number of voxels, which determines amount of computation and its accuracy.

3. To control the cement morphology in the generated structure depending on its fineness, it is necessary to pre-establish a relationship between the fineness of cement and the standard deviation of Gaussian distribution.

4. The presented approximation of the pore size distribution may appear simplistic, but its advantage is that the only two easily extracted porosity parameters are needed to produce acceptable results at a lower computational cost.

### References

1. Van Breugel, K. Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials / K. Van Breugel. – Second edition. – Delft: Delft University Press, 1996. – 295 p.
2. Shashank, B.  $\mu$ c: A new platform for modelling the hydration of cements / B. Shashank, K. L. Scrivener // Cement and Concrete Research. – 2009. – Vol 39, iss. 4. – P. 266–274.
3. CEMHYD3D: A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure Development Modelling Package: Version 3.0 : NIST Interagency Internal Report / National Institute of Standards and Technology ; ed. D. P. Bentz – Gaithersburg, 2005. – 227 p. – NISTIR 7232.
4. Joseph, Á. Evaluation of geometric tortuosity for 3D digitally generated porous media considering the pore size distribution and the A-star algorithm / Á. Joseph, J. Pagalo, M. Espinoza-Andaluz // Scientific Reports. – 2022. – Vol 12, article number 19463. – P. 1–22.
5. Garboczi, E. J. The effect of statistical fluctuation, finite size error, and digital resolution on the phase percolation and transport properties of the NIST cement hydration model / E. J. Garboczi, D. P. Bentz // Cement and Concrete Research. – 2001. – Vol 31, iss. 10. – P. 1501–1514.
6. Maekawa, K. Multi-scale Modelling of Structural Concrete / K. Maekawa, T. Ishida, T. Kishi. – New York: Taylor & Francis Group, 2009. – 655 P.
7. Tennis, P. D. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes / P. D. Tennis, H. M. Jennings // Cement and Concrete Research. – 2000. – Vol. 30, iss. 6. – P. 855–863.
8. Lothenbach, B. Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement / B. Lothenbach, T. Matschei, G. Möschner, F. P. Glasser // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38, iss. 1. – P. 1–18.

*Material received 30/11/2023, approved 24/01/2024, accepted for publication 24/01/2024*

## ПРОЧНОСТЬ НА РАСТЯЖЕНИЕ ПРИ ИЗГИБЕ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ИЗ ПОРИЗОВАННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ БЛОКОВ

В. Н. Деркач<sup>1</sup>, И. Е. Демчук<sup>2</sup>, П. И. Матяс<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Д. т. н., директор Филиала РУП «Институт БелНИИС» – Научно-технический центр, Брест, Беларусь, e-mail: v-derkach@yandex.ru

<sup>2</sup> К. т. н., заведующий лабораторией, Филиал РУП «Институт БелНИИС» – Научно-технический центр, Брест, Беларусь, e-mail: 7263712@mail.ru

<sup>3</sup> Ведущий инженер-конструктор, Филиал РУП «Институт БелНИИС» – Научно-технический центр, Брест, Беларусь, e-mail: matyas.ntc@gmail.com

### Реферат

В статье приведены результаты экспериментальных исследований прочности на растяжение при изгибе каменных кладок из поризованных керамических блоков с пазогребневым соединением вертикальных швов. Испытания каменных кладок на изгиб осуществлялись в соответствии со стандартом СТБ EN 1052-2. Исследовались образцы каменной кладки, вертикальные швы которой были выполнены без заполнения и с заполнением раствором. Выявлены механизмы разрушения каменной кладки при изгибе в плоскости параллельной и перпендикулярной горизонтальным раствором швам. Показано влияние пазогребневого стыкового соединения керамических блоков на прочность каменной кладки при изгибе по перевязанному сечению. Установлено, что при заполнении вертикальных швов каменной кладки клеевым раствором на минеральном вяжущем ее прочность на растяжении при изгибе возрастает.

**Ключевые слова:** каменная кладка, керамические поризованные блоки, прочность на растяжение при изгибе.

### TENSILE STRENGTH DURING BENDING OF MASONRY MADE OF POROUS CERAMIC BLOCKS

V. N. Derkach, I. E. Demchuk, P. I. Matyas

### Abstract

The article presents the results of experimental studies of the tensile strength during bending of masonry made of porous ceramic blocks with a tongue-and-groove joint of vertical seams. Bending tests of masonry were carried out in accordance with the standard STB EN 1052-2. Samples of masonry were studied, the vertical joints of which were made without filling and with mortar filling. The mechanisms of destruction of masonry during bending in a plane parallel and perpendicular to horizontal mortar joints are revealed. It is shown that the influence of the tongue-and-groove joint of ceramic blocks on the strength of masonry when bending along a bandaged section. It is established that when filling vertical joints of masonry with an adhesive solution on a mineral binder, its tensile strength during bending increases.

**Keywords:** masonry, ceramic porous blocks, tensile strength during bending.

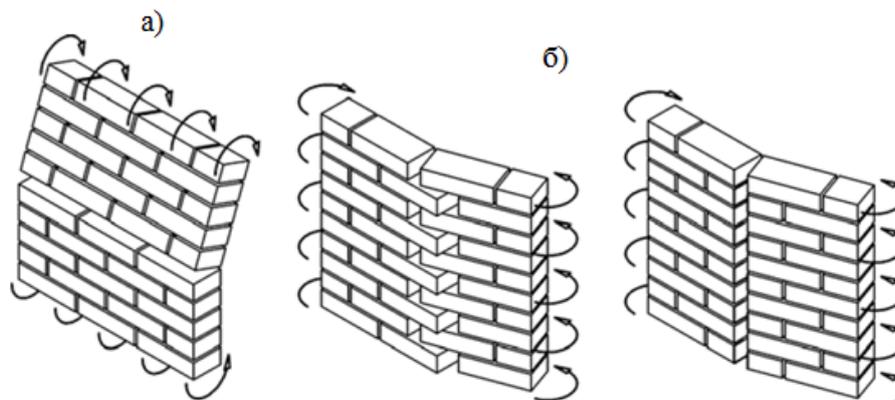
### Введение

Прочностью каменной кладки на растяжение при изгибе определяется сопротивление стенового ограждения изгибу при силовых воздействиях перпендикулярно плоскости стен. Работа каменной кладки на изгиб в плоскости перпендикулярной плоскости стен встречается во многих случаях, например:

- в наружных несущих и самонесущих стенах зданий при ветровых и особых воздействиях;
- во внутренних стенах при нагрузке от веса закрепленных на стенах тяжелых предметов, мебели. В СН 2.01.02 содержатся указания, согласно которым внутренние стены должны рассчитываться на

действие линейной равномерно распределенной переменной нагрузки, приложенной на высоте 1,2 м от уровня пола, характеристические значения которой зависят от категории использования помещений и могут достигать 5 кН/м [1].

Отдельно следует отметить поэтажно опертое стеновое ограждение многоэтажных каркасных зданий, которое подвергается значительным ветровым воздействиям [2, 3]. При этом в зависимости от способа закрепления стенового ограждения к конструкциям каркаса, сопротивление стены изгибу может определяться прочностью кладки на растяжение при изгибе как по перевязанному, так и по неперевязанному сечениям [4–6] (рисунок 1).



а) – по неперевязанному сечению; б) – по перевязанному сечению  
Рисунок 1 – Возможный характер разрушения каменной кладки при изгибе

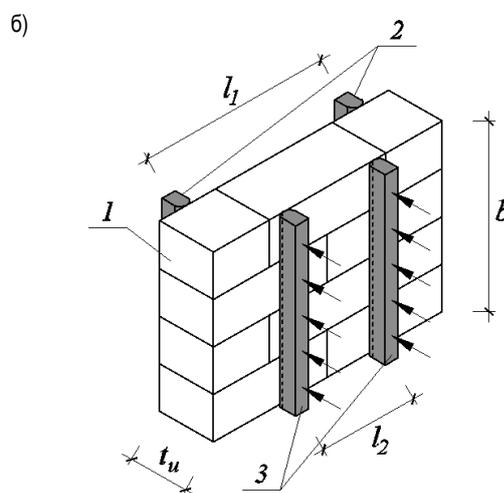
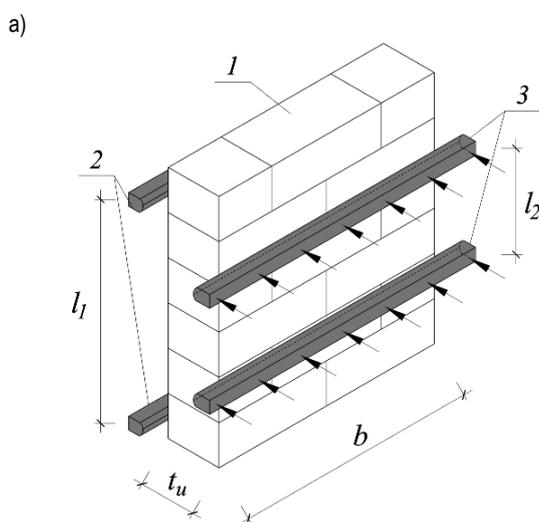
Поэтажно-оперные стены и перегородки часто возводятся с применением каменных кладок из поризованных пазогребневых керамических блоков шириной равной толщине стены. В то же время в технической литературе содержится ограниченная информация о прочности на растяжение при изгибе таких кладок, что создает определенные препятствия для более широкого их применения при проектировании стенового ограждения.

**Методика экспериментальных исследований**

С целью получения данных о прочности на растяжение при изгибе по перевязанному сечению  $f_{x2}$  были изготовлены и испытаны две серии опытных образцов каменной кладки из поризованных пустотелых пазогребневых керамических блоков размерами 250x250x138 мм на стандартных растворных швах. Каждая серия включала пять образцов каменной кладки. Образцы серии ИП-1 изготавливались со стыковым соединением керамических блоков «паз-гребень» без заполнения вертикальных швов раствором. В образцах серии ИП-2 стыковые соединения блоков были заполнены клеевым раствором для тонкослойных швов каменной кладки. Для определения прочности каменной кладки на растяжение при изгибе по неперевязанному сечению  $f_{x1}$  было изготовлено и испытано пять образцов каменной кладки из поризованных пазогребневых

блоков с незаполненными раствором вертикальными швами (серия ИН-1). Установленное в соответствии с СТБ EN 772-1 нормализованное значение прочности на сжатие керамических блоков, составило 13,0 МПа, а среднее значение прочности на сжатие затвердевшего кладочного раствора согласно СТБ EN 1015-11 – 15,3 МПа. После изготовления к каждому испытываемому образцу прикладывали предварительную вертикальную равномерно распределенную сжимающую нагрузку таким образом, чтобы сжимающие напряжения в сечении образца составляли около  $2,5 \cdot 10^{-3}$  МПа. В нагруженном состоянии укрытые полиэтиленовой пленкой образцы хранились до испытания в течении 28 суток при температуре +15...20 °С и влажности воздуха 60...70 %.

Прочность каменной кладки на растяжение при изгибе определялась в соответствие со стандартом СТБ EN 1052-2. Испытание опытных образцов производили в горизонтальном положении. Нагрузку прикладывали при помощи установки, оборудованной гидравлическим домкратом грузоподъемностью 50 кН и насосной станцией, оснащенной поверенными силоизмерительными приборами, позволяющими контролировать скорость и усилие при нагружении. Схема испытаний и общий вид опытных образцов каменной кладки показаны на рисунке 2.



а) – определение значения  $f_{x1}$ ; б) – определение значения  $f_{x2}$   
**Рисунок 2** – Схема испытаний и общий вид опытного образца каменной кладки

Прочность на растяжение при изгибе каждого образца, установленного в горизонтальное положение, рассчитывали с точностью до 0,01 МПа по формуле (1):

$$f_{xi} = \frac{3 \cdot F_{i,max} \cdot (l_1 - l_2)}{2 \cdot b \cdot t_u^2} + \frac{3 \cdot m_i}{b \cdot t_u^2} \cdot \left( x_i - \frac{(l_3 + x_i)^2}{l_s} \right), \quad (1)$$

где  $F_{i,max}$  – максимальная нагрузка, воспринимаемая отдельным образцом каменной кладки;  
 $l_1$  – расстояние между осями наружных опор;

$l_2$  – расстояние между осями внутренних опор;  
 $b$  – высота или ширина испытываемого образца каменной кладки, измеренная перпендикулярно направлению действующих напряжений;  
 $t_u$  – ширина изделия для каменной кладки;  
 $m_i$  – вес образца;  
 $x_i$  – расстояние между образовавшейся в результате испытаний трещиной в образце и ближайшей из наружных опор;  
 $l_3$  – длина образца за пределами внутренних опор [ $1/2 (l_s - l_1)$ ];  
 $l_s$  – длина образца каменной кладки в направлении пролета.

Характеристическое значение прочности на растяжение при изгибе для пяти образцов рассчитывали с точностью до 0,01 МПа по формуле (2):

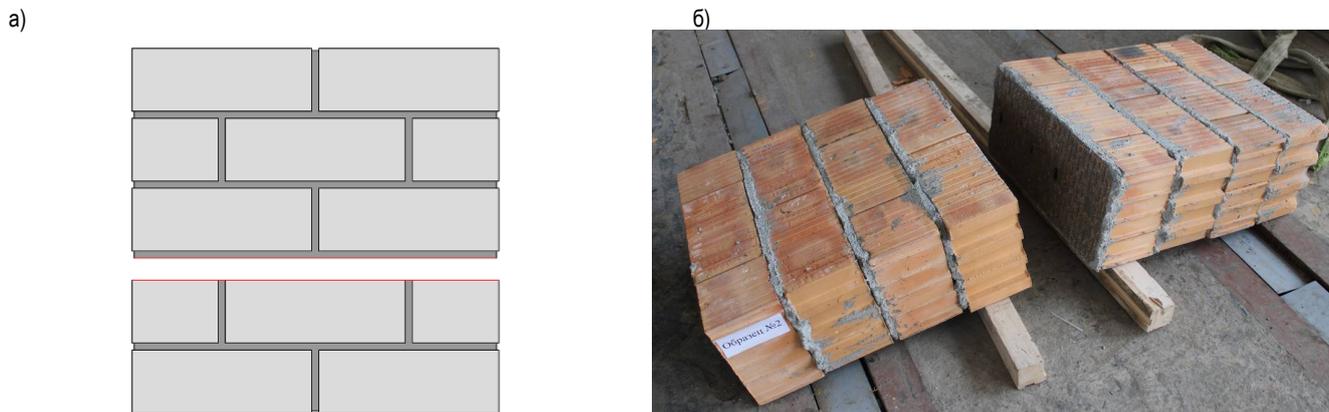
$$f_{xk} = \frac{f_{mean}}{1,5}, \quad (2)$$

где  $f_{mean}$  – среднее арифметическое значение прочности на растяжение при изгибе.

### Результаты и обсуждение

При изгибе кладки параллельно плоскости горизонтальных швов разрушение всех образцов произошло в результате нарушения сцепления в соединении между керамическими блоками и кладочным раствором с разрывом или выдергиванием раствора, заполнившего пустоты кладочных изделий без разрушения материала блоков. Характер разрушения опытных образцов серии ИН-1 показан на рисунке 3.

Результаты определения прочности на растяжение при изгибе по неперевязанному сечению образцов каменной кладки серии ИН-1 приведены в таблице 1.



а) – схема разрушения; б) – общий вид образца каменной кладки  
**Рисунок 3** – Характер разрушения опытных образцов серии ИН-1

**Таблица 1** – Результаты испытаний образцов каменной кладки серии ИН-1

№ серии	№ образца	Геометрические параметры							<i>m</i> (кг)	Разрушающая нагрузка $F_{i,max}$ (Н)	Прочность на растяжение при изгибе $f_{xk1}$ (МПа)
		<i>b</i> (мм)	$t_u$ (мм)	$l_s$ (мм)	$l_1$ (мм)	$l_2$ (мм)	$l_3$ (мм)	<i>x</i> (мм)			
ИН-1	ИН-1-1	503	245	1214	1096	456	59	380	178.7	15740	0.54
	ИН-1-2	500	247	1200	1073	455	63.5	526.5	182.3	23970	0.77
	ИН-1-3	502	249	1225	1072	443	76.5	362.5	180.1	20330	0.65
	ИН-1-4	498	248	1220	1080	460	70	369	179.7	21690	0.70
	ИН-1-5	502	248	1223	1078	456	72.5	366.5	173.9	20320	0.65
<b>Среднее значение</b>										20410	<b>0.66</b>
Среднеквадратичное отклонение										3006	0.084
Коэффициент вариации %										14.7	12.7

По результатам испытаний среднее значение прочности на растяжение при изгибе по неперевязанному сечению  $f_{x1,mean}$  составило 0,66 МПа, а характеристическое значение  $f_{xk1}$  – 0,44 МПа. Следует отметить, что прочность на растяжение при изгибе по неперевязанному сечению образцов из поризованных блоков оказалась в 1,4 раза выше, чем образцов, изготовленных из полнотелого керамического кирпича на стандартном кладочном растворе той же прочности, что и раствора образцов серии ИН-1. Данный факт можно объяснить более высокой прочностью сцепления раствора с поризованной керамикой, а также работой на растяжение кладочного раствора, заполнившего пустоты поризованных блоков. Известно, что прочность каменной кладки на растяжение при изгибе по неперевязанному сечению определяется прочностью на растяжение кладочного изделия или прочностью сцепления кладочного раствора. Характер разрушения кладки из керамических поризованных блоков в сочетании с раствором высокой прочности позволяет сделать вывод о том, что прочность на растяжение при изгибе по неперевязанному сечению каменных кладок из поризованных керамических всегда будет определяться прочностью на растяжение и прочностью сцепления горизонтальных растворных швов.

При изгибе каменной кладки перпендикулярно плоскости горизонтальных швов разрушение образцов серии ИП-1 имело следующий характер:

– три образца (ИП-1-1, ИП-1-2, ИП-1-1-3) разрушились по вертикальному сечению в результате раскрытия двух пазогребневых швов и одновременного разрушения среднего керамического блока. При этом в пазогребневых соединениях наблюдался скол керамических гребней (рисунок 4а);

– образец ИП-1-5 разрушился по вертикальному сечению, проходящему по двум керамическим блокам и пазогребневому шву (рисунок 4б);

– образец ИП-1-4 разрушился по ступенчатой траектории, проходящей по пазогребневому шву и двум керамическим блокам (рисунок 4в).

Среднее значение прочности на растяжение при изгибе по перевязанному сечению  $f_{x2,mean}$  составило 0,27 МПа, а характеристическое значение  $f_{xk2}$  – 0,18 МПа.

Результаты определения прочности на растяжение при изгибе по перевязанному сечению образцов каменной кладки из поризованных керамических блоков с незаполненными раствором вертикальными швами (серия ИП-1) приведены в таблице 2.



а) – образцы ИП-1-1 – ИП-1-3; б) – образец ИП-1-5; в) – образец ИП-1-4  
**Рисунок 4** – Характер разрушения опытных образцов серии ИП-1

**Таблица 2** – Результаты испытаний образцов каменной кладки серии ИП-1

№ серии	№ образца	Геометрические параметры							<i>m</i> (кг)	Разрушающая нагрузка $F_{i,max}$ (Н)	Прочность на растяжение при изгибе $f_{x2i}$ (МПа)
		<i>b</i> (мм)	$t_u$ (мм)	$l_s$ (мм)	$l_1$ (мм)	$l_2$ (мм)	$l_3$ (мм)	<i>x</i> (мм)			
ИП-1	ИП-1-1	437	243	1004	942	400	31	471	125.5	7360	0.26
	ИП-1-2	443	249	1012	952	418	30	476	129.3	9790	0.32
	ИП-1-3	450	247	1008	941	406	33.5	470.5	130.2	8480	0.28
	ИП-1-4	448	245	1010	940	398	35	470	125.0	7880	0.27
	ИП-1-5	452	248	1010	957	410	26.5	353.5	127.2	7160	0.24
<b>Среднее значение</b>										8134	<b>0.27</b>
Среднеквадратичное отклонение										1058	0.028
Кoeffициент вариации %										13.0	10.3

При заполнении вертикальных швов каменной кладки клеевым тонкослойным раствором характер разрушения опытных образцов кладки менялся. Разрушение всех образцов серии ИП-2 происходило по материалу блоков без раскрытия пазогребневого стыкового соединения (рисунок 5).

Среднее значение прочности кладки на растяжение при изгибе образцов серии ИП-2  $f_{x2,mean} = 0,33$  МПа, а характеристическое значение  $f_{xk2} = 0,22$  МПа, что примерно на 20 % выше, чем образцов серии ИП-1 (таблица 3).



Рисунок 5 – Характер разрушения опытных образцов серии ИП-2

Таблица 2 – Результаты испытаний образцов каменной кладки серии ИП-2

№ серии	№ образца	Геометрические параметры							$m$ (кг)	Разрушающая нагрузка $F_{i,max}$ (Н)	Прочность на растяжение при изгибе $f_{x2}$ (МПа)
		$b$ (мм)	$t_u$ (мм)	$l_s$ (мм)	$l_1$ (мм)	$l_2$ (мм)	$l_3$ (мм)	$x$ (мм)			
ИП-2	ИП-2-1	444	245	1033	950	410	41.5	412.5	139.5	12260	0.41
	ИП-2-2	456	246	1046	961	408	42.5	418	141.3	10500	0.35
	ИП-2-3	456	248	1026	954	406	36	427	143.2	8340	0.28
	ИП-2-4	448	245	1037	950	410	43.5	412.5	138.6	9330	0.31
	ИП-2-5	450	245	1049	958	406	45.5	379	140.0	8670	0.30
<b>Среднее значение</b>										9820	<b>0.33</b>
Среднеквадратичное отклонение										1594	0.050
Кoeffициент вариации %										16.2	15.3

При испытании образцов серий ИП-1 и ИП-2 прочность каменной кладки на растяжение при изгибе определялась прочностью на изгиб керамических блоков. При этом разрушение большинства образцов серии ИП-1 происходило по материалу одного среднего блока, а образцов серии ИП-2 по материалу трех блоков.

Если предположить, что при незаполненных растворных швах стыковое соединение блоков не участвует в работе каменной кладки на изгиб, то прочность  $f_{x2}$  образцов серии ИП-1 должна быть в три раза ниже, чем образцов серии ИП-2, что не соответствует результатам экспериментальных исследований. Очевидно, что увеличение экспериментальных значений  $f_{x2}$  по отношению к теоретическим значениям вызвано тем, что при изгибе каменной кладки профилированное стыковое соединение блоков, в отличие от незаполненного раствором плоского соединения, включается в работу на изгиб, увеличивая тем самым прочность кладки на растяжение при изгибе по перевязанному сечению.

### Заключение

На основании изложенного можно сделать следующее заключение:

1. Прочность на растяжение при изгибе по перевязанному сечению  $f_{x1}$  каменных кладок из поризованных керамических блоков определяется прочностью на растяжение горизонтальных растворных швов кладки, а также прочностью их сцепления с кладочными изделиями.

2. Прочность на растяжение при изгибе по перевязанному сечению каменной кладки из поризованных керамических блоков выше, чем кладки из полнотелого керамического кирпича. Данный факт можно объяснить более высокой прочностью сцепления растворных швов с поризованной керамикой, а также работой на растяжение растворных шпонок, заполняющих пустоты поризованных блоков.

3. Заполнение клеевым раствором вертикальных пазогребневых швов каменной кладки меняет характер ее разрушения при изгибе и приводит к росту прочности кладки на растяжение при изгибе по перевязанному сечению  $f_{x2}$ . По результатам экспериментальных исследований разница между значениями  $f_{x2}$  в случае заполненных и незаполненных раствором вертикальных швов кладки составила 20 %.

### Список цитированных источников

1. Деркач, В. Н. Особенности расчета каменного заполнения каркасных зданий / В. Н. Деркач // Архитектура и строительство. – № 4. – 2015. – С. 50–53.

2. Ищук, М. К. Отечественный опыт возведения зданий с наружными стенами из облегченной кладки / М. К. Ищук. – М. : РИФ «Стройматериалы», 2009. – 360 с.
3. Деркач, В. Н. Сопротивление ветровым воздействиям поэтажно опертых многослойных стен с облицовочным слоем / В. Н. Деркач // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 8. – С. 38–43.
4. Biegezugfestigkeit von Mauerwerk / U. Schmidt [et al.] // Mauerwerk. – 2015. – № 19. – S. 27–39.
5. Drobic, L. Mury poddane zginaniu w ujęciu normy PN-EN 1996-1-1:2006 / Ł. Drobic, R. Jasiński, A. Piekarczyk // Materiały budowlane. – № 440. – 2009. – S. 1–5.
6. Семенов, С. А. Теория расчета каменной кладки на изгиб при работе по перевязанным сечениям / С. А. Семенов // Исследования по каменным конструкциям : сб. науч. ст. / ЦНИПС ; под науч. ред. Л. И. Онищика. – М., 1949. – С. 105–125.

### References

1. Derkach, V. N. Osobennosti rascheta kamennogo zapolneniya karkasnyh zdaniy / V. N. Derkach // Arhitektura i stroitel'stvo. – № 4. – 2015. – S. 50–53.
2. Ishchuk, M. K. Otechestvennyy opyt vozvedeniya zdaniy s naruzhnyimi stenami iz oblegchennoj kladki / M. K. Ishchuk. – M. : RIF «Stroymaterialy», 2009. – 360 s.
3. Derkach, V. N. Soprotivlenie vetrovym vozdeystviyam poetazhno opertyh mnogoslojnyh sten s oblicovochnym sloem / V. N. Derkach // Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. – 2015. – № 8. – S. 38–43.
4. Biegezugfestigkeit von Mauerwerk / U. Schmidt [et al.] // Mauerwerk. – 2015. – № 19. – S. 27–39.
5. Drobic, L. Mury poddane zginaniu w ujęciu normy PN-EN 1996-1-1:2006 / Ł. Drobic, R. Jasiński, A. Piekarczyk // Materiały budowlane. – № 440. – 2009. – S. 1–5.
6. Semencov, S. A. Teoriya rascheta kamennoj kladki na izgib pri rabote po neperevyazannym secheniyam / S. A. Semencov // Issledovaniya po kamennym konstrukciyam : sb. nauch. st. / CNIPS ; pod nauch. red. L. I. Onishchika. – M., 1949. – S. 105–125.

Материал поступил 15.01.2024, одобрен 12.02.2024, принят к публикации 12.02.2024

## ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В ЯЧЕИСТОБЕТОННОМ СТЕНОВОМ ОГРАЖДЕНИИ ЗДАНИЯ С МОНОЛИТНЫМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ КАРКАСОМ

П. А. Новик

Магистр технических наук, аспирант кафедры строительных конструкций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: novik.ntc@gmail.com

### Реферат

В статье приведены результаты анализа причин образования трещин в наружных и внутренних стенах и перегородках из ячеистобетонных блоков многоэтажного жилого дома с монолитным железобетонным каркасом. Причины образования трещин устанавливались на основании мониторинга за их раскрытием и испытаний нагружением участка перекрытия, на которые опирались поврежденные трещинами стены и перегородки. Показан характер изменения ширины раскрытия трещин в каменной кладке, в зависимости от прогиба перекрытия. Экспериментально доказано, что основной причиной образования трещин в стеновом ограждении являются касательные и растягивающие напряжения в каменной кладке, обусловленные прогибами опорного перекрытия. На трещиностойкость стен и перегородок существенное влияние оказывает качество выполнения строительно-монтажных работ.

**Ключевые слова:** каркасные здания, каменная кладка, трещины, ячеистобетонные блоки, прогибы перекрытий.

### REASONS FOR THE FORMATION OF CRACKS IN THE CELLULAR CONCRETE WALLS OF A BUILDING WITH A MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE FRAME

P. A. Novik

### Abstract

The article presents the results of an analysis of the reasons for the formation of cracks in external and internal walls and partitions made of cellular concrete blocks of a multi-storey residential building with a monolithic reinforced concrete frame. The reasons for the formation of cracks were established on the basis of monitoring their opening and testing by loading of the section of the floor on which the walls and partitions damaged by cracks rested. The nature of the change in the opening width of cracks in masonry depending on the deflection of the floor is shown. It has been experimentally proven that the main reason for the formation of cracks in walls is tangential and tensile stresses in masonry caused by deflections of the supporting floor. The crack resistance of walls and partitions is significantly influenced by the quality of construction-and-assembling operations.

**Keywords:** frame buildings, masonry, cracks, cellular concrete blocks, floor deflections.

### Введение

При строительстве каркасных многоэтажных зданий в качестве поэтажно опертых наружных ограждающих конструкций, а также внутренних стен и перегородок в основном используют каменную кладку из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения. При проектировании поэтажно опертые стены обычно рассматриваются как самонесущие, воспринимающие нагрузку от собственного веса, ветровых и температурных воздействий. При этом игнорируется совместная работа каменной кладки с каркасом здания, которая может иметь место при прогибе перекрытий или сдвиговых деформациях каркаса в плоскости стен [1–3]. Предполагается, что такой подход к проектированию каркасных зданий обеспечивает их более высокую надежность, по сравнению с расчетной. Однако практика опровергает данные предположения. Каменное заполнение, при проектировании которого не в полной мере учтены факторы, влияющие на его напряженно-деформированное состояние, часто оказывается перегруженным, что приводит к образованию трещин в стенах здания. Образование трещин в стеновом ограждении нормативными документами трактуется как нарушение предельного состояния эксплуатационной пригодности. Трещины ухудшают эстетический вид стен и снижают их звукоизоляционные и теплотехнические характеристики, а также огнестойкость и долговечность [4–7].

Ошибки при оценке причин и механизмов образования трещин в стеновом ограждении приводят к неоправданным и дорогостоящим затратам на ремонт и усиление конструкций, а иногда к частичной или полной приостановке эксплуатации здания. Проведение ремонтно-восстановительных работ по восстановлению надлежащих эксплуатационных качеств здания требует значительных материальных и финансовых затрат. Это зачастую является причиной возникновения спорных ситуаций и судебных разбирательств между субъектами строительной деятельности.

Изучение морфологии трещин и характера их развития во времени позволяют установить причины повреждений, назначить эффективные и экономичные методы ремонта и усиления конструкций, а если выявленные повреждения являются системными, внести коррективы в проектную и нормативно-техническую документацию.

В настоящей статье приведен анализ характерных повреждений трещинами стенового ограждения из ячеистобетонных блоков на основании собственного опыта обследования и натурных испытаний конструкций многоэтажного жилого дома с монолитным железобетонным каркасом.

### Краткая характеристика здания

Здание запроектировано в монолитном железобетонном каркасе восемнадцатиэтажным, трехсекционным с техподпольем и техническим чердаком (рисунок 1).



Рисунок 1 – Общий вид здания

В здании применен рамно-связевой каркас с колоннами квадратного сечения размерами 400x400 мм, установленными с переменным шагом, максимальное расстояние между осями колонн – 6,3 м и стенами-диафрагмами жесткости толщиной 200 мм. Перекрытия монолитные железобетонные толщиной 200 мм. Наружные стены запроектированы из блоков ячеистобетонных автоклавного твердения толщиной 400 мм на клеевом растворе с наружным утеплением минераловатными плитами по методике «Cerazit». Внутренние стены и часть перегородок запроектированы из ячеистобетонных блоков, во влажных помещениях из кирпича керамического полнотелого.

Наружные стены опираются на диски перекрытия с консольным свесом 100 мм и крепятся к колоннам каркаса с помощью металлических связевых элементов, установленных по высоте с шагом 600 мм. Крепление стен к верхнему и нижнему перекрытию не производится. Перегородки крепятся к перекрытию через 1,5 м по длине. По вертикали предусмотрено крепление перегородок в двух уровнях на расстоянии 0,6 м (для кирпича) и 0,5 м (для ячеистобетонных блоков) от пола и потолка.

Между верхним диском перекрытия и стеной, согласно проектной документации, предусмотрен горизонтальный деформационный шов толщиной 30 мм, законопаченный паклей, смоченной гипсовым раствором, который с внутренней стороны должен заделываться гермитовым жгутом диаметром 35 мм с напылением полиуретана.

На момент разработки проектной документации требования к проектированию поэтажно опертых ненесущих стен жилых и общественных зданий регламентировались серией Б 2.030-13.10 [8] и рекомендациями Р 5.02.088.11 [9], в соответствии с которыми предельно допустимые значения прогибов перекрытий назначались в соответствие со СНиП 2.01.07-85. Необходимо отметить, что предельные прогибы перекрытий, на которые опираются каменные стены, принятые согласно СНиП 2.01.07-85 (1/150-1/200 пролета плиты), в 2–3 раза превышают предельные значения прогибов перекрытий, установленных в действующих в настоящее время строительных нормах СН 2.01.01-2022 (1/500 пролета плиты). Поэтому соблюдение требований СНиП 2.01.07-85 в части предельных значений прогибов перекрытий не гарантирует исключение повреждений стен трещинами.

### Результаты обследования

Через три года после ввода здания в эксплуатацию в наружных стенах здания и перегородках были выявлены вертикальные и наклонные трещины. Максимальная ширина раскрытия трещин, 15 мм, зафиксирована в верхней зоне стен и перегородок, установленных вдоль вылета консольного участка монолитной плиты, длина которого составляет 2 м. Трещины являлись сквозными, что привело к интенсивной инфильтрации потока воздуха через наружные стены. По этой причине температура в квартирах в холодное время года не превышала 15–17 °С. Вследствие деформаций каменной кладки имели место перекосы оконных и дверных проемов. Следует отметить, что аналогичные повреждения стенового ограждения возникли в нескольких зданиях, возведенных по одинаковому проекту, что говорит о системном их характере.

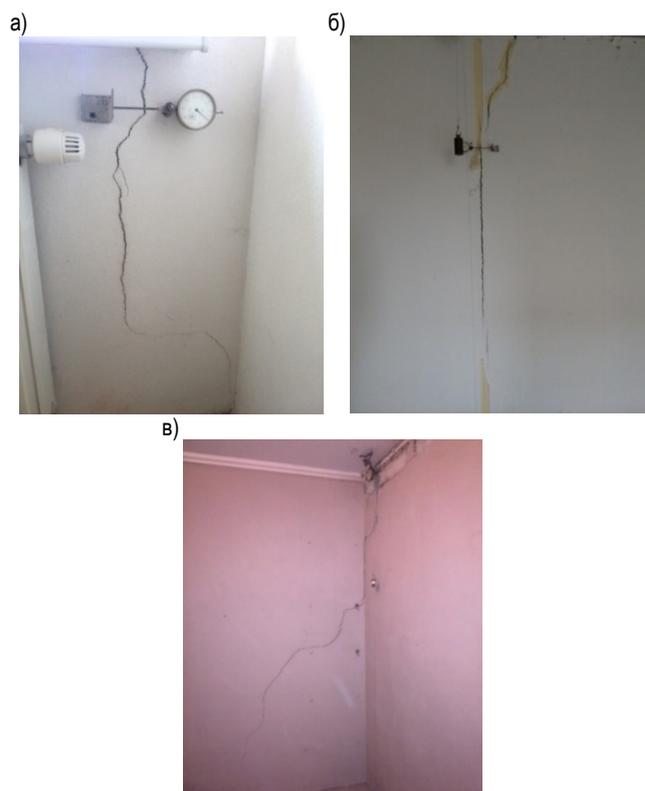
Характерные трещины, образовавшиеся в стеновом ограждении, приведены на рисунке 2.

Ввиду жалоб со стороны жильцов квартиры на рост трещин, в течение шести месяцев велся мониторинг за шириной раскрытия существующих трещин и образованием новых трещин в стенах и перегородках.

Ширина раскрытия трещин в ходе мониторинга измерялась при помощи микроскопа МПБ-2-0.05 и индикаторами часового типа с точностью измерения 0,01 мм.

Результаты мониторинга за шириной раскрытия трещин приведены на диаграмме (рисунок 3).

Максимальная природная ширины раскрытия трещин за период наблюдения составил 1,03 мм, при этом средняя скорость раскрытия трещин (за период наблюдения) 0,2 мм/мес имела место в наружной стене, установленной на консольном выступе плиты перекрытия. Во внутренних стенах ширина раскрытия трещин практически не изменялась. Образование новых трещин в стенах и перегородках в период мониторинга не зафиксировано. Вероятной причиной роста ширины раскрытия трещин в наружной стене являлось изменение температуры и влажности наружного воздуха в период проведения измерений, который составлял 160 суток и охватывал теплое и холодное время года.



а) – в наружной стене в зоне оконного проема; б) – в межкомнатной перегородке; в) – в зоне сопряжения стен  
Рисунок 2 – Характерные трещины в стеновом ограждении

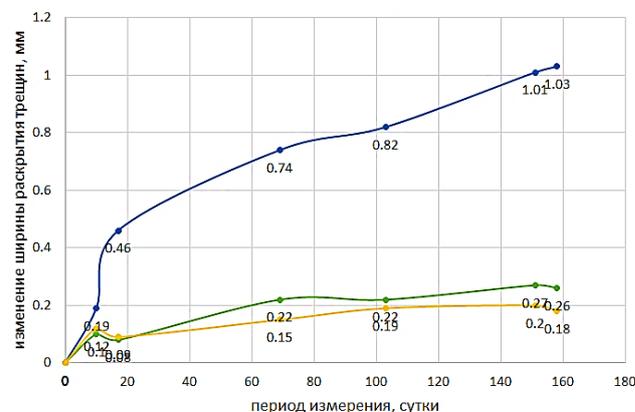
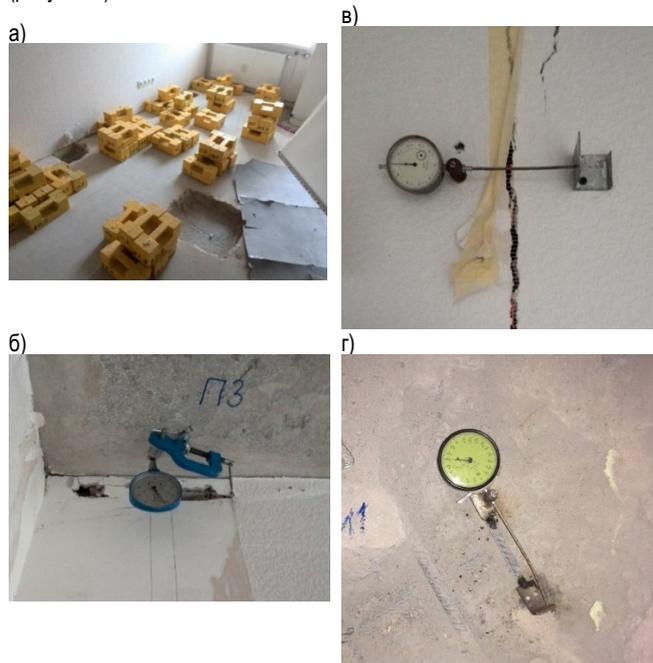


Рисунок 3 – График изменения ширины раскрытия трещин в стенах здания

Обследованием конструкций установлено, что консольный участок монолитной плиты перекрытия расположен под углом к основной плите. Принятое армирование для консоли не является рациональным (армирование консоли повторяет направление армирование основной плиты перекрытия, т. е. располагается под углом к оптимальному рабочему направлению). Вследствие этого армирование угловых участков не задействовано в работе должным образом, что способствует излишней деформативности консоли. Вследствие увеличения на 30 мм толщины цементно-песчаной стяжки в сравнении с толщиной, которая принята в проекте, расчетная постоянная нагрузка от веса пола увеличилась на 40 %. Не соблюдено проектное положение рабочей арматуры консоли плиты по высоте ее сечения. Толщина защитного слоя рабочей арматуры консоли составляет 45–70 мм, проектная толщина защитного слоя – 25 мм, что привело к уменьшению рабочей высоты сечения плиты по отношению к проектному значению в 1,2 раза и соответственно к снижению изгибной жесткости консоли плиты по сравнению с проектной в 1,8 раза.

**Результаты натурных испытаний**

С целью оценки влияния прогиба перекрытия на трещиностойкость каменных стен было выполнено нагружение консольного участка плиты равномерно-распределенной по площади нагрузкой (рисунок 4).



- а) – нагружение плиты перекрытия штучными грузами;
- б) – измерение прогибов перекрытия;
- в) – измерение ширины раскрытия трещин в стенах;
- г) – измерение относительных деформаций арматуры

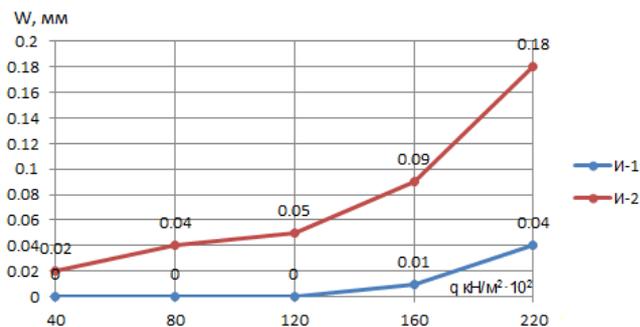
**Рисунок 4** – Измерение приращений ширины раскрытия трещин в стенах и деформаций перекрытия

Максимальная величина испытательной нагрузки принималась равной расчетному значению проектной функциональной нагрузки на перекрытие. Нагружение перекрытия осуществлялось ступенями равными 20 % от максимального значения испытательной нагрузки с помощью тарированных грузов массой 20 кг. Снятие показаний измерительных приборов осуществлялась на каждом этапе нагружения после приложения нагрузки и после выдержки конструкции под нагрузкой в течении 20–25 минут. После достижения максимальной испытательной нагрузки конструкция оставалась нагруженной в течении 10 суток, при этом отсчеты по приборам снимались через каждые 2 суток.

В ходе испытаний измерялись:

- приращение прогибов консольного участка плиты перекрытия при помощи прогибомеров с ценой деления 0,01 мм;
- приращение ширины раскрытия трещин в стенах и перегородках с помощью индикаторов перемещений с ценой деления 0,01 мм;
- приращение относительных деформаций рабочей арматуры консольного участка плиты в зоне действия максимальных изгибающих моментов с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм, установленных на базе 100 мм.

При достижении испытательной нагрузкой значения, равного 2,2 кН/м<sup>2</sup>, прогиб перекрытия увеличился на 0,16 мм. При выдержке под нагрузкой в первые и вторые сутки имело место приращение прогиба перекрытия на 0,1–0,12 мм, после чего прогиб стабилизировался. Таким образом, общая величина приращения прогиба консольной части перекрытия составила 0,28 мм. С ростом прогиба перекрытия увеличивалась ширина раскрытия трещин в стенах и перегородках. При этом форма графика изменения ширины раскрытия трещин в стенах практически повторяла форму графика прогиба консольной части плиты перекрытия (рисунок 5). Данный факт подтверждает предположение о том, что основной причиной образования трещин в стенах являются прогибы консольной части перекрытия.

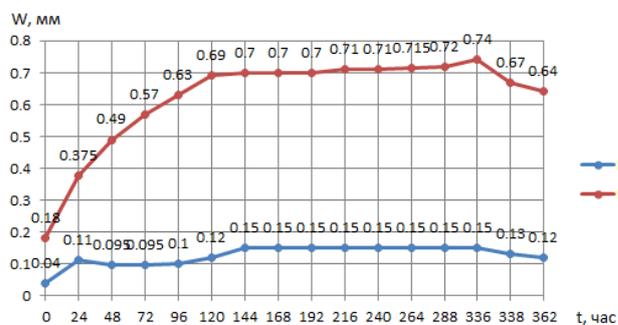


**Рисунок 5** – График приращения ширины раскрытия трещин в стенах при нагружении плиты перекрытия

При длительном действии нагрузки максимальное приращение ширины раскрытия трещин наблюдалось в первые 5 суток и его величина составила около 0,5 мм. В течение последующих суток приращения ширины раскрытия трещин не зафиксировано (рисунок 6).

После выдержки плиты перекрытия под нагрузкой в течение 10 суток была проведена ее разгрузка. Остаточный прогиб консольного участка плиты составил менее 5 % максимального значения прогиба, достигнутого во время испытаний. При этом ширина раскрытия трещин в стенах не изменилась.

Проведенные испытания показали, что несущая способность консольного участка перекрытия достаточна для восприятия проектной нагрузки, а основной причиной образования трещин в стенах здания являются касательные и растягивающие напряжения в каменной кладке, вызванные деформацией плиты перекрытия. В работе [1] показано, что значения данных напряжений зависят от отношения длины стены к ее высоте, прочностных и деформационных свойств каменной кладки, граничных условий стен и диска перекрытия, а также характеристик контакта – коэффициента трения и касательного сцепления.



**Рисунок 6** – График приращения ширины раскрытия трещин в стенах во времени

**Заключение**

Обследование и натурные испытания строительных конструкций показали, что основной причиной образования трещин в стенах здания явились ошибки, допущенные на стадии проектирования объекта, а также нарушения требований проектной документации при его строительстве. Проектная ошибка заключается в принятии завышенных значений предельно-допустимых прогибов перекрытия, на которое опираются стены и перегородки из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения.

Повышению деформативности консольного участка плиты способствовало нарушение проектного положения рабочей арматуры плиты по высоте сечения, допущенное при бетонировании монолитной железобетонной плиты перекрытия, а также превышение на 40 % расчетного значения проектной постоянной нагрузки от веса пола вследствие увеличения на 30 мм толщины цементно-песчаной стяжки.

**Список цитированных источников**

1. Деркач, В. Н. Исследования напряженно-деформированного состояния каменных перегородок при прогибе перекрытия / В. Н. Деркач // Промышленное и гражданское строительство. – № 6. – 2013. – С. 62–66.
2. Dialer, C. Rißschäden an Mauerwerkskonstruktionen / C. Dialer. – Fraunhofer IRB Verlag, 2016. – 451 s.
3. Kania, T. Testing Crack Resistance of Non-Load-Bearing Ceramic Walls with Door Openings / Tomasz Kania, Valery Derkach, Rafal Nowak // Materials. – 2021. – 14, 1379. – 23 p.
4. Деркач, В. Н. Каменные и армокаменные конструкции. Оценка технического состояния, ремонт и усиление / В. Н. Деркач. – Минск : СтройМедиаПроект, 2021. – 256 с.
5. Drobiec, L. Zapobieganie zarysowaniem scian murowych opartych na stropach zelbetowych / L. Drobiec, J. Kubica // Materiały budowlane. – 2006. – № 404. – S. 21–23.
6. Göttlich, P. Begrenzung der Biegeschlankheit nach Eurocode 2 / P. Göttlich // Beton – und Stahlbetonbau. – 2012. – № 107, Heft 1. – S. 38–45.
7. Деркач, В. Н. Трещиностойкость каменных перегородок / В. Н. Деркач, Р. Б. Орлович // Жилищное строительство. – 2012. – № 8. – С. 34–37.
8. Узлы и детали поэтажно опертых стен жилых и общественных зданий из эффективных мелкоштучных материалов. – (Серия Б2.030-13.10). – Выпуск 1. Рабочие чертежи ; Введ. 07.09.11. – Минск : МАиС Респ. Бел.: Институт БелНИИС, 2010. – 60 с.
9. Рекомендации по проектированию поэтажно опертых стен и перегородок из эффективных мелкоштучных стеновых материалов. Р 5.02.088.11 ; Введ. 28.09.11. – Минск : Институт БелНИИС, 2011. – 51 с.

**References**

1. Derkach, V. N. Issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kamennyh peregorodok pri progibe perekrytiya / V. N. Derkach // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – № 6. – 2013. – S. 62–66.
2. Dialer, C. Rißschäden an Mauerwerkskonstruktionen / C. Dialer. – Fraunhofer IRB Verlag, 2016. – 451 s.
3. Kania, T. Testing Crack Resistance of Non-Load-Bearing Ceramic Walls with Door Openings / Tomasz Kania, Valery Derkach, Rafal Nowak // Materials. – 2021. – 14, 1379. – 23 p.
4. Derkach, V. N. Kamennye i armokamennye konstrukcii. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya, remont i usilenie / V. N. Derkach. – Minsk : StrojMediaProekt, 2021. – 256 s.
5. Drobiec, L. Zapobieganie zarysowaniem scian murowych opartych na stropach zelbetowych / L. Drobiec, J. Kubica // Materiały budowlane. – 2006. – № 404. – S. 21–23.
6. Göttlich, P. Begrenzung der Biegeschlankheit nach Eurocode 2 / P. Göttlich // Beton – und Stahlbetonbau. – 2012. – № 107, Heft 1. – S. 38–45.
7. Derkach, V. N. Treshchinostojkost' kamennyh peregorodok / V. N. Derkach, R. B. Orlovich // Zhilishchnoe stroitel'stvo. – 2012. – № 8. – S. 34–37.
8. Uzly i detali poetazhno opertyh sten zhilyh i obshchestvennyh zdaniy iz effektivnyh melkoshtuchnyh materialov. – (Seriya B2.030-13.10). – Vypusk 1. Rabochie chertezhi ; Vved. 07.09.11. – Minsk : MAiS Resp. Bel.: Institut BelNIIS, 2010. – 60 s.
9. Rekomendacii po proektirovaniyu poetazhno opertyh sten i peregorodok iz effektivnyh melkoshtuchnyh stenovyh materialov. R 5.02.088.11 ; Vved. 28.09.11. – Minsk : Institut BelNIIS, 2011. – 51 s.

*Материал поступил 16.01.2024, одобрен 12.02.2024, принят к публикации 12.02.2024*

## КОМПЛЕКСНЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ, ЯВЛЯЮЩИХСЯ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНЫМИ ЦЕННОСТЯМИ Г. ПИНСКА

Э. А. Тур<sup>1</sup>, С. В. Басов<sup>2</sup>, О. А. Акулова<sup>3</sup>, Е. Ю. Русак<sup>4</sup>

<sup>1</sup> К. т. н., доцент, заведующий кафедрой инженерной экологии и химии УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Республика Беларусь, e-mail: tur.elina@mail.ru

<sup>2</sup> К. т. н., доцент, доцент кафедры инженерной экологии и химии УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: basovs@mail.ru

<sup>3</sup> К. т. н., заведующий кафедрой начертательной геометрии и инженерной графики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: akylovabrest@gmail.com

<sup>4</sup> Студентка факультета инженерных систем и экологии УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь

### Реферат

Важнейшей частью проекта по реконструкции и реставрации объектов, включенных в Перечень недвижимых объектов историко-культурного наследия Республики Беларусь, является раздел «Комплексные научные изыскания». С 2006 по 2023 годы учеными Брестского государственного университета были проведены многочисленные комплексные научные исследования недвижимых объектов историко-культурного наследия (исторических зданий) г. Пинска Брестской области. В данной статье был проведен анализ исследованных аутентичных строительных растворов и аутентичных окрасочных составов двадцати объектов. Было определено, что русты, пилястры и венчающие карнизы большинства зданий первоначально были окрашены минеральными составами белого цвета. Основные плоскости стен фасадов большинства анализируемых объектов первоначально были окрашены составами, имеющими бежевую и желтовато-бежевую цветовую гамму (14 зданий из 20-ти анализируемых). В результате проведенного анализа определены основные тенденции формирования цветового решения исторической застройки г. Пинска. К сожалению, 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. Таким образом, на многих значимых и представляющих интерес объектах, аутентичные окрасочные составы были полностью безвозвратно утрачены. Внедрение результатов научно-исследовательской работы в проектирование и производство позволило обеспечить принятие научно-обоснованных решений при разработке проектно-сметной документации и проведении всех видов работ на конкретных недвижимых объектах историко-культурного наследия.

**Ключевые слова:** комплексные научные исследования, историко-культурное наследие, аутентичные окрасочные составы.

## COMPREHENSIVE SCIENTIFIC RESEARCH OF OBJECTS THAT ARE HISTORICAL AND CULTURAL VALUES OF PINSK

E. A. Tur, S. V. Basov, O. A. Akulova, E. U. Rusak

### Abstract

The most important part of the project for the reconstruction and restoration of objects included in the List of immovable objects of the historical and cultural heritage of the Republic of Belarus is the section "Comprehensive scientific research." From 2006 to 2023, scientists of the Brest State University conducted numerous comprehensive scientific studies of immovable objects of historical and cultural heritage (historical buildings) of Pinsk, Brest Region. In this article, an analysis of the examined authentic mortars and authentic paint compositions of twenty objects was carried out. It was determined that the rustications, pilasters and crowning cornices of most buildings were originally painted with white mineral compounds. The main planes of the walls of the facades of the majority of the analyzed objects were initially painted with compounds having beige and yellowish-beige colors (14 buildings out of 20 analyzed). As a result of the analysis, the main trends in the formation of color schemes for the historical buildings of Pinsk were determined. Unfortunately, during the Soviet Union, facade repairs were carried out regularly, but without any inspections, and consisted of clearing the facade in places where paint or plaster had peeled off. Thus, on many significant and interesting objects, authentic painting compositions were completely and irretrievably lost. The introduction of the results of research work into design and production made it possible to ensure the adoption of scientifically based decisions in the development of design estimates and carrying out all types of work on specific immovable objects of historical and cultural heritage.

**Keywords:** comprehensive scientific research, historical and cultural heritage, authentic paint compositions.

### Введение

Историко-культурной ценностью Республики Беларусь признаются объекты, обладающие совокупностью двух признаков: культурной значимостью и юридическим признанием в таком качестве средством включения в охранный реестр – Государственный список историко-культурных ценностей Республики Беларусь [1]. Для нашей страны глубокое изучение и всестороннее использование памятников наследия имеет особое значение. Изучение, сохранение и реставрация недвижимых объектов историко-культурного наследия являются необходимым условием предупреждения процесса разрушения национального богатства и сохранению духовности нашего народа. Компоненты, включенные в термин «историко-культурные ценности», входят в понятие «историко-культурное наследие» постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 3 июня 2016 г. № 437, в котором 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]. 3 февраля 2017 года вступил в силу Кодекс Республики Беларусь о культуре, которым регулируются вопросы охраны историко-культурного и археологического наследия Республики Беларусь (Кодекс Республики Беларусь о культуре от 20 июля 2016 года № 413-3, принят Палатой представителей 24 июня 2016 года, одобрен Советом Республики 30 июня 2016 года) [2]. Кодексом установлена процедура, после выполнения которой разрешается производить работы на историко-культурной ценности.

В составе научно-проектной документации разрабатывают 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 (штукатурных и кладочных растворов, окрасочных составов)

на историко-культурных ценностях и, соответственно, увеличению долговечности проведенных ремонтно-реставрационных работ. Данные работы, как правило, начинаются с комплексного технического обследования зданий. При проведении обследования очень часто выясняется, что, кроме реставрации самого фасада здания, необходимо выполнить комплекс работ по усилению фундамента и устройству гидроизоляции в подвальных помещениях, по устранению причин капиллярного подсоса влаги в ограждающие конструкции здания или сооружения [3, 4]. Также большое внимание рекомендуется уделять ремонту кровли и водосточных систем. Влага (атмосферные осадки) попадает в штукатурные растворы через разрушенное финишное лакокрасочное покрытие на полимерной или силикатной основе. Практика показывает, что здания часто подвергаются разрушению вследствие неправильной работы водостоков, неправильного устройства кровли, а также износу или поломке водосточных систем (т. е. дождевая вода практически стекает по наружным стенам). Наружные стены здания постоянно влажные (особенно северная сторона), осенью и весной при достаточно низких плюсовых температурах в течение светового дня не высыхают. Деструкция подвергается не только штукатурный, но и окрасочный состав [4]. При невыполнении рекомендаций по ремонту кровли и водостоков, на наружных стенах из-за постоянной повышенной влажности имеется большая вероятность протекания биологической коррозии (образование водорослей и мхов). 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 [2, 3].

#### Основная часть

С 2006 по 2023 годы учеными Брестского государственного университета им. А. С. Пушкина были проведены многочисленные комплексные научные исследования недвижимых объектов историко-культурного наследия (исторических зданий) г. Пинска Брестской области. Появилась необходимость проведения анализа физико-химических и органолептических исследований аутентичных строительных растворов и аутентичных окрасочных составов, выполненных за этот период времени. Перечень наиболее значимых исследованных объектов историко-культурного наследия г. Пинска приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Исследованные исторические объекты в г. Пинске

№	Наименование объекта
1	Жилой дом по ул. Комсомольской, д.14
2	Одноэтажное здание в историческом центре по ул. Комсомольской, д. 21
3	Жилое здание по ул. Комсомольской, 41
4	Жилое здание по ул. Ленина, д. 31 (реконструкция под административно-хозяйственный объект)
5	Жилой дом по ул. Ленина, д. 28
6	Административный объект по ул. Ленина, 41
7	Здание по ул. Ленина, 29
8	Здание специализированной розничной торговли по ул. Ленина, 19
9	Здание по ул. Завальной, д. 7
10	Здание радиоузла под административное здание по ул. Завальной, д. 39
11	Здание поликлиники по ул. Завальной, д.18
12	Жилое здание по ул. Советской, 22
13	Жилое здание по ул. Советской, 6
14	Административный объект по ул. Горького, 36
15	Здание станции переливания крови по ул. Горького, д. 43
16	Жилой дом № 4 по ул. Кирова
17	Здание бывшей синагоги «Конфедерацкая» по ул. Кирова, 10а
18	Административное здание по ул. Заслонова, д. 13
19	Здание магазина по ул. Первомайской, д. 12
20	Объект общественного питания по ул. Днепровской флотилии, 29

Исследованные исторические здания и сооружения находились на следующих улицах г. Пинска: ул. Комсомольская – 3 здания (№№ 1, 2, 3), ул. Ленина – 5 зданий (№№ 4, 5, 6, 7, 8), ул. Заваль-

ная – 3 здания (№№ 9, 10, 11), ул. Советская – 2 здания (№№ 12, 13), ул. Горького – 2 здания (№№ 14, 15), ул. Кирова – 2 здания (№№ 16, 17), ул. Заслонова – 1 здание (№ 18, ул. Первомайская – 1 здание (№ 19), ул. Днепровской Флотилии – 1 здание (№ 20).

Отдельно отмечены два значимых неординарных здания историко-культурного наследия – здание бывшего радиоузла по ул. Завальной, 39 и здание бывшей синагоги «Конфедерацкая» по ул. Кирова, 10а.

Здание бывшего радиоузла по ул. Завальной, 39 – трехэтажное кирпичное здание, входит в комплексную историко-культурную ценность "Исторический центр г. Пинска" (рисунок 1) [5]. Было построено в 1928 году изначально под номером 69 и принадлежало пинскому помещику Тененбауму Арону Ицковичу. С приходом советской власти в Западную Беларусь, согласно акту национализации от 30 декабря 1939 года за № 56, каменное трехэтажное здание и все движимое имущество у домовладельца было национализировано. Имущество было передано отделу коммунального хозяйства городского исполнительного комитета.



Рисунок 1 – Здание бывшего радиоузла по ул. Завальной

Во время немецкой оккупации здание находилось на территории еврейского гетто. После освобождения Пинска в здании разместились Пинский областной комитет союза связи. Часть помещений занимали Союзпечать, Пинское областное управление министерства связи, почтовое отделение. После ликвидации Пинской области в 1953 г. здание было передано на баланс Пинского управления Министерства связи. На первом этаже находились две квартиры, на втором этаже – одна квартира, радиостудия, аппаратная комната, на третьем этаже – одна квартира и отдел спецсвязи. На здании городского радиоузла власти установили громкоговорящий репродуктор, с помощью которого, в 12.00 и 19.00, горожане узнавали последние новости из жизни страны и города. В 90-е годы прошлого столетия такие радиоретрансляции были прекращены. В результате реформирования структуры Министерства связи здание в 1997 году было передано на баланс Пинского районного узла электросвязи, который в дальнейшем вошел в республиканское унитарное предприятие «Брестоблтелеком». А в 2004 г. распоряжением Министерства связи и информатизации здание, как и все другое имущество, было передано Республиканскому унитарному предприятию электросвязи «Белтелеком».

Здание синагоги «Конфедерацкая» – это бывший молитвенный дом раввинов Перловых, находится на ул. Кирова, 10а [5]. Родоначальник этой династии –Аарон Перлов (или Аарон Карлинский), стоял у истоков религиозного течения карлин-столинский хасидизм. Аарон Перлов родился в Каролине в 1736 г. Дело отца продолжил сын Ошер, переехавший в Столин, что дало название династии. Родина карлин-столинского хасидизма – пинское предместье Каролин – было широко известно в ВКЛ, а хасидов называли «карлинерами». Хасидизм полон оптимизма, он противопоставляет тагмудическую учёности идею радостного служения Богу. В Пинске жил единственный сын основателя хасидизма Баал-Шем-Това. На Пинщине находятся могилы: Цви (Гирша) Баал-Шем-Това, Аарона I Карлинского и Ошера Столинского.

С 1841 г. до 1901 г. молитвенный дом был деревянным, а после пожара в начале XX века его отстроили из кирпича. Здание занимали различные учреждения, а потом его превратили в жилой дом. В 1993 г. здание было выкуплено частными лицами и возвращено Пинской еврейской общине.

В 2007 г. Пинске начались работы по реконструкции здания старой конфедератской синагоги и рядом стоящего двухэтажного здания, некогда принадлежавшего евреям (рисунки 2, 3). 21 июня 2012 года в Пинске состоялась церемония внесения Свитка Торы в здание старой синагоги, приуроченная к 240-летию со дня рождения основателя карлин-столинской хасидской династии раби Аарона бар Яакова Перлова.



Рисунок 2 – Здание синагоги после реставрации (фасад)



Рисунок 3 – Здание синагоги после реставрации (внутренний дворик)

Для анализа представленных образцов, отобранных на вышеперечисленных недвижимых объектах историко-культурного наследия, применялись микрохимический, гранулометрический и петрографический методы исследований [2, 4, 5, 6].

Гранулометрический состав заполнителей определяли 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»). Физико-химические показатели аутентичных штукатурных растворов исследованных исторических объектов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные аутентичные штукатурные растворы исследованных исторических объектов

№ объекта	№ раствора	Вид раствора	Количественное соотношение компонентов	Наименование показателей				
				Содержание фракции кварцевого песка с размером зерна, %				
				0,25–0,125 мм	0,5–0,25 мм	1,0–0,5 мм	более 1 мм	более 2 мм
1	1	Извест.-песчан.	1:4	35	55	9	1	–
	2	Извест.-песчан.	1:6	25	59	15	1	–
2	1	Извест.-песчан.	1:2,5	21	28	50	1	–
3	1	Извест.-песчан.	1:3	32	43	22	3	–
4	1	Извест.-песчан.	1:5	35	50	15	–	–
	2	Извест.-песчан.	1:5	33	42	25	–	–
5	1	Извест.-песчан.	1:4	35	55	9	1	–
6	1	Извест.-песчан.	1:4	38	51	10	1	–
7	1	Извест.-песчан.	1:2	54	42	4	–	–
8	1	Извест.-песчан.	1:2,5	38	41	8	1	12
9	1	Извест.-песчан.	1:3,5 – 1:4	28	52	20	–	–
10	1	Извест.-цемент.-песч.	1:1:5	71	24	4	1	–
11	1	Извест.-цемент.-песч.	1:1:4 – 1:1:5	27	50	15	5	3
12	1	Извест.-песчан.	1:4	32	58	9	1	–
13	1	Извест.-песчан.	1:4	36	54	9	1	–
14	1	Извест.-песчан.	1:3	30	56	13	1	–
	2	Извест.-песчан.	1:3	30	52	16	1	1
	3	Извест.-песчан.	1:2,5	32	61	6	1	–
15	1	Извест.-цемент.-песч.	1:1:4 – 1:1:5	25	52	15	5	3
16	1	Извест.-песчан.	1:4	32	55	12	1	–
	2	Извест.-песчан.	1:8-1:9	28	57	15	–	–
17	1	Извест.-песчан.	1:3 – 1:3,5	35	45	10	5	5
18	1	Извест.-песчан.	1:1:3	29	38	25	3	5
	2	Извест.-песчан.	1:4,5 – 1:5	21	38	30	9	2
	3	Извест.-песчан.	1:2,5	43	45	11	1	–
	4	Извест.-песчан.	1:9 – 1:10	10	29	35	20	6
19	1	Извест.-цемент.-песч.	1:1:4 – 1:1:5	30	55	10	5	–
	2	Извест.-песчан.	1:2,5	21	28	50	1	–
20	1	Извест.-песчан.	1:3	33	56	11	–	–

Аутентичные штукатурные растворы зданий по ул. Комсомольской являются известково-песчаными и характеризуются широким диапазоном количественного соотношения вяжущее:заполнитель (известь:кварцевый песок): от 1:2,5 до 1:6. Гранулометрические составы заполнителей большинства строительных растворов очень близки (за исключением здания по ул. Комсомольская, 21). Это дает возможность предположить, что кварцевый песок (заполнитель) был привезен из одного карьера.

Аутентичные штукатурные растворы зданий по ул. Ленина также являются известково-песчаными и характеризуются различным диапазоном количественного соотношения вяжущее:заполнитель (известь:кварцевый песок). Здания по ул. Ленина, 28, 31 41 первоначально были оштукатурены растворами с соотношением вяжущее:заполнитель от 1:4 до 1:5, а здания по ул. Ленина, 19 и 29 – от 1:2 до 1:2,5. Гранулометрические составы заполнителей большинства строительных растворов очень близки к гранулометрическим составам заполнителей аутентичных растворов зданий по ул. Комсомольской (за исключением здания по ул. Комсомольская, 21). Это дает возможность предположить, что кварцевый песок (заполнитель) также был привезен из одного карьера.

На фасадах зданий по ул. Завальной был обнаружен только один аутентичный известково-песчаный раствор с соотношением вяжущее:заполнитель = 1:3,5 – 1:4. Гранулометрический состав заполнителя (кварцевого песка) идентичен с гранулометрическими составами заполнителей штукатурных растворов с фасадов зданий по ул. Ленина и ул. Комсомольской. К сожалению, на фасадах здания бывшего радиоузла (д. 39) и поликлиники (д. 18) не были обнаружены аутентичные штукатурные растворы. Вероятно, они были полностью удалены при более поздних ремонтах. Были обнаружены лишь современные известково-цементно-песчаные растворы с соотношением компонентов известь:цемент:песок 1:1:4 – 1:1:5.

Аутентичные штукатурные составы зданий по ул. Советской практически идентичны как по соотношению известь:песок = 1:4, так и по гранулометрическому составу заполнителя. Данные растворы очень близки по гранулометрическому составу заполнителя составов с фасадов зданий по ул. Завальной и ул. Ленина.

Аутентичные штукатурные составы зданий по ул. Горького очень близки по соотношению компонентов и составу, а также по гранулометрическому составу заполнителя составов с фасадов зданий по ул. Завальной, ул. Ленина и ул. Советской. Вероятно, заполнитель (кварцевый песок) был привезен из одного карьера. На здании станции переливания крови (ул. Горького, 43) не были обнаружены аутентичные известково-песчаные растворы, а только современные известково-цементно-песчаные растворы с соотношением компонентов известь:цемент:песок 1:1:4 – 1:1:5 (так же, как на двух зданиях по ул. Завальной). Вероятно, аутентичные штукатурные растворы были полностью удалены при ремонтных работах и не были исследованы. Во всяком случае, в ранней проектной документации таких данных нет.

Здания по ул. Кирова в основном характеризуются штукатурными составами, идентичными (по соотношению компонентов раствора и гранулометрическому составу заполнителя) составам с ул. За-

вальной и ул. Ленина. Лишь один штукатурный состав выпадает из «общей картинки» – это состав с соотношением известь:песок = 1:8 – 1:9 («бедный» раствор с низким содержанием извести). Но и в нем заполнитель по гранулометрическому составу практически не отличается от заполнителей других штукатурных растворов исторической части Пинска.

Аутентичные штукатурные составы зданий по ул. Заслонова, Первомайской и Днепровской Флотилии по соотношению компонентов похожи на рассмотренные ранее составы исторической части города, но один состав (предположительно более позднего периода) напоминает по соотношению компонентов «бедный» раствор, отобранный с фасада здания по ул. Завальной (соотношение известь:песок = 1:9 – 1:10).

Некоторые соответствующие растворы очень близки по соотношению компонентов и составу, а также по гранулометрическому составу заполнителя. Ряд растворов кардинально отличается по соотношению компонентов вяжущее:заполнитель и по гранулометрическому составу заполнителя. Минеральный состав заполнителя – полевшпатово-кварцевый, в основном, кварцевый песок. Во многих известково-песчаных составах отмечены отдельные вкрапления извести размером 1–2 мм.

В результате анализа проведенных исследований установлено, что соответствующие исследованные аутентичные штукатурные известково-песчаные растворы предположительно одного исторического периода близки по соотношению компонентов (вяжущее:заполнитель) и гранулометрическому составу заполнителя (кварцевого песка).

Штукатурные растворы более позднего исторического периода значительно отличаются от аутентичных как соотношением компонентов, так и гранулометрическим составом заполнителя (кварцевого песка), но также являются известково-песчаными. Ремонтные штукатурные и затирочные растворы современного исторического периода по составу являются известково-цементно-песчаными.

Цвет аутентичных окрасочных составов определяли по каталогу «3D-plus» компании CAPAROL, по каталогу «FASSADE A1» компании CAPAROL и по специализированному каталогу реставрационных красок «Histolith» компании CAPAROL, применяемыми в настоящее время архитекторами-реставраторами в Республике Беларусь. Цвет составов определяли путём визуального сравнения образца с эталонной типографской выкраской [3, 5, 6, 7]. Для устранения метамерии определение цвета проводили при рассеянном естественном освещении.

Аутентичные окрасочные составы исследованных объектов приведены в таблице 3.

Следует отметить, что русты, пилястры и венчающие карнизы большинства зданий первоначально были окрашены минеральными составами белого цвета. Лишь у отдельных зданий элементы фасадов первоначально были окрашены в желтые и лимонно-желтые тона (здание по ул. Ленина и здание по ул. Завальная). Основные плоскости стен фасадов большинства анализируемых объектов первоначально были окрашены составами, имеющими бежевую и желтовато-бежевую цветовую гамму (14 зданий из 20-ти анализируемых).

Таблица 3 – Основные аутентичные окрасочные составы исследованных объектов

№	Основные аутентичные окрасочные составы
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Пилястра, выступающая часть стены 1-го этажа главного фасада: состав белого цвета на минеральной основе «Natur-Weiß» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● основная плоскость стены 1-го этажа главного фасада: состав светлого желтовато-бежевого цвета на минеральной основе «Onyx 180» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● основная плоскость стены дворового фасада: состав блекло-оранжевого цвета на минеральной основе «Amber 145» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены главного фасада и обрамление проёмов главного фасада: состав бледно-фиолетового цвета на минеральной основе – «Ultramarinblau» по специализированному каталогу реставрационных красок «Histolith»;</li> <li>● основная плоскость стены северного и южного фасадов: состав светло-бежевого цвета на минеральной основе (на основе охры). Цвет лакокрасочного покрытия близок к образцу «Onyx 140» («FASSADE A1», CAPAROL);</li> <li>● цоколь: аутентичный состав установить не удалось. Очевидно, он либо был тщательно удален с поверхности, либо полностью разрушился под воздействием атмосферных факторов.</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены главного и бокового фасада: состав блекло-зеленого цвета на минеральной основе «Jade 80» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● руст, карниз: состав белого цвета на минеральной основе «Natur-weiß» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>

## Продолжение таблицы 3

№	Основные аутентичные окрасочные составы
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены главного фасада: состав желтовато-бежевого цвета на минеральной основе «Siena 145» («3D-plus System», CAPAROL). Состав сильно «выгорел», возможно, был на тон темнее, т. е. «Siena 140»;</li> <li>● карниз: состав белого цвета на минеральной основе «Natur-weiß» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены главного и дворового фасадов: состав бежевого цвета на минеральной основе «Palazzo 175» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● колонна: состав светло-бежевого цвета на минеральной основе «Palazzo 180» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● пилястра: состав светлого голубовато-серого цвета на минеральной основе «Coelin 50» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Плоскость стены между оконными проемами: состав на минеральной основе бежевого цвета «Marill 90» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● основная плоскость стены 1-го этажа главного фасада: состав на минеральной основе светло-коричневого цвета «Siena 105» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены 1-го этажа главного фасада: состав светло-бежевого цвета на минеральной основе «Опух 180» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● фрагмент арки въезда со стороны главного фасада, основная плоскость стены восточного фасада, основная плоскость стены северного фасада: состав светло-желтого цвета на минеральной основе «Palazzo 270» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● цоколь: состав желтовато-коричневого цвета на минеральной основе «Amber 105» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены 1 этажа главного фасада, основная плоскость стены 2 этажа главного фасада: состав желтовато-бежевого цвета на минеральной основе «Palazzo 230» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● венчающий карниз главного фасада: состав белого цвета на минеральной основе «Natur-weiß» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
9	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены главного (южного) фасада и дворового фасада: состав тёмно-оранжевого цвета на минеральной основе «Papaia 105» («FASSADE A1», CAPAROL);</li> <li>● пилястры главного и западного фасадов: состав желтовато-лимонного цвета на минеральной основе «Melisse 115» («FASSADE A1», CAPAROL);</li> <li>● цоколи главного и восточного фасадов: состав на минеральной основе молочно-белого цвета «Grau-Weiß» («FASSADE A1», CAPAROL);</li> <li>● западный фасад: состав бежевого цвета на минеральной основе «Опух 140» («FASSADE A1», CAPAROL);</li> <li>● дворовая пристройка: состав коричневатого-бордового цвета на минеральной основе «Cameo 135» («FASSADE A1», CAPAROL).</li> </ul>
10	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Углубление основной плоскости стены главного фасада: состав белого цвета на минеральной основе «Natur-Weiß» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● выступающий элемент основной плоскости стены и выступающий элемент над балконом главного фасада: состав серовато-белого цвета на минеральной основе «Kühl-Weiß» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● основная плоскость стены главного фасада: состав светло-желтого цвета на минеральной основе «Marill 140» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
11	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены была окрашена минеральным составом оранжево-коричневого цвета «Amber 110» («3D-plus System», CAPAROL). Состав подвергся фотоокислительной деструкции («выцвел»), поэтому предположительно первоначально имел цвет на тон темнее, т. е. «Amber 105».</li> </ul>
12	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены главного фасада, обрамление оконного проема: состав белого цвета на минеральной основе «Natur-Weiß» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● цоколь: состав светло-коричневого цвета на минеральной основе «Siena 100» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
13	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Цоколь: состав темно-бежевого цвета на минеральной основе «Palazzo 205» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● основная плоскость стены: состав светло-бежевого цвета на минеральной основе «Palazzo 210» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● пилястра главного фасада, профиль между цоколем и основной плоскостью стены бокового фасада: состав белого цвета на минеральной основе «Natur-Weiß» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
14	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены 1-го этажа главного фасада, ниша под окном 1-го этажа главного фасада: состав светло-серого цвета на минеральной основе «Pacific 90». Состав «выгорел», вероятно, изначально был на тон темнее, т. е. «Pacific 85»;</li> <li>● цоколь: состав голубовато-серого цвета на минеральной основе «Pacific 80» («3D-plus System», CAPAROL). Состав «выгорел», вероятно, изначально был на тон темнее, т. е. «Pacific 75»;</li> <li>● пилястра главного фасада, сандрик главного фасада: состав белого цвета на минеральной основе «Natur-Weiß» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
15	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены главного и дворового фасадов: состав на минеральной основе оранжево-коричневого цвета «Amber 105» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
16	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены главного фасада: состав желтовато-бежевого цвета на минеральной основе «Palazzo 230» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
17	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены главного фасада: состав желтовато-бежевого цвета на минеральной основе «Palazzo 230» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● обрамление окна: состав белого цвета на минеральной основе «Natur-Weiß» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
18	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены 1-го этажа главного фасада и боковой фасад: состав красно-коричневого цвета на минеральной основе «Magma 130» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● основная плоскость стены 2-го этажа главного фасада и дворовой фасад: состав белого цвета на минеральной основе «Natur-Weiß» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● цоколь: состав светло-серого цвета на минеральной основе «Venato 50» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>
19	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость лицевой поверхности стены главного и дворового фасадов: состав на минеральной основе желтого цвета «Curry 145».</li> </ul>
20	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Основная плоскость стены главного, дворового и боковых фасадов, цоколь, пилястра: состав бледно-розового цвета на минеральной основе «Magma 150» («3D-plus System», CAPAROL);</li> <li>● карниз: состав белого цвета на минеральной основе «Natur-Weiß» («3D-plus System», CAPAROL).</li> </ul>

Фасады нескольких зданий из двадцати анализируемых первоначально имели цветное решение в красно-коричневой (1-й этаж здания по ул. Заслонова), в оранжево-коричневой (здание по ул. Завальной и здание по ул. Горького) и в темно-оранжевой (здание по ул. Завальной) цветовой гамме. Одно здание по ул. Комсомольской первоначально было окрашено минеральным составом бледно-фиолетового цвета. Одно из зданий – составом блекло-зеленого цвета на минеральной основе (ул. Комсомольская), одно здание по ул. Горького – составом светло-серого цвета на минеральной основе (таблица 3).

#### Заключение

Большинство зданий в различные исторические периоды многократно штукатурились, затирались и перекрашивались составами на различной основе. Следует отметить, что в более ранние периоды времени окрасочные работы производились минеральными составами, чаще всего на основе охры (в желтовато-бежевой цветовой гамме), а в более поздний период – совершенно отличающимися по физико-химическим свойствам полимерными составами, не имеющими с ранними химического средства. Во многих случаях это привело к отсутствию межслойной адгезии. Кроме того, определено, что аутентичное цветное решение многих зданий кардинально отличалось от цветовых решений последних ремонтов. К сожалению, 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. Таким образом, на многих значимых и представляющих интерес объектах аутентичные окрасочные составы были полностью безвозвратно утрачены.

В результате проведенного анализа определены основные тенденции формирования цветového решения исторической застройки г. Пинска: фасады большинства исследованных объектов историко-культурного наследия первоначально были окрашены минеральными составами, имеющими бежевую и желтовато-бежевую цветовую гамму, а декоративные элементы (междуэтажные и венчающие карнизы, русты и пилястры) первоначально были окрашены минеральными составами белого цвета.

В настоящее время ремонтно-реставрационные работы на большинстве объектов завершены. Все виды работ на данных объектах проводились в соответствии с действующим законодательством в сфере охраны историко-культурного наследия Республики Беларусь, опирались на многосторонние комплексные исследования [9, 10, 11]. Внедрение результатов научно-исследовательской работы в проектирование и производство позволило обеспечить принятие научно-обоснованных решений при разработке проектно-сметной документации и проведении всех видов работ на конкретных недвижимых объектах историко-культурного наследия.

#### Список цитированных источников

1. Дзяржаўны спіс гісторыка-культурных каштоўнасцей Рэспублікі Беларусь / склад. В. Я. Абрамскі, 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. Скальній, В. С. Проблемы сохранения, причины разрушения и первичное обследование недвижимых памятников архитектуры и истории : моногр. / В. С. Скальній, Е. В. Косыгин. – Орел : ГАУ, 2003. – 201 с.
4. Фрессель, Ф. Ремонт влажных и поврежденных солями строительных сооружений / Ф. Фрессель. – М. : ООО «Пэйнт-медиа», 2006. – 320 с.
5. Свод памятников истории и культуры Белоруссии. Брестская область / АН БССР, Ин-т искусствоведения, этнографии и фольклора, Белорус. сов. энцикл.; редкол.: С. В. Марцелев (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БелСЭ, 1990. – 424 с.
6. Никитин, М. К. Химия в реставрации: справ. пособие / М. К. Никитин, Е. П. Мельникова. – Л. : Химия, 1990. – 304 с.
7. Ивлиев, А. А. Реставрационные строительные работы / А. А. Ивлиев, А. А. Калыгин. – М. : ПрофОбрИздат, 2001. – 272 с.

8. Брок, Т. Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям / Т. Брок, М. Гротеклаус, П. Мишке. – пер. с англ. под ред. Л. Н. Машляковского. – М. : Пэйнт-Медиа, 2004. – 548 с.
9. 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. – 2018. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 17–21.
10. Комплексные научные исследования фасадов костела святых Петра и Павла в д. Рожанка Гродненской области / Э. А. Тур [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2020. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 147–152.
11. Комплексные научные исследования руин усадьбы «Наднёман» в д. Наднёман Узденского района Минской области как объекта историко-культурного наследия / Э. А. Тур [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 1. – С. 33–38.
12. Свято-Рождества-Богородицкая церковь-крепость оборонительного типа в д. Мурованка Гродненской области как объект историко-культурного наследия Республики Беларусь / Э. А. Тур [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 2. – С. 32–38.

#### References

1. Dzyarzhayny spis gistoryka-kul'turnykh kashtoynascej Respubliki Belarus' / sklad. V. YA. Ablamski, I. M. CHarnyay'ski, 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, V. S. Problemy sohraneniya, prichiny razrusheniya i pervichnoe obsledovanie nedvizhimykh pamyatnikov arhitektury i istorii : monogr. / V. S. Skal'nyj, E. V. Kosygin. – Orel : GAU, 2003. – 201 s.
4. Fryossel', F. Remont vlazhnyh i povrezhdennykh solyami stroitel'nyh sooruzhenij / F. Fryossel'. – M. : ООО «Pejnt-media», 2006. – 320 s.
5. Svod pamyatnikov istorii i kul'tury Belorussii. Brestskaya oblast' / AN BSSR, In-t iskusstvovedeniya, etnografii i fol'klora, Belorus. sov. encikl.; redkol.: S. V. Marcelev (gl. red.) [i dr.]. – Minsk : BelSE, 1990. – 424 s.
6. Nikitin, M. K. Himiya v restavracii: sprav. posobie / M. K. Nikitin, E. P. Mel'nikova. – L. : Himiya, 1990. – 304 s.
7. Ivliev, A. A. Restavracionnye stroitel'nye raboty / A. A. Ivliev, A. A. Kalygin. – M. : ProfObrizdat, 2001. – 272 s.
8. Brok, T. Evropejskoe rukovodstvo po lakokrasochnym materialam i pokrytiam / T. Brok, M. Groteklaus, P. Mishke. – per. s angl. pod red. L. N. Mashlyakovskogo. – M. : Pejnt-Media, 2004. – 548 s.
9. Tur, E. A. K voprosu o sohranении ob'ektov istoriko-kul'turnogo naslediya v g. Breste / E. A. Tur, S. V. Basov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2018. – № 1: Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 17–21.
10. Kompleksnye nauchnye issledovaniya fasadov kostela svyatykh Petra i Pavla v d. Rozhanka Grodnenskoj oblasti / E. A. Tur [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2020. – № 1: Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 147–152.
11. Kompleksnye nauchnye issledovaniya ruiny usad'by «Nadnyoman» v d. Nadnyoman Uzden'skogo rajona Minskoy oblasti kak ob'ekta istoriko-kul'turnogo naslediya / E. A. Tur [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – № 1. – S. 33–38.
12. Svyato-Rozhdstva-Bogorodickaya cerkov'-krepost' obronitel'nogo tipa v d. Murovanka Grodnenskoj oblasti kak ob'ekt istoriko-kul'turnogo naslediya Respubliki Belarus' / E. A. Tur [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2023. – № 2. – S. 32–38.

Материал поступил 24.01.2024, одобрен 20.02.2024, принят к публикации 20.02.2024

## ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ АТТРАКТИВНОСТИ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ НАБЕРЕЖНОЙ Р. СОЖ В Г. ГОМЕЛЕ

**А. В. Евстратенко<sup>1</sup>, Н. Е. Велюгина<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Кандидат архитектуры, доцент, доцент кафедры «Архитектура и строительство» УО «Белорусский государственный университет транспорта», Гомель, Беларусь, e-mail: angelikaevstratenko@gmail.com

<sup>2</sup> Магистр архитектуры, старший преподаватель кафедры «Архитектура и строительство» УО «Белорусский государственный университет транспорта», Гомель, Беларусь, e-mail: nata-velygina@yandex.by

### Реферат

Река в городе – это определяющий его образ и планировочную структуру градостроительный и культурный феномен. Авторами рассматривается роль набережных в структуре города. Выявляются тенденции и ведущие принципы формирования архитектурно-дизайнерской среды околводных городских общественных пространств. Анализируется качество архитектурной среды центральной набережной р. Сож в г. Гомеле, выявляются недостатки в обустройстве, предлагаются пути совершенствования ее предметно-пространственной среды согласно исходной ситуации и выявленным принципам.

**Ключевые слова:** набережная, городская среда, благоустройство, околводное пространство, общественное пространство, рекреационная зона.

### THE PROBLEM OF INCREASING THE ATTRACTIVENESS OF THE URBAN ENVIRONMENT ON THE EXAMPLE OF THE EMBANKMENT OF THE SOZH RIVER IN GOMEL

**A. V. Evstratenko, N. E. Velyugina**

### Abstract

A river in a city is an urban and cultural phenomenon that defines its image and planning structure. The authors consider the role of embankments in the structure of the city. The trends and leading principles of the formation of the architectural and design environment of near-water urban public spaces are revealed. The quality of the architectural environment of the central embankment of the Sozh river in Gomel is analyzed, shortcomings in the arrangement are identified, ways to improve its subject-spatial environment are proposed according to the initial situation and the identified principles.

**Keywords:** embankment, urban environment, landscaping, near-water space, public space, recreational area.

### Введение

Как известно, в давние времена крупные поселения формировались на реках, они давали людям все необходимое: пресную воду, пищу, водные торговые пути. На территории Беларуси градообразующими стали Свислочь, Днепр, Неман, Западный Буг и др., благодаря которым осуществлялось водное транспортное сообщение и формировались оси древнего каркаса расселения.

Реки и водоемы, расположенные в границах городов и составляющие водно-зеленую систему, как правило, определяют развитие ядра общественной жизни, в котором городские набережные играют ведущую роль. Учитывая преобладание городского населения в нашей стране (более 75 %) – они становятся ценнейшим связующим звеном в комплексе «урбанизированная территория – природная зона». Актуальность данного исследования состоит в необходимости выявления тенденций развития архитектурно-дизайнерских подходов к обустройству околводных общественных пространств и своевременной научно обоснованной разработке рекомендаций по совершенствованию структурно-функциональной и архитектурно-художественной организации среды набережной р. Сож в г. Гомеле.

Цель данной работы состоит в определении актуальных принципов формирования среды городских набережных, а также анализе современного состояния набережной р. Сож в г. Гомеле, выявлении проблем в ее обустройстве и разработке рекомендаций по совершенствованию данного пространства. Объектом исследования выступают городские набережные, и как частный случай, набережная р. Сож в г. Гомеле. Предмет исследования – функциональное зонирование и архитектурно-дизайнерские приемы организации среды набережных с учетом общемировых тенденций.

### Принципы формирования современных городских набережных

Городской житель становится все более требовательным к качеству выполняемых элементов благоустройства и их оригинальности. Постепенное изменение ценностных представлений о роли город-

ских околводных пространств и новых возможностях реализации ландшафтно-рекреационного и культурного потенциала породило множество архитектурно-дизайнерских концепций, получивших положительный отклик в контексте глобальной архитектуры. Поэтому при обустройстве околводных участков стоит непростая задача создания самобытной городской инфраструктуры, наиболее полно отвечающей потребностям горожан.

Предваряя анализ обустройства набережной р. Сож в г. Гомеле, рассмотрим актуальные положения в архитектурном формировании общественных пространств в околводных зонах городов.

В структуре городской набережной, основная функция которых пешеходная, можно выделить следующие функциональные зоны с характерным наполнением и возможностью их совмещения:

- основные точки притяжения – компактные площадки для отдыха и проведения различных мероприятий, пристани, спортивные и игровые площадки, знаковые малые архитектурные формы, кафе, мобильные точки с уличной едой;

- смешанные коммуникационные зоны – протяженные участки, объединяющие в себе дорожки для ходьбы, бега и велодвижения, пункты проката транспорта и инвентаря;

- прогулочные аллеи – пути для пеших прогулок с взрослыми деревьями, цветущими садами, редколесьем, разнотравьем, фонтанами, скульптурами и ландшафтными композициями;

- околводные прогулочные зоны – участки вдоль реки или водоема с пирсами, причалами и организованными спусками к воде.

Путь к воде – традиционно основной городской пешеходный маршрут, на который нанизаны различные по функции и наполнению объекты. Не существует эталонной модели развития городских комплексов, ведь свойства ландшафтов различны, а тенденции скоротечны. Однако можно сформулировать ряд положений, отражающих основные направления проектирования комплексного благоустройства прибрежных территорий в урбанизированной среде в отечественной и зарубежной практике. Рассмотрим некоторые примеры обустройства городских набережных.

Согласно проекту ревитализации исторического центра г. Тулы (Россия) в 2018 г. на набережной р. Упы был устроен ландшафтный парк с амфитеатром и пешеходными мостами, выделен музейный квартал. В результате открылся привлекательный вид на кремль, а у посетителей появился непосредственный доступ к воде (рисунок 1 (а, б)). Между рекой и кремлевской стеной появились прогулочные зоны, кафе, летняя сцена, детские и спортивные площадки, оригинального дизайна беседки, высажены взрослые деревья [1].

В результате реконструкции набережной оз. Кабан в г. Казани (Россия) жители получили современное общественное пространство (рисунок 1 (в, г)). Прибрежные полосы были засажены очищающими водными растениями, а грунт зеленых зон – покрыт слоем коры, препятствующими росту травы и распространению грязи и пыли. Металлическое ограждение с перфорацией символизирует волны, а за ним установлена осветительная система, подсвечивающая вечером берег. Выше проходит довольно оживленная улица, но, благодаря грамотному проектированию, у воды шума практически не слышно. На набережной устроена гидротехническая детская площадка и сцена на воде, проводятся концерты, лекции, спортивные тренировки и танцы [2].

В рамках реконструкции исторического центра города Пуэрто-Вальярта (Мексика) был реализован проект набережной, высвобожденной от автомобильного движения (допускается лишь проезд спецтранспорта с маленькой скоростью). Освободившуюся территорию заняла пешеходная эспланада, устроенная по всей длине в том же уровне, что позволило решить две важные проблемы: организацию отвода ливневых стоков как с поверхности самой набережной, так и улиц, почти перпендикулярно выходящих на нее, и защита набережной от интенсивных волн, создаваемых сильными тропическими штормами и обрушивающихся ежегодно на побережье (рисунок 1 (д, е)). Набережная получила волнообразный контур, который отражает планировочную структуру городской застройки, поквартирно выходящей на нее. Перспектива каждой перпендикулярной набережной улицы заканчивается скульптурой морской тематики. Вдохновением для всех элементов дизайна набережной послужила индейская культура Уичоль (Huichol Indian culture), широко распространенная на севере Мексики и в Наярит Ривьере (Nayarit Riviera). Силуэты космологии уичолей были инкрустированы в бетонное покрытие набережной галечными камнями, что придает региональные особенности. Эта техника широко применяется в Пуэрто-Вальярта [3].

Следующим примером может служить набережная Гамбурга. Проект нового общественно рекреационного пространства принадлежит архитектурному бюро Захи Хадид (рисунок 1 (ж, з)). Архитекторы предложили сформировать набережную, отвечающую современным стандартам благоустройства и комфортной среды с различным функциональным наполнением, обеспечивающим множество точек притяжения. Данная набережная является интересным и показательным примером реализации приемов параметрического дизайна, благодаря чему были рассчитаны комфортные значения для всех атрибутов пространства: пандусов, малых архитектурных форм, амфитеатров и т. д. [4].

Приведены лишь некоторые интересные примеры формирования городских набережных. К их числу можно отнести также набережные городов Парижа, Риги, Торонто, Осло, Дивногорска, парка Зарядье и ЦПКИО им. Горького Москвы и др. Анализ опыта формирования набережных позволяет сделать вывод о том, что при развитии рекреационных функций в прибрежной зоне необходимо придерживаться основополагающей идеи: проектирование набережных должно подчиняться задаче сохранения существующего природного потенциала береговых территорий на основе закрепления экологического каркаса. Анализ теоретических источников и имеющегося отечественного и зарубежного опыта позволяет сформулировать основные принципы формирования городских набережных на современном этапе. В своем исследовании М. В. Савельев, М. Д. Роман, Н. В. Бондарь выделяют четыре принципа проектирования: принцип многослойной структуры коммуникаций, принцип биологических мероприятий, принцип доступной среды, принцип круглогодичного использования [5, С. 111–118].

*Принцип многослойной структуры коммуникаций* – обеспечение приоритета пешеходного движения и многоуровневость пространства, грамотное размещение парковок, организацию велопутей, внедрение их в городскую структуру.

*Принцип биологических мероприятий (экологический принцип)* – предполагает мероприятия по сохранению экокаркаса и обеспечению биоразнообразия, укреплению береговой структуры, очистке воды и дна, использованию экологически чистых материалов, а также точный учет водоохранной зоны [6, С. 174–176]. Образование многофункционального «умного» ландшафта позволяет ограждать отдыхающих от ветра и городского шума. На территориях с плотным покрытием возможно устройство «дождевых садов». В дождливые дни ливневые стоки будут поступать в специальные углубления вдоль дорог, а по ним в дождевые сады, где и будет происходить очистка воды. Часть очищенной воды будет далее поступать в реки и озера по узким протокам через зону с искусственными плавучими островами, где она будет проходить дополнительное очищение [7].

*Принцип доступной среды* – обеспечение доступности водных зеркал там, где это возможно, раскрытие визуальных точек и формирование системы смотровых площадок, недопустимость физических барьеров для маломобильных групп населения.

*Принцип круглогодичного использования (принцип всесезонности)* предполагает реализацию летних активных функций (детские площадки, спорт, фестивали); летних пассивных функций (кафе, павильоны, зоны отдыха, выходы к воде, арт-объекты); зимних активных функций (каток, лыжи, снежные горки, новогодние праздники); зимних пассивных функций (кафе, павильоны, зоны отдыха, арт-объекты).

Однако, по нашему мнению, кроме вышеперечисленных важно реализовывать и следующие принципы.

*Принцип коммуникационной связности* – непрерывная и оптимальная пешеходная и велосипедная инфраструктура с разделением потоков пешеходов и велосипедистов и оптимальной планировкой дорожно-тропиночной сети.

*Принцип адаптивности* – обеспечение трансформируемости пространства (возможность смены назначения и облика набережной, в том числе в краткосрочной перспективе). Целесообразно создавать многофункциональные и адаптируемые в соответствии с общественными запросами пространства, привлекательные для всех категорий пользователей. Спортивные и развлекательные зоны могут видоизменяться в зависимости от сезонности.

*Принцип креативности* важен для реализации досуговых, развлекательных и образовательных функций общественных пространств. В качестве элементов обустройства, кроме традиционного наполнения в виде уличной мебели и скульптур, могут устраиваться надводные кинотеатры, спортивные тренажеры, скалодромы, деревянные лежаки, детское развивающее оборудование, пункты проката велосипедов, самокатов и гироскутеров, зоны паркура, скейт-парки, стационарные и мобильные стены для граффити, образовательные устройства и пр.

*Принцип событийности* – возможность организации среды-события. Проведение мероприятий в пространстве обустроенной прибрежной зоны позволяет формировать дополнительную образность и контекстуальность. К примеру, отказавшись около десяти лет назад от проведения массовых мероприятий в центральной части г. Гомеля в пользу локальных площадок, власти города вернулись к идее организации главной праздничной зоны на обширной территории городского центра и в первую очередь на набережной р. Сож.

*Принцип проницаемости* – застройка, окружающая набережную, должна быть проницаемой с нарастанием пространственных разрывов и раскрытием кварталов по направлению к воде. Ее масштаб напрямую зависит от масштаба реки. Чрезмерно высокая застройка будет неизбежно оптически суживать русло. При решении цветовой композиции фасадов соседствующих зданий и сооружений следует использовать натуральные материалы, природные цвета и учитывать особенности инсоляции берегов.

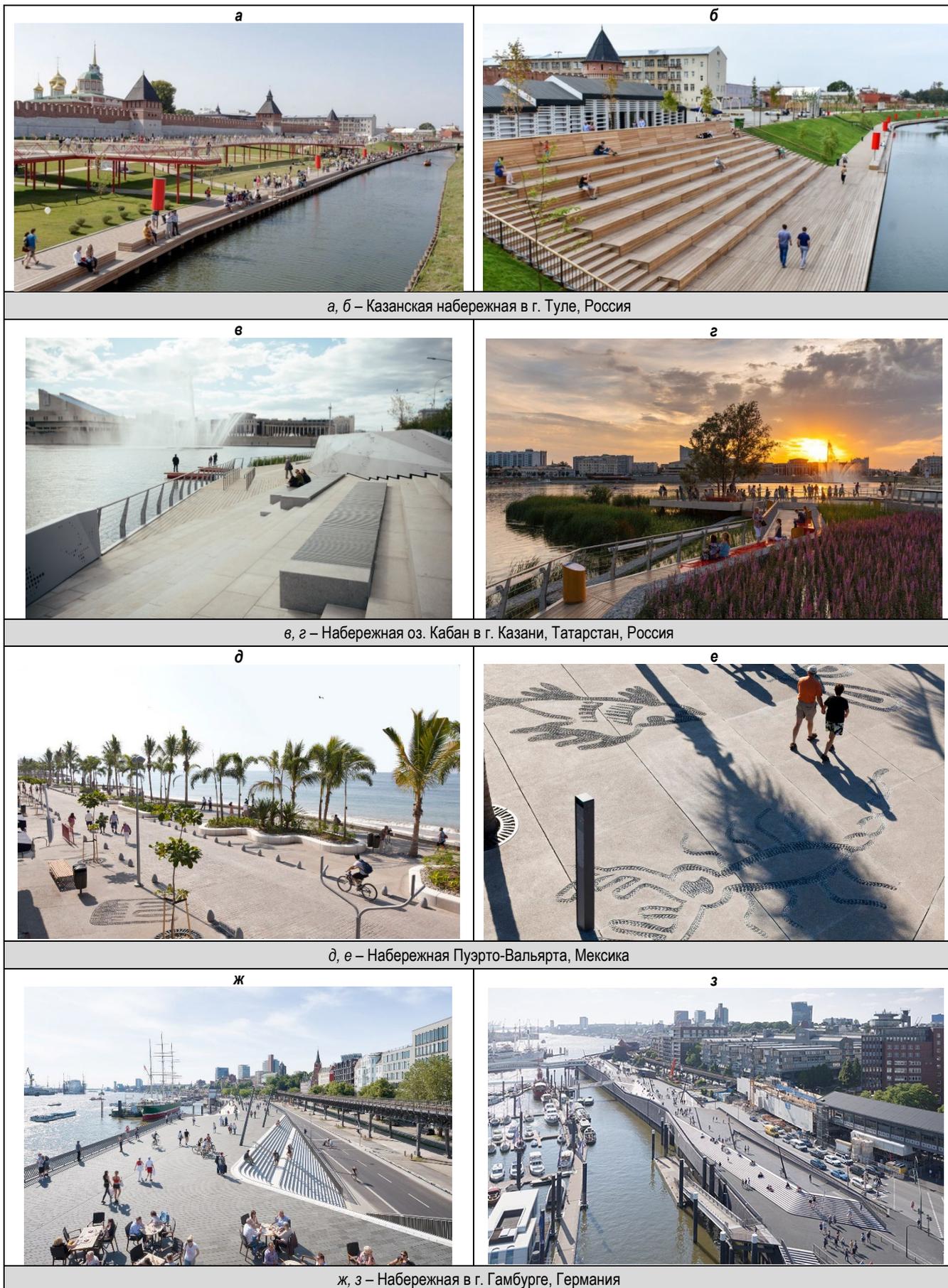


Рисунок 1 – Примеры благоустройства городских набережных

Наименование зоны	Наполнение зоны	Фотофиксация объектов	Недостатки	Пространственно-функциональная коррекция	Эргономико-эстетическая гармонизация
Зона общественного питания	Рестораны «Прованс» и «Квартирник», ресторан «Немо» легкотипные сезонные летние кафе (4 шт), легкотипные пункты торговли		<ul style="list-style-type: none"> <li>– Отсутствие регулирования микроклимата: в жаркий период сложно найти тень и прохладу, в холодный – защититься от дождя и ветра);</li> <li>– Невыразительная организация ландшафта;</li> <li>– Функциональная однородность. Недостаточно возможностей для активного досуга и тихого отдыха;</li> <li>– Непригодность территории к разным погодным явлениям и сезонам;</li> <li>– Отсутствие велосипедных дорожек. Велосипедисты стихийно движутся по пешеходной части;</li> <li>– Неэстетичная герметизация летних кафе в холодный период времени (закрыты черной пленкой);</li> <li>– Колористическое однообразие среды;</li> <li>– Примитивная причальная инфраструктура;</li> <li>– Отсутствие удобного контакта с водой;</li> <li>– Недостаточная связность функциональных зон;</li> <li>– Большие площади газонов, не имеющих эстетической значимости, однако существенно сокращающих доступное пространство</li> </ul>	Пространственно-функциональная коррекция	Эргономико-эстетическая гармонизация
Спортивная зона	Скейтпарк, станция ОСВОД, гребная база, спортивная площадка				
Детская зона	Детские площадки				
Хозяйственная зона	Общественные туалеты в рельефе, технические постройки				
Зона тихого отдыха	Скамейки, смотровые площадки, нижний ярус бетонной набережной				
Малые архитектурные формы	Скульптурные композиции, скамейки, урны, фонари, ограждения спусков				
Причал	Огороженный спуск				
Событийное пространство	Мобильные фудкорты, живые скульптуры				

Рисунок 2 – Функционально-эстетическое наполнение пространства набережной р. Сож в г. Гомеле

**Качество архитектурно-пространственной среды набережной р. Сож в г. Гомеле**

Перейдем к рассмотрению функционально-планировочных и эстетических качеств среды набережной р. Сож в г. Гомеле и соответствию ее формирования приведенным принципам.

Г. Гомель был основан у полноводной р. Сож. Построенный на высоком берегу городской детинец был защищен от врагов, а судоходная река, позволявшая жителям успешно заниматься торговлей и ремеслами, стала важнейшим фактором развития города. Не углубляясь в детальный анализ истории образования города, перейдем

к рассмотрению участка прибрежного городского ландшафта. Сформированный на нем природно-архитектурный ансамбль, подчинен строгой архитектуре комплекса, включающего дворец Румянцевых и Паскевичей, часовню-усыпальницу семьи князей Паскевичей, Петропавловский собор, и является его логическим продолжением.

Центральная набережная г. Гомеля имеет протяженность 2,5 километра и вместе с дворцово-парковым ансамблем является визитной карточкой города. Построенная в несколько этапов, она находится в природной среде (зеленые территории дворцово-паркового ансамбля), вместе с тем в непосредственной близости располагает-

ся главная городская площадь (им. В. И. Ленина). Поскольку в Гомеле нет пешеходной улицы, набережная является любимым местом для прогулок горожан. Она имеет линейную структуру и состоит из двух уровней, соединенных спусками, имеются выступающие смотровые площадки. Верхний уровень набережной разделен озеленением на две части: одна, расположенная ближе к воде, используется как прогулочный пешеходный маршрут (имеет плиточное покрытие), вторая, расположенная к склонам, используется как хозяйственный проезд (имеет асфальтовое покрытие). Для исключения монотонности покрытие пешеходной части выполнено в плитке с геометрическим рисунком (базовый цвет – серый, цвет рисунка – красный), узловые части имеют более сложное исполнение.

На набережной р. Сож в г. Гомеле можно выделить несколько функциональных зон: спортивная зона, зона общественного питания, детская зона, хозяйственная зона, зона тихого отдыха, малые архитектурные в классическом стиле, причал под названием «Киевский спуск». Прогулочный маршрут на теплоходе предполагает водное путешествие вдоль набережной от Киевского спуска вверх по р. Сож до дельты р. Ипуть, обратно вниз по реке до лебяжьего пруда и возврат вверх по реке до причала на Киевском спуске. В дни праздников территория наполняется разнообразными экспозициями, презентующими историю развития города, а также тематическими выставками крупнейших организаций. Появляются мобильные фудкорты с прилегающими зонами питания.

В настоящее время мнение жителей и гостей города зачастую выражается в утверждении, что прогулка по довольно протяженному линейному участку вызывает скуку и даже утомительно. На рисунках 2–4 показаны результаты анализа сложившегося функционально-эстетического наполнения, функционального зонирования и композиционного построения пространства. По нашему мнению, потенциал значимого для города объекта реализуется не в полной мере и в организации набережной можно отметить существенные недостатки, не позволяющие считать созданное пространство, отвечающим актуальному запросу пользователей. Можно констатировать, что ни один из перечисленных принципов не реализован в полной мере. Оценка состояния набережной осуществлялась на основании следующих критериев: функциональная насыщенность набережной, многообразность формируемых впечатлений у посетителя и реализация различных досуговых сценариев, комфортность пребывания для всех посетителей, связность с прилегающими территориями.

К преимущественным качествам территории центральной набережной в г. Гомеле можно отнести следующие: расположение в градостроительной структуре – в историческом ядре города, нахождение в составе Гомельского дворцово-паркового ансамбля, линейность и протяженность, обрывистость склонов и многоуровневость пространства, наличие ряда заметных точек притяжения для посетителей.

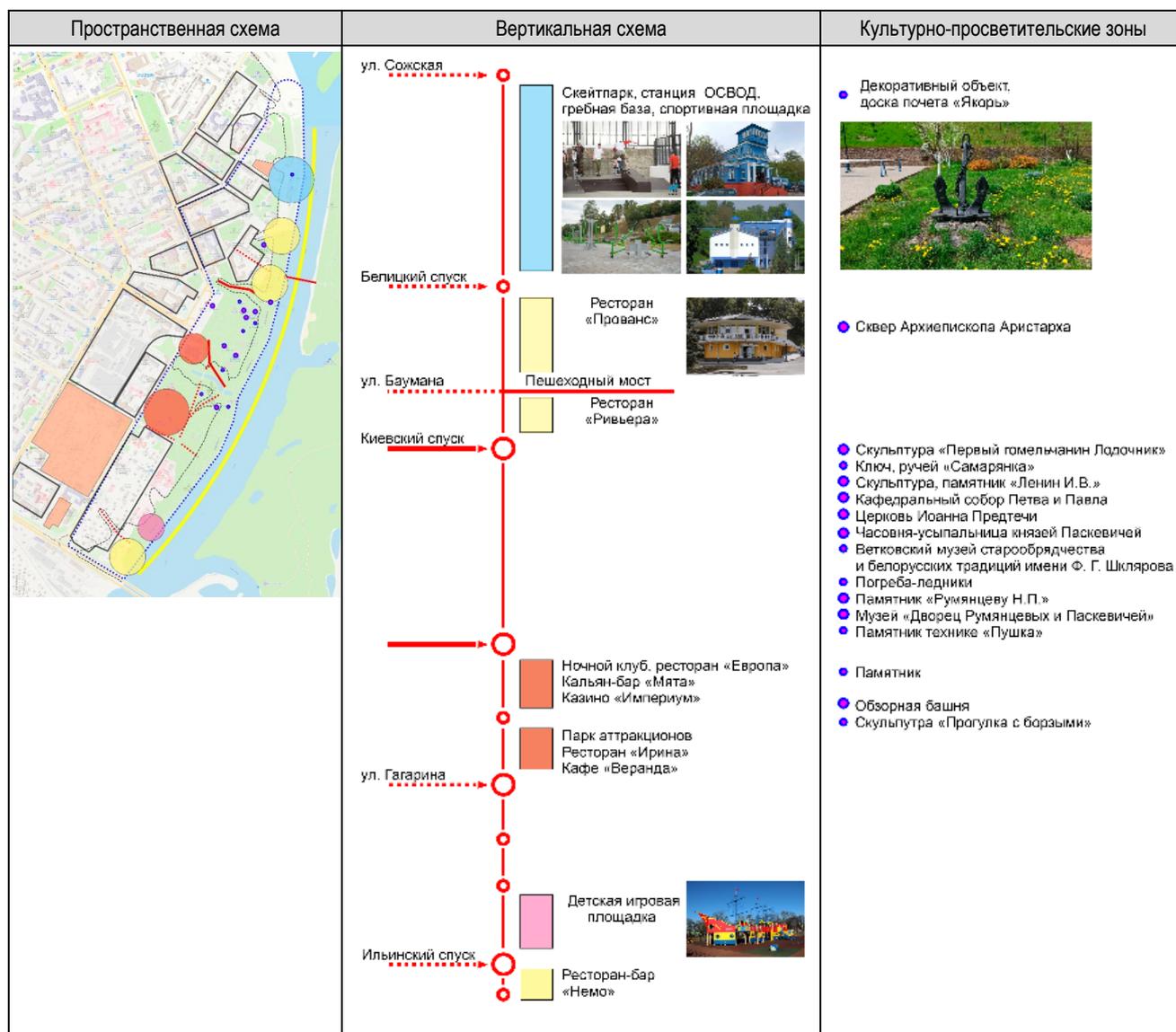


Рисунок 3 – Анализ функционального зонирования набережной р. Сож в г. Гомеле

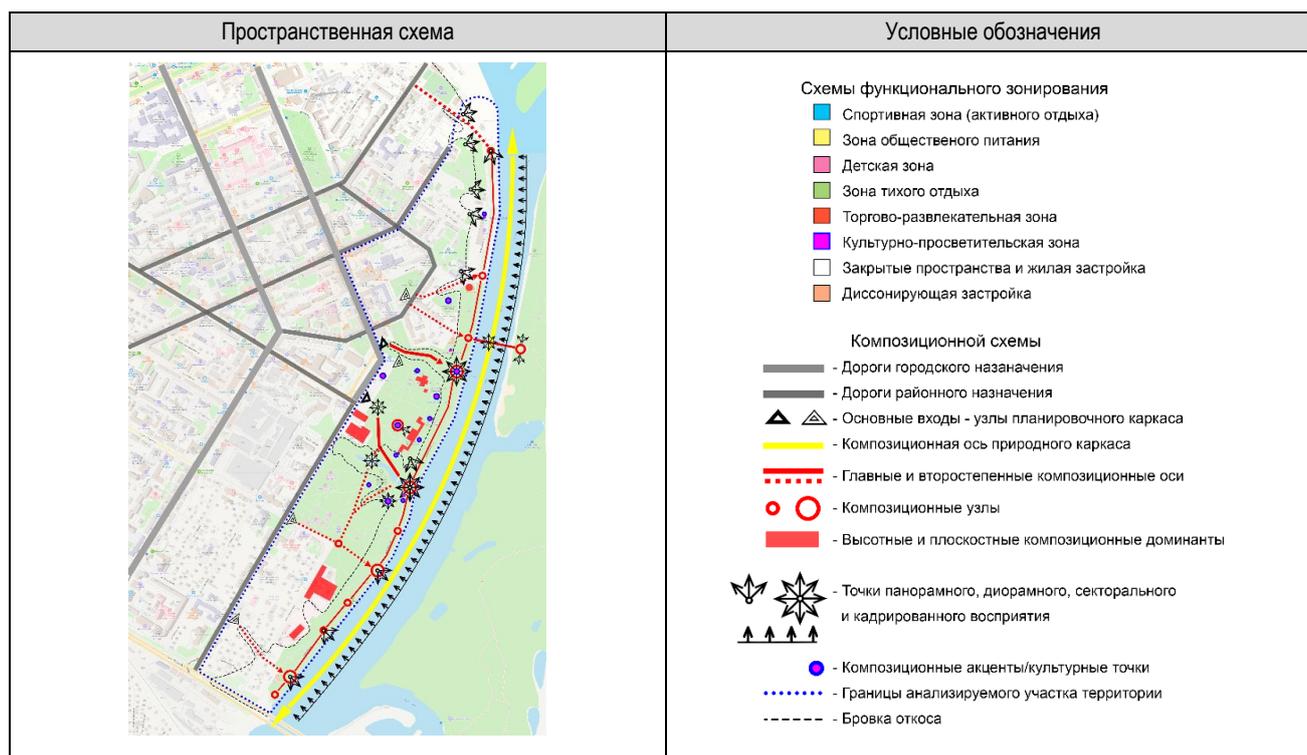


Рисунок 4 – Композиционный анализ застройки набережной р. Сож в г. Гомеле

Как показал анализ, для повышения аттрактивности среды центральной набережной в г. Гомеле необходима пространственно-функциональная коррекция и эргономикоэстетическая гармонизация пространства при бережном отношении к историческому наследию. Осуществление *пространственно-функциональной коррекции* пространства возможно благодаря реализации следующих приемов:

- обеспечению разнообразия впечатлений и нового восприятия места: путем увеличения объектов обслуживания и обеспечения их тематической связности, создания экспозиций под открытым небом и оригинальных скульптурных композиций, реализации сезонных сценариев, создания амфитеатра;

- развитию многоуровневости формы набережной за счет организации спуска к реке в виде стилизованного амфитеатра: ближе к воде из бетона, выше – из деревянного настила, устройства системы надводных и надземных мостов;

- обеспечению контакта с водой, устройство светомузыкальных водных систем;

- функционально-эстетической реорганизации причала.

*Эргономико-эстетическая гармонизация* пространства может быть реализована с использованием следующих приемов:

- совершенствованию транспортно-пешеходной связи: обеспечению дополнительной пешеходной связи с прилегающей застройкой, созданию велоинфраструктуры;

- реализации ландшафтного потенциала местности: использование геопластики, включение террас и естественных берегов в планировку, использование вертикальных плоскостей первого яруса для творчества (граффити);

- создания линейного парка и соединения противоположных берегов озелененным пешеходным мостом с оригинальными элементами светового дизайна;

- обеспечения благоприятного микроклимата путем устройства теневых навесов, сухих фонтанов, разнообразных ландшафтных форм;

- высадки многолетних трав на обширные газоны и склоны обрывов, создания участков водных садов.

#### Заключение

Подводя итог, отметим, что набережные традиционно занимают центральное место в качественно организованной городской среде. Их развитие требует исчерпывающего выявления и усиления пре-

имуществ прибрежной территории. С этой целью используются как естественные формы, так и креативные решения, результатом чего должно стать многофункциональное общественное пространство, расширяющее сценарии городского образа жизни.

Вышеперечисленные средства и приемы пространственно-функциональной коррекции и эргономикоэстетической гармонизации среды позволят существенно повысить ценность важнейшего общественного пространства г. Гомеля. Разработка стратегии комплексного развития городской набережной требует решения множества задач, среди которых определение оптимальной функционально-планировочной структуры и необходимого предметного наполнения среды, регулирование масштабности и ритма прилегающей застройки, выбор элементов благоустройства и озеленения.

#### Список цитированных источников

1. Ревитализация исторического центра города Тула [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wowhaus.ru/urbanistics/tulskaaya-naberezhnaya.html>. – Дата доступа: 16.12.2023.
2. Новое место. Гидротехническая детская площадка, сцена на воде и интерактивная культурная программа на набережной Нижнего Кабана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://inde.io/article/13454-novoe-mesto-gidrotehnicheskaya-detskaya-ploschadka-tsena-na-vode-i-interaktivnaya-kultumaya-programma-na-naberezhnoy-niznego-kabana>. – Дата доступа: 16.12.2023.
3. Возвращаясь к напечатанному: набережная Пуэрто-Вальярта (Мексика) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arch-sochi.ru/2014/08/vozvrashhayas-k-napechatannomu-naberezhnaya-puerto-valyarta-meksika/>. – Дата доступа: 16.12.2023.
4. Защита от наводнений: набережная по проекту Zaha Hadid Architects в Гамбурге [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.admagazine.ru/architecture/zaschita-ot-navodnenij-naberezhnaya-po-proektu-zaha-hadid-architects-v-gamburgue>. – Дата доступа: 18.12.2023.
5. Савельев, М. В. Принципы формирования городских набережных как комфортной общественной рекреационной среды / М. В. Савельев, М. Д. Роман, Н. В. Бондарь // Вестник Томского государственного университета. Культурология и искусствоведение. – Томск, 2020. – № 40. – С. 108–121.

6. Принципы формирования городских общественных рекреационных зон набережных территорий / М. В. Савельев [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Культурология и искусствоведение. – Томск, 2019. – № 33. – С. 173–188.
  7. Спирина, О. Экоберег. Ревитализация прибрежного парка отдыха в городе Салават [Электронный ресурс] / О. Спирина, А. Куликова // Архйорт : ежегодн. интернет-изд. – 2016. – Режим доступа: <http://archyort.ru/article/view/4493>. – Дата доступа: 20.12.2023.
- References**
1. Revitalizaciya istoricheskogo centra goroda Tula [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://wowhaus.ru/urbanistics/tulskaya-naberezhnaya.html>. – Data dostupa: 16.12.2023.
  2. Novoe mesto. Gidrotekhnicheskaya detskaya ploshchadka, scena na vode i interaktivnaya kulturnaya programma na naberezhnoj Nizhnego Kabana [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://inde.io/article/13454-novoe-mesto-gidrotekhnicheskaya-detskaya-ploshchadka-stsena-na-vode-i-interaktivnaya-kulturnaya-programma-na-naberezhnoj-nizhnego-kabana> – Data dostupa: 16.12.2023.
  3. Vozvrashchayas' k napechatannomu: naberezhnaya Puerto-Val'yarta (Meksika) [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://arch-sochi.ru/2014/08/vozvrashhayas-k-napechatannomu-naberezhnaya-puerto-valyarta-meksika/>. – Data dostupa: 16.12.2023.
  4. Zashchita ot navodnenij: naberezhnaya po proektu Zaha Hadid Architects v Gamburgue [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.admagazine.ru/architecture/zashchita-ot-navodnenij-naberezhnaya-po-proektu-zaha-hadid-architects-v-gamburgue>. – Data dostupa: 18.12.2023.
  5. Savel'ev, M. V. Principy formirovaniya gorodskih naberezhnyh kak komfortnoj obshchestvennoj rekreacionnoj sredy / M. V. Savel'ev, M. D. Roman, N. V. Bondar' // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Kul'turologiya i iskusstvovedenie. – Tomsk, 2020. – № 40. – S. 108–121.
  6. Principy formirovaniya gorodskih obshchestvennyh rekreacionnyh zon naberezhnyh territorij / M. V. Savel'ev [i dr.] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Kul'turologiya i iskusstvovedenie. – Tomsk, 2019. – № 33. – S. 173–188.
  7. Spirina, O. Ekobereg. Revitalizaciya pribreznogo parka otdyha v gorode Salavat [Elektronnyj resurs] / O. Spirina, A. Kulikova // Arhjord : ezhegodn. internet-izd. – 2016. – Rezhim dostupa: <http://archyort.ru/article/view/4493>. – Data dostupa: 20.12.2023.

*Материал поступил 15.01.2024, одобрен 28.01.2024, принят к публикации 28.01.2024*

УДК 624.012.35(043.3)

## МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ БАЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ С ПРОДОЛЬНОМ И ПОПЕРЕЧНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

П. В. Кривицкий<sup>1</sup>, А. А. Невдах<sup>2</sup>, И. В. Ткачук<sup>3</sup>, Е. В. Шелест<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> Магистр технических наук, младший научный сотрудник отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве», УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: alina.nevdah@mail.ru

<sup>3</sup> Инженер отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве», УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vany\_tkachuk@mail.ru

<sup>4</sup> Магистр технических наук, младший научный сотрудник отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве», УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: shelest.elena@list.ru

### Реферат

В мировой практике все чаще при строительстве зданий и сооружений гражданского назначения, а также транспортной инфраструктуры применяются конструкционные легкие бетоны, в частности керамзитобетон. Несмотря на то, что легкие бетоны обладают сочетанием высоких физико-механических и эксплуатационных показателей, не прекращаются исследования по определению отличительных особенностей в сопротивлении воздействиям элементов из конструкционных легких бетонов и бетонов нормального веса.

В статье рассматриваются вопросы сопротивления срезу железобетонных балочных элементов из легких конструкционных бетонов. Выполнен анализ существующих моделей сопротивления срезу, используемых в отечественной и зарубежной нормативной литературе. Сформирована база данных результатов экспериментальных исследований железобетонных балок из легких бетонов при различных параметрах вариации механических характеристик материалов и конструктивных параметров образцов.

**Ключевые слова:** легкие конструкционные бетоны, бетон нормального веса, сопротивление срезу, база экспериментальных данных, керамзитобетон, прочность бетона на сжатие.

### LIGHTWEIGHT CONCRETE BEAM ELEMENTS SHEAR RESISTANCE MODELS WITH LONGITUDINAL AND TRANSVERSE REINFORCEMENT

P. V. Krivitskiy, A. A. Nevдах, I. V. Tkachuk, H. V. Shelest

### Abstract

In world practice, structural lightweight concretes, in particular, expanded clay concrete, are increasingly used in the construction of civil buildings and structures and also transport infrastructure. Despite the fact that lightweight concretes have a combination of high physical, mechanical and operational parameters, studies on the determination of different features in the resistance to the effects of elements from structural light concretes and concretes of normal weight do not stop.

The article discusses the issues of shear resistance of reinforced concrete beam elements made of lightweight structural concretes. Analysis of existing shear resistance models used in domestic and foreign regulatory literature was performed. Database results of experimental studies of reinforced concrete beams made of lightweight concretes with different parameters of variation of mechanical characteristics of materials and structural parameters of samples has been formed.

**Keywords:** lightweight structural concretes, normal weight concrete, shear resistance, experimental database, expanded clay concrete, compressive strength of concrete.

### Введение

Легкие конструкционные бетоны представляют собой перспективные строительные материалы, которые обладают рядом преимуществ перед бетонами нормального веса (тяжелыми бетонами). Из основных можно выделить: уменьшенный собственный вес получаемых конструкций, более высокая призмная (характеристическая) прочность на сжатие, улучшенные физические (теплоизоляционные, звукоизоляционные) свойства, улучшенное сцепление с арматурой, более высокая устойчивость к образованию микротрещин и превосходящие показатели предельной растяжимости и сжимаемости. В Республике Беларусь популярным заполнителем для легкого бетона служит керамзит. Он является хорошим конструкционным материалом, обладает большой прочностью на сжатие и большим количеством замкнутых пор.

Исследование внедрения легких бетонов, в частности керамзитобетона, производимого в Республике Беларусь, заслуживает особого внимания по ряду ключевых причин. Во-первых, уникальное сочетание геологических условий и доступность качественного керамзита в нашем регионе создают идеальные предпосылки для производства высокопрочного и экологически чистого легкого бетона. Во-вторых, применение передовых технологий производства на местных предприятиях позволяет добиться оптимальных характеристик бетона, таких как высокая прочность на сжатие и улучшенные физические свойства, что делает его более эффективным и долго-

вечным материалом для строительства в условиях переменного климата Республики Беларусь.

В современных зарубежных и отечественных нормах влияние на сопротивление срезу балочных конструкций из легких бетонов учтено только лишь понижающими коэффициентами и существенными ограничениями прочности бетона на сжатие (растяжение). При этом особенности структуры легких бетонов могут не только сказаться на предельном перерезывающем усилии, но также существенно повлиять на характер трещинообразования и разрушения железобетонной конструкции.

### Модели сопротивления срезу

На сопротивление срезу железобетонных балок влияют различные конструктивные параметры: геометрические характеристики сечения (рабочая высота сечения, пролет среза, коэффициент продольного армирования, наличие и количество поперечного армирования, предварительное обжатие бетона), тип нагрузки (сосредоточенная, равномерно распределенная) и характеристики материалов (прочностные и деформационные характеристики бетона, вид заполнителя). Существующие в научной практике модели по-разному учитывают влияние данных параметров, поэтому в большинстве современных строительных норм используются различные допущения, предпосылки, подходы и расчетные уравнения для определения сопротивления срезу.

За последние несколько десятилетий было выполнено большое количество как аналитических, так и экспериментальных исследований в области работы железобетонных конструкций при срезе. Однако среди них не так много исследований, посвященных сопротивлению срезу железобетонных балок из легких бетонов. Ранние экспериментальные исследования показали, что, несмотря на многие преимущества конструкций из легких бетонов, их сопротивление срезу, как правило, ниже, чем конструкций из бетонов нормального веса, при прочих равных условиях. Как результат, для учета различий в физико-механических характеристиках легких бетонов в сравнении с бетонами нормального веса в нормативно-технической литературе предлагают вводить понижающие коэффициенты и ограничения при расчете конструкций.

Большинство понижающих коэффициентов связано с учетом изменения (уменьшения) плотности легкого бетона и, в меньшей степени, с составом бетона. Данные ограничения могут существенно занижать реальные прочностные характеристики легкого бетона и требуют дополнительного анализа. Появление новых легких заполнителей, а также постоянные улучшения физико-механических характеристик известных заполнителей для легких бетонов и расширение сферы применения данных заполнителей в строительстве увеличивают необходимость в дополнительном изучении сопротивления срезу конструкций, изготовленных из легких бетонов. За счет оптимизации состава, введения новых добавок и модификаторов, а также благодаря улучшению технологий производства и обработки материалов можно значительно улучшить физико-механические свойства легких бетонов.

В работе выполнен обзор «механических» и «эмпирических» подходов и моделей к определению и анализу сопротивления срезу железобетонных балочных конструкций. Механические модели традиционно базируются на аналитических зависимостях и положениях, позволяющие учитывать в полной мере механические свойства материалов. С другой стороны, эмпирические модели разрабатываются на основе анализа экспериментальных данных и часто применя-

ются для оценки конкретных расчетных ситуаций, таких как работа бетона при срезе. В отличие от механических, эмпирические модели могут напрямую учитывать особенности сопротивления конструкций из легких бетонов, включая эффекты, связанные с типом и свойствами заполнителей, в частности керамзитобетона.

Понимание механизмов передачи среза между материалами в железобетонных конструкциях является ключом к получению оптимальной модели сопротивления срезу балочных элементов из легких бетонов. Различные подходы, используемые в механических и эмпирических моделях, указывают на множество факторов, влияющих на сопротивление конструкций. В большинстве своем модели сопротивления срезу включают в себя следующий минимум составляющих: усилие в сжатом бетоне над наклонной трещиной, усилие в продольной арматуре (нагельный эффект), силы зацепления по берегам трещины, усилие в поперечной арматуре (при ее наличии) – взаимосвязь между которыми до конца не изучена.

Анализ экспериментальных данных показывает, что вид бетона значительно влияет на характер трещинообразования и разрушения железобетонных балок. В балках из легких бетонов существует тенденция развития трещин с шероховатыми краями, проходящих через цементный камень (матрицу) и заполнитель. Также такие балки без поперечного армирования склонны к хрупкому разрушению по сжатой бетонной полосе. Использование поперечного армирования значительно повышает сопротивление срезу железобетонных балок, однако данное утверждение требует дополнительного детального изучения путем выполнения натуральных экспериментальных исследований.

Представленный обзор моделей сопротивления срезу железобетонных балок охватывает широкий спектр подходов и методик, разработанных на основе, как теоретических исследований, так и экспериментальных данных. В таблице 1 представлены модели, описанные в отечественных и зарубежных строительных нормах и стандартах, учитывающие особенности напряженно-деформированного состояния легких бетонов при действии нагрузки.

Таблица 1 – Расчетные модели для определения сопротивления сечений срезу железобетонных элементов

Источник	Условие сопротивления сечения	Примечание
СП 5.03.01-2020 [1], ТКП EN 1992-1-1-2009 [2]	$V_{Ed} \leq V_{Rd,sy}, V_{Ed} \leq V_{Rd,max};$ $V_{Rd,max,comp} = \alpha_c V_{Rd,max};$ $V_{Rd,max} = b_w z v_1 f_{lck} / (\cot \theta + \tan \theta);$ $V_{Rd,sy} = A_{sw} / s \cdot z f_{ywd} \cot \theta \text{ при}$ $\begin{cases} A_{sw,max} f_{ywd} / (b_w s) \leq 0,5 v_1 f_{lck} \text{ по [1]} \\ A_{sw,max} f_{ywd} / (b_w s) \leq 0,5 \alpha_c v_1 f_{lck} \text{ по [2]}. \end{cases}$	$v_1 = 0,5 \eta_1 (1 - f_{lck} / 250);$ $\eta_1 = 0,40 + 0,60 \rho_{LC} / 2200 \text{ по [1],}$ $\eta_1 = 1 \text{ по [2]}$ $f_{lck} = k_{lck} f_{lck} / \gamma_c; f_{ywd} = 0,8 f_{yk};$ $z = 0,9d.$
СНиП 2.03.01-84 [3], СП 63.13330.2018 [4]	$Q \leq 0,3 \varphi_{w1} \varphi_{b1} R_b b h_0,$ $Q \leq Q_b + Q_{sw};$ $Q_b = (\varphi_{b2} (1 + \varphi_f + \varphi_n) R_{bt} b h_0^2) / c \geq$ $\geq \varphi_{b3} (1 + \varphi_f + \varphi_n) R_{bt} b h_0;$ $Q_b \leq 2,5 R_{bt} b h_0 \text{ по [4];}$ $Q_{sw} = \varphi_{sw} q_{sw} c_0.$	$\varphi_{b1} = 1 - \beta R_b \text{ по [3], } \varphi_{b1} = 1 \text{ по [4];}$ $\varphi_f = 0,75 (b'_f - b) h'_f / (b h_0) \leq 0,5;$ $b'_f \leq b + 3 h'_f; \varphi_n = 0,1 \frac{N}{R_{bt} b h_0} \leq 0,5;$ $1 + \varphi_f + \varphi_n \begin{cases} = 1 \text{ по [3]} \\ \leq 1,5 \text{ по [4]} \end{cases};$ $\varphi_{w1} = 1 + 5 \alpha \mu_w \leq 1,3 \text{ по [3],}$ $\varphi_{w1} = 1 \text{ по [4];}$ $q_{sw} = R_{sw} A_{sw} / s \geq [\varphi_{b3} (1 + \varphi_n + \varphi_f) R_{bt} b] / 2.$
Model Code 2010, fib Bulletin 56 [5]	$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} \geq V_{Ed};$	$z = 0,9d; \rho_w \geq 0,08 \sqrt{f_{lck}} / f_{yk};$

Продолжение таблицы 1

	$V_{Rd,max} = k_c f_{lck} / \gamma_c \cdot b_w z \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta};$ $V_{Rd,c} = k_v \sqrt{f_{lck}} / \gamma_c \cdot z b_w;$ $V_{Rd,s} = A_{sw} / s_w \cdot z f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha;$ <p>III Уровень аппроксимации</p> $\theta = 29^\circ + 7000 \varepsilon_x;$ $k_c = 0,55 (30 / f_{lck})^{1/3} \leq 0,55;$ $k_v = 0,4 / (1 + 1500 \varepsilon_x) \times$ $\times 1300 / (1000 + 0,7 k_{dg} z) \text{ при } \rho_w = 0;$ $k_v = 0,4 / (1 + 1500 \varepsilon_x) \text{ при}$ $\rho_w \geq 0,08 \sqrt{f_{lck}} / f_{yk};$ $k_{dg} = 48 / (16 + d_g) \geq 1,15.$	$\varepsilon_x = \frac{M_{Ed} / z + V_{Ed} + 0,5 N_{Ed} - A_p f_{p0}}{2(E_s A_s + E_p A_p)};$ $\Delta F_{td} = V_{Ed} / 2(\cot \theta - \cot \alpha) +$ $+ V_{Rd,c} / 2(\cot \theta + \cot \alpha).$
<p>ACI 318-19 [6]</p>	$V_n = V_c + V_s;$ $V_u \leq \phi(V_c + 0,66 \sqrt{f'_c} b_w d);$ <p>при <math>A_v \geq A_{v,min}</math> любое из</p> $V_c = [0,17 \lambda \sqrt{f'_c} + N_u / (6A_g)] b_w d,$ $V_c = [0,66 \lambda (\rho_w)^{1/3} \sqrt{f'_c} + N_u / (6A_g)] b_w d;$ <p>при <math>A_v &lt; A_{v,min}</math></p> $V_c = [0,66 \lambda_s \lambda (\rho_w)^{1/3} \sqrt{f'_c} + N_u / (6A_g)] b_w d;$ $V_c < 0,42 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d;$ <p>при <math>V_u &gt; \phi V_c, V_s \geq V_u / \phi - V_c;</math></p> $V_s = A_v f_{yr} d / s,$ $V_s = A_v f_{yr} (\sin \alpha + \cos \alpha) d / s - \text{при}$ <p>наклонной поперечной арматуре.</p>	$\frac{N_u}{6A_g} < 0,05 f'_c;$ $\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + 0,004d}} \leq 1;$ $\frac{V_u d_p}{M_u} = \frac{d_p (l - 2x)}{x(l - x)} \text{ при } d_p \geq 0,8h;$ $\frac{A_v}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{yr} d}.$
<p>BS 8110-1:1997 [7]</p>	$v = V / (b_v d) \leq v_{Rd} = v'_c + v_s;$ $v'_c = v_c + 0,6 N V h / (A_c M);$ $v_s = 0,4 \text{ при } 0,5 v_c < v < (v_c + 0,4),$ $v_s = v - v_c = 0,95 f_y A_{sw} / (b_w s) \text{ при}$ $(v_c + 0,4) < v < 5 \text{ и } v < 0,8 \sqrt{f_{cu}}.$	$100 \cdot A_s / (b_v d); N h / M \leq 1,0;$ $\sum A_{sv} = a_v b_v (v - 2 d v_c / a_v) / 0,95 f_{yv} \geq$ $\geq 0,4 b_v a_v / 0,95 f_{yv}.$
<p>CSA A23.3-04 [8]</p>	$V_{sd} \leq V_r = V_c + V_s + V_p \leq$ $\leq V_{r,max} = 0,25 \phi_c f'_c b_w d_v + V_p;$ $V_c = \phi_c \lambda \beta \sqrt{f'_c} b_w d_v;$ $V_s = \phi_s A_v f_y d_v (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha / s.$	$\phi_c = 0,65, \phi_s = 0,85;$ $\theta = 29^\circ + 7000 \cdot \varepsilon_x \leq 75^\circ;$ $\beta = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot \varepsilon_x} \cdot \frac{1300}{1000 + s_{ze}};$ $\varepsilon_x = \frac{M_f / d_v + V_f - V_p + 0,5 N_f - A_p f_{p0}}{2(E_s A_s + E_p A_p)}.$

Продолжение таблицы 1

<p>JSCE №15 [9]</p>	$V_{Sd} \leq V_{yd} = V_{cd} + V_s + V_{ped} \leq$ $\leq V_{cwd} = f_{cwd} \cdot b_w \cdot d;$ $V_{sd} = [A_{sw} \cdot f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / S_s] +$ $+ A_{pw} \sigma_{pw} (\sin \alpha_p + \cos \alpha_p) / s_p \cdot z / \gamma_b.$	$f_{vcd} = 0,20 \cdot \sqrt[3]{f'_{cd}} \leq 0,72;$ $\rho_w = A_s / (b_w \cdot d);$ $\beta_d = \sqrt[4]{1000 / d} \leq 1,5; \beta_p = \sqrt[3]{100 \rho_w} \leq 1,5;$ $\beta_n = 1 + 2M_0 / M_{ud} \leq 2;$ $z = d / 1,15.$
<p>NZC 3101-1 [10]</p>	$V_{Sd} \leq V_n = V_c + V_s;$ $V_c = v_c A_{cv};$ $v_c = k_d k_a v_b;$ $V_s = f_{yt} A_v / s \cdot d (\sin \alpha + \cos \alpha).$	$v_b = \min \left\{ \begin{array}{l} (0,07 + 10 \rho_w) \sqrt{f'_c} \\ 0,2 \sqrt{f'_c} \end{array} \right., \text{ но не менее,}$ <p>чем <math>0,08 \sqrt{f'_c}</math>.</p>
<p>K.-K. Choi, J.-C. Kim, H.-G. Park [11]</p>	$V_{Sd} \leq V_n = V_{ct} + V_{cc} + V_a + V_s;$ $V_{ct} = k_s f_t b (c - c_c) \cot \theta_c;$ $V_{cc} = \sqrt{f'_c (f'_c - \sigma_{cc})} b c_c;$ $V_a = (f_t / 2) b l_{cr} \cos \theta_t;$ $V_s = \rho_v f_{yt} b (d - c) \tan \theta_t.$	$f_t = 0,21 \sqrt{f'_c};$ $k_s = 1,2 - 0,2a \geq 0,65;$ $c_c = c - (a - x_1 - d + c);$ $\rho_v = A_{sv} / (bs).$

В действующих отечественных нормах [1, 2] оценку сопротивления срезу железобетонных элементов из легких бетонов предлагается выполнять посредством не только замены соответствующего показателя прочности бетона на сжатие, а применение понижающего коэффициента  $V_1$  (коэффициента разупрочнения), учитывающего особенности напряженно-деформированного состояния бетона на участках между наклонными трещинами. При определении коэффициента  $V_1$  используются параметры, характеризующие физико-механические характеристики легких бетонов:

$\rho_{LC}$  – верхнее значение плотности для класса легкого бетона по плотности, кг/м<sup>3</sup>;

$f_{lck}$  – характеристическая прочность на осевое сжатие легкого бетона.

Так же при определении расчетной прочности на сжатие легких бетонов применяется коэффициент  $k_{lrc}$ , учитывающий влияние на прочность на сжатие легкого бетона длительности действия нагрузки, неблагоприятного способа ее приложения и т. п. Значение  $k_{lrc}$  рекомендуется определять

$$k_{lrc} = \begin{cases} \left( \frac{\rho_{LC}}{2200} \right)^{0,25} no [1] \\ 0,85 no [2] \end{cases} \quad (1)$$

В нормативных документах [3, 4] учет особенностей сопротивления срезу железобетонных балочных элементов из легких бетонов предлагается выполнять с применением сразу несколько коэффициентов:

$\beta$  – коэффициент, принимаемый для легкого бетона 0,02;

$\Phi_{b_2}$  – коэффициент, учитывающий влияние бетона, принимается равным:

– по [4]: 1,5;

– по [3] для легкого бетона при марке по средней плотности:

D1900 и более – 1,90;

D1800 и менее при плотном мелком заполнителе – 1,75;

$\Phi_{b_3}$  – коэффициент, принимается равным:

– по [4]: 0,5;

– по [3] для легкого бетона при марке средней плотности:

D1900 и более – 0,5;

D1800 и менее – 0,4.

В *Model Code 2010 fib Bulletin 56* [5] при определении сопротивления срезу конструкций из легких бетонов предлагается заменять в аналитических зависимостях, применимых для элементов из бетона нормального веса, только характеристическое значение прочности бетона на сжатие на значение  $f_{lck}$ , указанное в *Model Code 2010 fib Bulletin 55* [12].

В *ACI 318-19* [6] представлен коэффициент модификации  $\lambda$ , отражающий пониженные механические характеристики легкого бетона по сравнению с бетонами нормального веса (тяжелыми бетонами) с той же прочностью на сжатие. Данный коэффициент определяется на основе плотности бетонной смеси (таблица 19.2.4.1 (а) [6]) или на основе состава заполнителей бетонной смеси (таблица 19.2.4.1(b) [6]). Допускается принимать  $\lambda$  равным 0,75 для легких бетонов.

Британские нормы [7] предусматривают ограничение для расчетного напряжения среза бетона  $V_c$ . Для принятых в [7] марок бетона 25 и более данное значение следует принимать с понижающим коэффициентом 0,8 к значениям, приведенных в таблице 3.8 стандарта *BS 8110-1:1997* [7]. Для бетона марки 20 следует использовать значения, приведенные в таблице 5.3 *BS 8110-2:1985* [13]. Напряжение среза  $V$  не должно превышать меньшее значение  $0,63 \sqrt{f_{cu}}$  или 4 МПа.

В *CSA A23.3-04* [8] оценку изгибаемых железобетонных элементов из легких бетонов предлагается выполнять с применением коэффициента модификации плотности бетона  $\lambda$ . Данный коэффициент принимается от 0,75 до 0,85 для легких бетонов и может интерполироваться в пределах указанных значений.

В JSCE №15 [9] указано ограничение прочности бетона на сжатие для железобетонных элементов из легких бетонов: если фактические данные по прочности отсутствуют, расчетную прочность допускается принимать равной 70 % от расчетной прочности бетона нормального веса соответствующего класса.

Новозеландский стандарт проектирования бетонных конструкций [10] предусматривает корректировку заданной прочности бетона на сжатие  $\sqrt{f'_c}$  для конструкций из легких бетонов: если известно значение средней прочности на растяжение бетона с легким заполнителем  $f_{ct}$  и бетонная смесь выполнена согласно требованиям NZS 3152 [14], то  $\sqrt{f'_c}$  допускается принимать  $1,8f_{ct} \leq \sqrt{f'_c}$ ; если значение  $f_{ct}$  не известно, то принимается значение от  $0,75\sqrt{f'_c}$  до  $0,85\sqrt{f'_c}$  в зависимости от структуры легкого бетона.

К.-К. Choi, J.-С. Kim, H.-G. Park [11] была предложена унифицированная модель для железобетонных балочных элементов независимости от вида бетона, учитывающая сразу несколько составляющих, участвующих в сопротивлении срезу. Несмотря на универсальность данной модели, требуется ее корректировка и дополнение для учета особенностей сложного напряженно-деформированного состояния элементов из легких бетонов на участках возможного разрушения из-за среза. На рисунке 1 представлена схема распределения внутренних усилий данной модели.

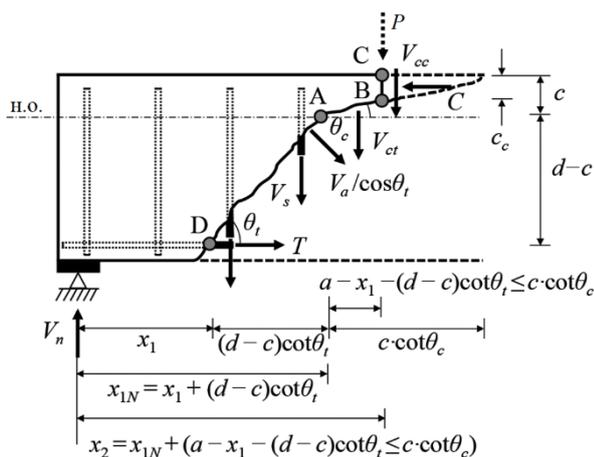


Рисунок 1 – Схема усилий в наклонном сечении железобетонной балки в модели [11]

Представленный обзор моделей сопротивления срезу [1–11] выступает базой для последующей верификации и определения возможности их применения при оценке сопротивления срезу балочных элементов из легких бетонов. Анализ взаимосвязи и особенностей учета ряда параметров, определяющих различия в составах бетонов, влияющих на сопротивление срезу, указывает на сложность проектирования железобетонных конструкций из легких бетонов и важность исследования данного вопроса.

Таблица 2 – Размеры и характеристики экспериментальных образцов из легкого бетона

Автор	Кол-во образцов	b, мм	h, мм	d, мм	a/d	$\rho_s, \%$	$\rho_{st}, \%$	$f'_c, \text{МПа}$
M. J. Heiser, A. Hosny, S. H. Rizkalla, P. Zia [15]	6	305	457	405	3	1,22	0–0,5	28,6–46,5
X. M. Аль-Хужейри [16]	24	80	120	100	2,5	3,21	0–0,75	13,3–19,3
К.-Н. Yang, J.-I. Sim, B.-J. Choi, E.-T. Lee [17]	8	200	400	360	2,5	4,95	–	31,2–37,4
D. L. Ivey, E. Buth [18]	23	108–225	229–457	188–395	2,0–5,0	0,95–2,1	–	19,2–29,6
J. A. Hanson [19]	19	152,4	304,8	266,7	3,05	2,5–5,0	–	20,6–73,6
T. H.-K. Kang, W. Kim, Y.-K. Kwak, S.-G. Hong [20]	9	125	250	210	2,0–4,9	1,29	0–0,75	39,6–47,7
Итого	89							

### База экспериментальных данных

Для верификации рассмотренных выше моделей сформирована база данных результатов испытаний балочных опытных образцов зарубежных и отечественных исследователей. База включает в себя железобетонные балки с различными видами бетонов на легких крупных заполнителях (керамзит, вспученный сланец, вспученный доменный сланец и др.), схемами армирования и типом нагружения. Все опытные образцы, включенные в базу (таблица 2), имеют прямоугольную форму поперечного сечения.

При анализе экспериментальных образцов учитывались основные параметры испытанных балок, влияющие на сопротивление срезу:

- 1) эффективная (рабочая) высота сечения  $d$ , мм;
- 2) пролет среза  $a/d$ ;
- 3) коэффициент продольного армирования  $\rho_s, \%$ ;
- 4) коэффициент поперечного армирования  $\rho_{sw}, \%$ ;
- 5) прочность бетона при сжатии  $f'_c, \text{МПа}$ .

Принимая во внимание, что база была сформирована на основе экспериментальных данных различных авторов, каждая группа образцов имеет свой ряд варьируемых параметров.

Для экспериментальных образцов, представленных в данной базе, использовались следующие схемы нагружения, показанные на рисунке 2.

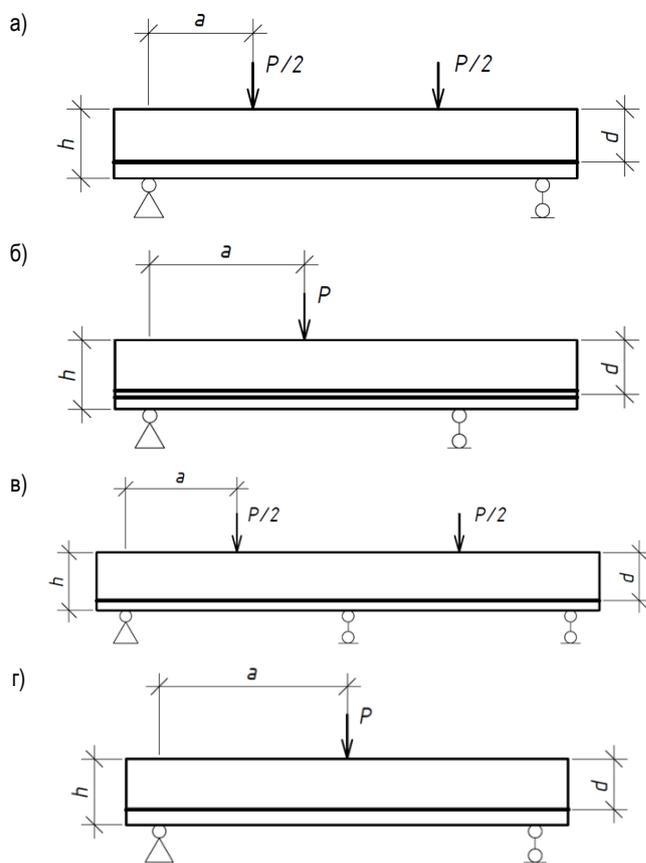


Рисунок 2 – Схемы нагружения образцов

В работе *M. J. Heiser [et al.] [15]* в качестве опытных образцов применялись балки прямоугольного сечения с геометрическими размерами 305 × 457 мм, выполненные из легкого бетона на вспученном сланце в качестве крупного заполнителя. Оценка трещинообразования и разрушения производилась на шести опытных балках. Схема нагружения экспериментальных образцов, представленная авторами [15], показана на рисунке 2б. Принятая схема нагружения балок соответствовала испытаниям образцов с  $a/d$  равным 3,0. В качестве варьируемого параметра выступал коэффициент продольного армирования  $\rho_s$  (от 0 до 0,5 %).

В работе *X. M. Аль-Хужейри [16]* собрана база образцов, в которых рассматривается влияние армирования из базальтовой фибры (волокна) на прочность и трещиностойкость наклонных сечений керамзитожелезобетонных балок при наличии и отсутствии поперечного армирования. В качестве опытных образцов использовались балки прямоугольного поперечного сечения с размерами 80 × 120 мм и длиной 1500 мм. Схема испытания представлена на рисунке 2а. К опытным образцам прикладывалась кратковременная нагрузка двумя симметрично расположенными сосредоточенными силами, приложенными на расстоянии 250 мм от оси опоры ( $a/d$  более 2,0). Каждая балка испытывалась дважды (второй раз после усиления разрушенного участка), что позволяло выполнить 24 экспериментальных исследования.

Авторами *K.-H. Yang, J.-I. Sim, B.-J. Choi, E.-T. Lee [17]* было испытано 12 балок, чтобы установить влияние максимального размера крупного заполнителя на поведение железобетонных балок при срезе. В результате испытаний было получено, что сопротивление срезу многопролетных балок из легкого бетона увеличивалось с увеличением максимального размера крупного заполнителя. 12 образцов были разделены на три группы в зависимости от типа бетона: полностью легкий бетон (ALWC), выполненный из крупного и мелкого заполнителя из керамзитового гравия, легкий бетон (SLWC), выполненный только из керамзитового песка, и бетон нормального веса (NWC) на гранитном щебне и кварцевом песке. Образцы имели размер поперечного сечения 200 × 400 мм. Схема нагружения экспериментальных образцов, представленная авторами [17], указана на рисунке 2в. Максимальный размер заполнителя  $d_a$  варьируется от 4 до 19 мм в каждой группе. Отношение рабочей высоты балки к максимальному размеру крупного заполнителя  $d/d_a$  варьируется в пределах от 18,9 до 90.

*D. L. Ivey, E. Buth [18]* в своей работе рассматривают результаты испытаний 26 балок из конструкционного легкого бетона. В качестве варьируемых параметров были приняты пролет среза  $a/d$  (от 2,0 до 5,0), процент продольного армирования  $\rho_s$  (от 0,95 до 2,10) и тип заполнителя (керамзит, вспученный сланец, вспученный доменный сланец). Двадцать три из двадцати шести испытанных балок имели размеры 152 × 305 мм в поперечном сечении. Схема испытания данных образцов представлена на рисунке 2а. Остальные три балки были выполнены сечением 108 × 229 мм, 191 × 381 мм и 225 × 457 мм и испытывались согласно схеме нагружения, представленной на рисунке 1(г).

Автором *J. A. Hanson [19]* приведены результаты испытаний 21 железобетонного балочного образца. Все образцы были выполнены сечением с размерами 152,4 × 304,8 мм. Схема нагружения образцов представлена на рисунке 2а. Варьируемыми параметрами являлись коэффициент продольного армирования  $\rho_s$  (от 2,5 до 5,0 %) и использование разных видов крупного и мелкого заполнителей, таких как вспученный сланец, керамзит, вспученный доменный шлак, углеродсодержащий сланец.

В статье *T. H.-K. Kang, W. Kim, Y.-K. Kwak, S.-G. Hong [20]* приводятся испытания 12 балок двумя сосредоточенными нагрузками, включая девять балок из легкого бетона с поперечным армированием и три балки из тяжелого бетона. Все образцы были одинакового поперечного сечения 125 × 250 мм. Схема испытания балок показана на рисунке 2а. Варьируемыми параметрами являлись коэффициент продольного армирования  $\rho_s$  (от 0 до 0,75 %) и пролет среза  $a/d$  (от 2,0 до 4,9).

## Заключение

Сопротивление срезу железобетонных балок определяется множеством факторов, начиная от геометрических размеров и заканчивая типом нагрузки и свойствами материалов. И, несмотря на то, что железобетонные элементы из легких бетонов обладают множеством преимуществ, они, как правило, показывают меньшее сопротивление срезу по сравнению с конструкциями из тяжелого бетона. Эта особенность требует ввода понижающих коэффициентов [1–10], что не всегда адекватно описывает действительную работу элементов из легких бетонов.

Выполнена оценка существующих моделей сопротивления срезу, представленных в зарубежных и отечественных нормах и стандартах, с учетом особенностей физико-механических характеристик легких бетонов. Для анализа моделей была сформирована база экспериментальных образцов, которые имели различный состав легких бетонов, геометрические характеристики и тип нагружения. Исследование влияния данных параметров, а также дальнейшее изучение характера трещинообразования и разрушения экспериментальных образцов, улучшат понимание сопротивления срезу железобетонных балок из легких бетонов и способствует разработке их методики расчета.

## Список цитированных источников

1. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 20.05.2022. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2022. – 244 с.
2. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1–1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1992-1-1-2009. – Введ. 01.09.2019. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2021. – 310 с.
3. Бетонные и железобетонные конструкции : СНиП 2.03.01-84. – Введ. 01.01.1986 (с отменой на территории РБ). – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. – 82 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 63.13330.2018. – Введ. 20.06.2019. – М. : АО «НИЦ «Строительство», 2019. – 124 с.
5. Model Code 2010. First complete draft. Volume 2. fib Bulletin No. 56, Lausanne, 2010. – 293 p.
6. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19), Michigan, 2019. – 628 p.
7. Structural use of Concrete – Part 1: Code of practice for design and construction. BS 8110-1:1997, London, 1997. – 160 p.
8. Design of concrete structures. CSA A23.3-04, Canada, 2004. – 232 p.
9. Standard specifications for concrete structures – 2007. “Design”. JSCE Guidelines for concrete No. 15, Japan, 2007. – 502 p.
10. Concrete structures standard – The design of concrete structures. NZC 3101-1, Wellington, 2006. – 309 p.
11. Shear Strength Model of Concrete Beams Based on Compression Zone Failure Mechanism / K.-K. Choi, J.-C. Kim, H.-G. Park. – Michigan : ACI Structural Journal, September 1, 2016. – P. 1095–1119.
12. Model Code 2010. First complete draft. Volume 1. fib Bulletin No. 55, Lausanne, 2010. – 297 p.
13. Structural use of Concrete – Part 2: Code of practice for special circumstances. BS 8110-2:1985, London, 1985. – 68 p.
14. Specification for the manufacture and use of structural and insulating lightweight concrete – Metric Units. NZS 3152:1974, Wellington, 1974. – 23 p.
15. Bond and shear behavior of concrete beams containing lightweight synthetic particles / M. J. Heiser [et al.]. – Michigan : ACI Structural Journal, November 1, 2011. – P. 698–705.
16. Аль-Хужейри, X. M. Прочность и трещиностойкость наклонных сечений керамзитожелезобетонных балок и их прогибы с учетом сдвиговых деформаций : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / X. M. Аль-Хужейри ; Ростовский гос. строит. ун-т. – Воронеж, 1997. – 27 с.
17. Effect of aggregate size on shear behavior of lightweight concrete continuous slender beams / K.-H. Yang [et al.]. – Michigan : ACI Structural Journal, September 1, 2011. – P. 501–509.
18. Ivey, D. L. Shear Capacity of Lightweight Concrete Beams / D. L. Ivey, E. Buth. – Michigan : ACI Structural Journal, October, 1967. – P. 634–643.

19. Hanson, J. A. Shear Strength of Lightweight Reinforced Concrete Beams / J. A. Hanson. – Michigan : ACI Structural Journal, March, 1959. – P. 387–404.
20. Shear Testing of Steel Fiber-Reinforced Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcement / T. H.-K. Kang [et al.]. – Michigan : ACI Structural Journal, September 1, 2011. – P. 553–561.
12. Model Code 2010. First complete draft. Volume 1. fib Bulletin No. 55, Lausanne, 2010. – 297 p.
13. Structural use of Concrete – Part 2: Code of practice for special circumstances. BS 8110-2:1985, London, 1985. – 68 p.
14. Specification for the manufacture and use of structural and insulating lightweight concrete – Metric Units. NZS 3152:1974, Wellington, 1974. – 23 p.

#### References

1. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SP 5.03.01-2020. – Vved. 20.05.2022. – Minsk : RUP «Strojtekhnorm», 2022. – 244 s.
2. Evrokod 2. Proektirovanie zhelezobetonnykh konstrukcij. CHast' 1–1. Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy : TKP EN 1992-1-1-2009. – Vved. 01.09.2019. – Minsk : RUP «Strojtekhnorm», 2021. – 310 s.
3. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SNiP 2.03.01-84. – Vved. 01.01.1986 (s otmenoi na territorii RB). – M. : NIIZHB Gosstroya SSSR, 1986. – 82 s.
4. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SP 63.13330.2018. – Vved. 20.06.2019. – M. : AO «NIC «Stroitel'stvo», 2019. – 124 s.
5. Model Code 2010. First complete draft. Volume 2. fib Bulletin No. 56, Lausanne, 2010. – 293 p.
6. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19), Michigan, 2019. – 628 p.
7. Structural use of Concrete – Part 1: Code of practice for design and construction. BS 8110-1:1997, London, 1997. – 160 p.
8. Design of concrete structures. CSA A23.3-04, Canada, 2004. – 232 p.
9. Standard specifications for concrete structures – 2007. "Design". JSCE Guidelines for concrete No. 15, Japan, 2007. – 502 p.
10. Concrete structures standard – The design of concrete structures. NZC 3101-1, Wellington, 2006. – 309 p.
11. Shear Strength Model of Concrete Beams Based on Compression Zone Failure Mechanism / K.-K. Choi, J.-C. Kim, H.-G. Park. – Michigan : ACI Structural Journal, September 1, 2016. – P. 1095–1119.
15. Bond and shear behavior of concrete beams containing lightweight synthetic particles / M. J. Heiser [et al.]. – Michigan : ACI Structural Journal, November 1, 2011. – P. 698–705.
16. Al'-Huzhejri, H. M. Prochnost' i treshchinostojkost' naklonnyh sechenij keramzitofibrozhelzobetonnykh balok i ih progiby s uchetom sdvigovykh deformacij : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.01 / H. M. Al'-Huzhejri ; Rostovskij gos. stroit. un-t. – Voronezh, 1997. – 27 s.
17. Effect of aggregate size on shear behavior of lightweight concrete continuous slender beams / K.-H. Yang [et al.]. – Michigan : ACI Structural Journal, September 1, 2011. – P. 501–509.
18. Ivey, D. L. Shear Capacity of Lightweight Concrete Beams / D. L. Ivey, E. Buth. – Michigan : ACI Structural Journal, October, 1967. – P. 634–643.
19. Hanson, J. A. Shear Strength of Lightweight Reinforced Concrete Beams / J. A. Hanson. – Michigan : ACI Structural Journal, March, 1959. – P. 387–404.
20. Shear Testing of Steel Fiber-Reinforced Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcement / T. H.-K. Kang [et al.]. – Michigan : ACI Structural Journal, September 1, 2011. – P. 553–561.

*Материал поступил 17.03.2024, одобрен 19.03.2024, принят к публикации 19.03.2024*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Д. И. Бочкарев<sup>1</sup>, В. В. Петрусевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Магистр технических наук, доцент кафедры «Военно-специальная подготовка», УО «Белорусский государственный университет транспорта», Гомель, Беларусь

<sup>2</sup> К. т. н., доцент, декан строительного факультета, УО «Белорусский государственный университет транспорта», Гомель, Беларусь, e-mail: petrusevichvvv@gmail.com

### Реферат

Для защиты асфальтобетонных автомобильных дорог в Республике Беларусь от разрушающего воздействия рассмотренных выше факторов необходимо выполнять разработку и осуществлять внедрение новых технологий. Авторами разработан «Гидрофобный состав для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог», который и является одним из возможных вариантов защиты.

Экспериментальные данные, используемые при написании статьи были получены в рамках реализации инновационного проекта «Гидрофобный состав для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог» при финансировании Государственным комитетом по науке и технологиям в ДРСУ-149 КПРСУП «Гомельоблдорстрой» на участке автомобильной дороги четвертой технической категории Н-4321 «Стрешин – Нижняя Олба» протяженностью 2000 м.

В статье представлена теоретическая и экспериментальная взаимосвязь технологических режимов распределения состава гидрофобного профилактического с конструктивными особенностями и техническими характеристиками распределительного устройства, это позволило разработать модернизированную конструкцию устройства для распределения и с помощью моделирования определить и оптимизировать его технические и эксплуатационные характеристики в зависимости от параметров технологического процесса профилактической обработки.

**Ключевые слова:** состав гидрофобный профилактический, моделирование рабочего процесса распределения, асфальтобетонное покрытие, оптимальная толщина слоя покрытия.

## MODELING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF PREVENTIVE TREATMENT OF ASPHALT CONCRETE HIGHWAY PAVEMENTS

D. I. Bochkarev, V. V. Petrusевич

### Abstract

To protect asphalt concrete roads in the Republic of Belarus from the destructive effects of the factors discussed above, it is necessary to develop and implement new technologies. The authors have developed a «Hydrophobic composition for preventive treatment of asphalt concrete pavements of highways», which is one of the possible protection options.

The experimental data used in writing the article were obtained as part of the implementation of the innovative project «Hydrophobic composition for preventive treatment of asphalt concrete pavements of highways» with funding from the State Committee for Science and Technology in DRSU-149 KPRSUP «Gomelobldorstroy» on the section of the fourth highway technical category N-4321 «Streshin – Nizhnaya Olba» with a length of 2000 m.

The article presents the theoretical and experimental relationship of the technological modes of distribution of the hydrophobic preventive composition with the design features and technical characteristics of the distribution device, this made it possible to develop a modernized design of the distribution device and, using modeling, to determine and optimize its technical and operational characteristics depending on the parameters of the technological process of preventive treatment.

**Keywords:** hydrophobic preventive composition, modeling of the distribution workflow, asphalt concrete pavement, optimal thickness of the coating layer.

### Введение

Способность асфальтобетона противостоять воздействию погодноклиматических факторов и транспортных нагрузок, во многом зависит от размера пор, плотности структуры и водоотталкивающих характеристик поверхности. Стойкость и долговечность асфальтобетонного покрытия можно улучшить, используя различные технологические процессы обработки их поверхности. Однако, несмотря на большой выбор, они имеют определенные недостатки [1–4]. Действие одних недолговечно, другие работают при определенных температурах или требуют соблюдения особых условий распределения, хранения и транспортировки применяемых материалов. Для придания асфальтобетону способности противостоять агрессивному влиянию погодноклиматическим факторам и транспортным нагрузкам необходима разработка альтернативных технологий, которые бы обеспечили проникновение в объем материала и заполнение микротрещин и дефектов покрытия, способствуя профилактике начавшихся разрушений и одновременно с этим улучшению эксплуатационных характеристик асфальтобетонного покрытия.

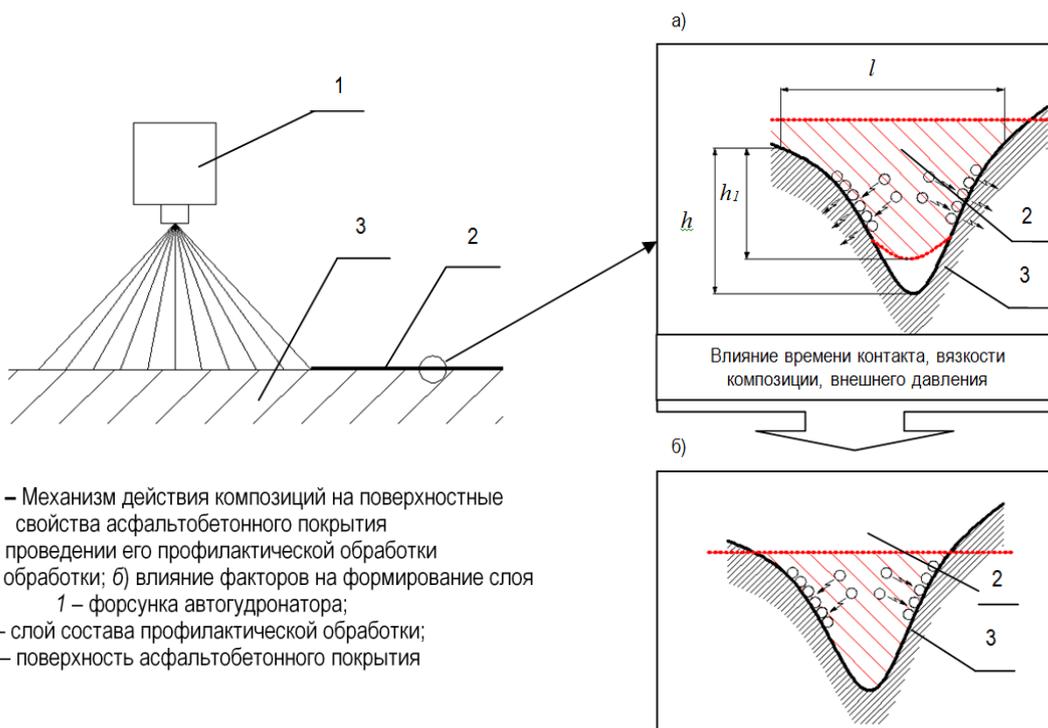
Для реализации предлагаемой технологии авторами разработан «Гидрофобный состав для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог» (далее – СГП) [5].

СГП обеспечивает защиту асфальтобетона путем нанесения на его поверхность защитного слоя, который проникает в его неровности. Формирование площади контакта СГП зависит от времени контакта, вязкости композиции, а также от внешнего давления (рисунок 1).

Результаты исследований, представленные в источниках [7–9] подтверждают, что разработанный СГП снижает водонасыщение и остаточную пористость, а также повышает коэффициент морозостойкости обработанного асфальтобетона.

При этом, чтобы определить указанные выше защитные свойства у запатентованного СГП необходимо выполнить значительный объем подготовительной работы по подбору оптимальной толщины его слоя, которая с одной стороны позволит защитить асфальтобетонное покрытие, а с другой – не будет допущено перерасхода. Исходя из этого, для повышения точности и сокращения времени для подготовки к проведению исследований в статье рассмотрены методы моделирования по определению минимально достаточного слоя СГП.

Целью работы является определение теоретической и экспериментальной взаимосвязи технологических режимов распределения СГП с конструктивными особенностями и техническими характеристиками распределительных устройств.



**Рисунок 1** – Механизм действия композиций на поверхностные свойства асфальтобетонного покрытия при проведении его профилактической обработки  
 а) слой после обработки; б) влияние факторов на формирование слоя  
 1 – форсунка автогудронатора;  
 2 – слой состава профилактической обработки;  
 3 – поверхность асфальтобетонного покрытия

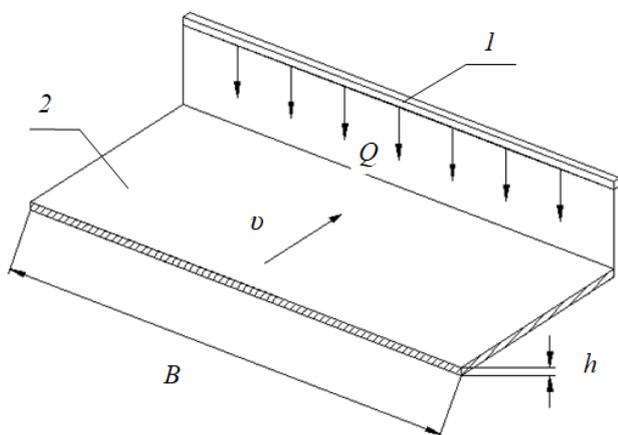
**Модель рабочего процесса устройства для распределения СГП**

1. Теоретическое исследование влияния скорости движения и давления в системе распределения на расход СГП

Устройство для распределения СГП представляет собой комплекс агрегатов и систем, связанных между собой кинематическими, электрическими, гидравлическими и другими связями, поэтому при составлении модели его работы необходимо обеспечить адекватность этой модели. При определении числа исследуемых параметров принималось во внимание, что учет всех факторов, влияющих на рабочую скорость устройства и качество выполняемых работ, мог бы привести к неоправданному усложнению модели.

Количественным показателем технической и экономической эффективности устройства является возможность нанесения им оптимального слоя СГП величиной  $h$ , который решает задачу по продлению межремонтного срока эксплуатации для  $i$ -го участка автомобильной дороги.

При анализе факторов, влияющих на данный параметр, было принято, что наиболее существенными из них являются скорость движения устройства и давление в системе распределения (рисунок 2).



**Рисунок 2** – Схема работы установки для распределения СГП  
 1 – распределительная система;  
 2 – покрытие автомобильной дороги

Исходя из этого, предложено теоретическое описание зависимости влияния скорости движения устройства и давления в его системе распределения на расход СГП.

Количество жидкости через выходное сопло форсунки определяется следующей формулой [10, с. 49–50; 11, с. 6–8]:

$$m = \mu f_0 \sqrt{(p_1 - p_0) \rho_{ж}} \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент, зависящий от вида и характеристик сопла;

$f_0$  – площадь выходного отверстия сопла, м<sup>2</sup>;

$p_1 - p_0$  – перепад давления жидкости на сопле, Па;

$\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, для определённого вида сопла расход жидкости через форсунку будет зависеть от давления в системе [10, с. 49–50; 11, с. 6–8].

При ширине распределения обрабатываемого покрытия равной  $B$ , используется  $N$  форсунок с таким расчётом, что кривые распределения плотности орошения перекрываются и обработка получается равномерной. В этом случае расход жидкости

$$m_{\text{общ}} = \mu f_0 \sqrt{(p_1 - p_0) \rho_{ж}} \quad (2)$$

При этом скорость движения устройства для распределения СГП равна  $v$ . Тогда площадь распределения материала за единицу времени

$$S = v \cdot B \quad (3)$$

Так как нанесение СГП предполагается равномерным, то объём распределяемого материала будет равен

$$V = S \cdot h \quad (4)$$

Данный объём будет иметь массу  $m = m_{\text{общ}}$ . Так как плотность жидкости известна, то составим систему уравнений:

$$\begin{cases} m = N \mu f_0 \sqrt{(p_1 - p_0) \rho_{ж}} \\ m_{\text{общ}} = \rho_{ж} v B h \end{cases} \quad (5)$$

Решая их совместно относительно  $h$ , найдём толщину распределенного слоя состава гидрофобного профилактического:

$$h = \frac{N \mu f_0 \sqrt{(p_1 - p_0) \rho_{ж}}}{\rho_{ж} v B} = v^{-1} \frac{N \mu f_0 \sqrt{(p_1 - p_0)}}{\sqrt{\rho_{ж}} B} \quad (6)$$

С учетом того, что  $v$  – это первая производная от расстояния ( $v = \frac{dx}{dt}$ ), то уравнение (6) можно представить в дифференциаль-

$$\text{ном виде: } h = \frac{1}{\frac{dx}{dt}} \frac{N \mu f_0 \sqrt{P_1 - P_0}}{\sqrt{\rho_{ж}} \cdot B} \quad (7)$$

2 Модель рабочего процесса распределения СГП

В соответствии с техническим заданием на выполнение работ между КПРСУП «Гомельобдорстрой» ДРСУ-149 и УО «Белорусский государственный университет транспорта» было выполнено обследование участка автомобильной дороги Н-4321 «Стрешин – Н.Олба», по результатам которого серьезных дефектов асфальтобетонного покрытия не выявлено, однако установлено, что имели место незначительные очаги шелушения и выкрашивания. Для дальнейшей эксплуатации указанного опытного участка автомобильной дороги разработаны рекомендации по выполнению профилактической обработки ее дорожной одежды из асфальтобетона типа В СТБ 1033–2016, которые были практически реализованы.

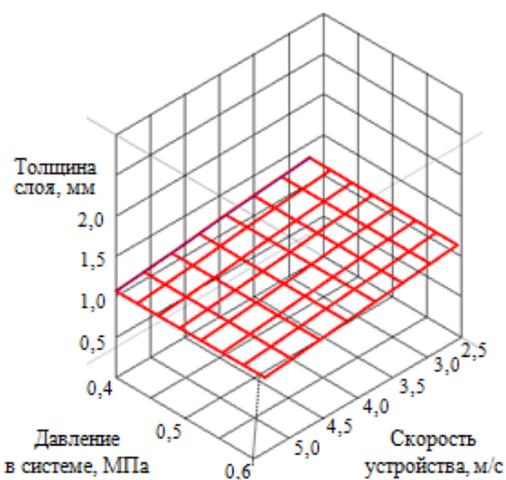
Основные характеристики внедрения СГП:

- базовая рецептура: нефтешлам (отходы с ОАО «Мозырский НПЗ») – 70 %; органический растворитель (керосин) – 5–10 %;
- дополнительные компоненты: минеральный наполнитель – 8–16 %; гидрофобизатор (ТУ 2229-008-42942526-00) – остальное.

Технологические режимы распределения на участке автомобильной дороги четвертой технической категории Н-4321 «Стрешин – Нижняя Олба»:

- ширина распределения СГП – 6,5 м;
- норма распределения – 0,5–0,7 л/м<sup>2</sup>;
- протяженность обработанного участка – 2000 м;
- температура окружающей среды при распределении СГП – 25 °С;
- температура дорожного покрытия при распределении СГП – 30 °С;
- состояние дорожного покрытия перед распределением СГП – сухое, чистое;
- температура распределения СГП – для достижения минимальной вязкости (около 70 °С);
- тип и марка машины для распределения – автогудронатор АРБ-7.

а)



При проведении внедрения были выполнены исследования, по результатам которых были получены данные (таблица 1) для установления зависимости толщины слоя от следующих параметров: скорость автогудронатора АРБ-7 и давление в его системе распределения материалов, плотность СГП.

Таблица 1 – Результаты проведенных исследований

Номер опыта	Наименование параметра			Толщина слоя СГП, мм
	Скорость автогудронатора, м/с	Давление в системе распределения, МПа	Плотность СГП, г/см <sup>3</sup>	
1	5,56	0,6	1,06	1,5
2	2,78	0,6	1,06	1,7
3	5,56	0,4	1,06	1,4
4	2,78	0,4	1,06	1,6
5	5,56	0,6	1,04	1,55
6	2,78	0,6	1,04	1,75
7	5,56	0,4	1,04	1,5
8	2,78	0,4	1,04	1,65

В результате проведения расчетов, которые представлены в источнике [12], было получено уравнение (8) зависимости толщины его слоя СГП от следующих параметров – скорость устройства для распределения, давление в его системе, а также от плотности состава:

$$y_i = 1,58 - 0,09x_1 + 0,044x_2 - 0,03x_3 - 0,03x_1x_2 - 0,006x_1x_3 + 0,006x_2x_3 + 0,006x_1x_2x_3 \quad (8)$$

Учитывая границы доверительного интервала для коэффициентов регрессии, которые составляют  $\Delta b = \pm 0,35$ , получаем уравнение (9). Также принимаем решение не исключать  $b_3$ , который является линейным коэффициентом, а также его значение близко к  $\Delta b$ .

$$y_i = 1,58 - 0,09x_1 + 0,044x_2 - 0,03x_3 \quad (9)$$

Проводя анализ полученных результатов исследования зависимости толщины нанесенного слоя СГП от скорости автогудронатора и давления в его системе распределения и плотность СГП (рисунок 3), стоит отметить, что скорость больше других параметров оказывает влияние на толщину нанесенного слоя.

б)

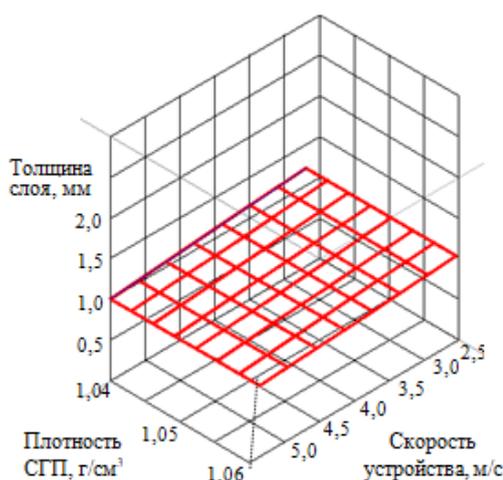


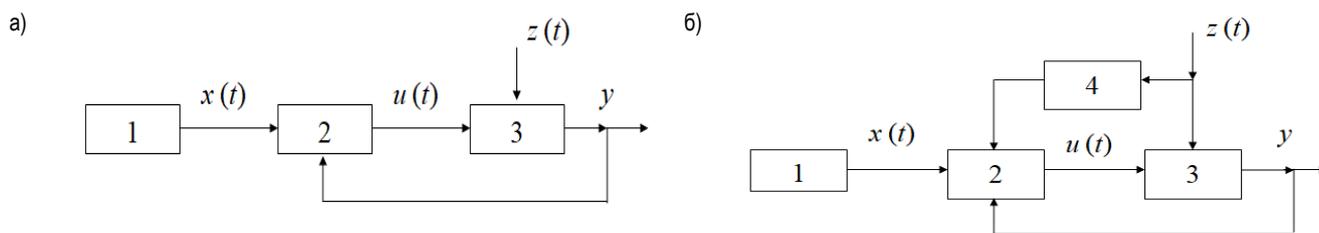
Рисунок 3 – Графики зависимости толщины нанесенного слоя СГП

а – от скорости автогудронатора и давления в его системе распределения; б – от скорости автогудронатора и плотности СГП

Предложения по технической реализации по результатам проведенных исследований

Техническая реализация полученных закономерностей в устройстве для распределения СГП возможна посредством автоматической системы управления, использующей принцип разомкнутого управления (рисунок 4 а). Достоинство такого принципа управления – формирование управляющего воздействия – происходит независимо от того,

какая причина вызвала отклонение управляемой величины. Одним из главных недостатков данного – увеличение времени управления, так как управляющее воздействие формируется только после возникновения ошибки  $\Delta = x - y$ , которая может быть очень значительной. В таком случае в установке для распределения дорожно-строительных материалов можно более эффективно использовать комбинированное управление по возмущению и отклонению (рисунок 4 б).



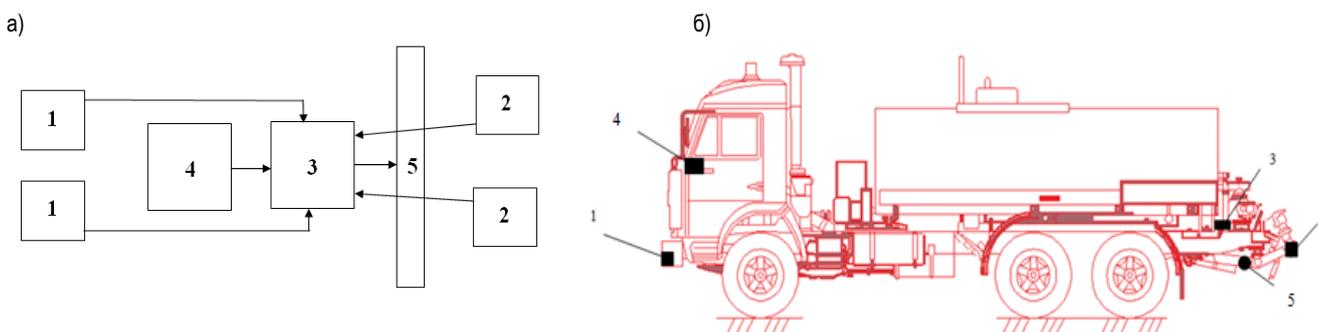
**Рисунок 4** – Структурная схема автоматической системы управления  
 а – на основе принципа разомкнутого управления; б – комбинированное управление по возмущению  
 1 – задающее устройство; 2 – управляющее устройство; 3 – объект управления; 4 – компенсационное устройство

Реализация автоматизации управления распределением СГП возможна на основе распределительной системы автогудронаторов типов АРБ-7 и ДС-142Б. В распределителях данной системы установлены форсунки, управляемые (открываемые и закрываемые) поворотом пробок с поводками, которые закреплены на рейках, перемещаемых посредством пневмокамер. Сжатый воздух поступает в пневмокамеры из пневмосистемы базового шасси или гидроцилиндров. Дополнение указанных приборов распределительной системы, а также привода насоса подачи вяжущего интеллектуальной системой управления, задания и контроля параметров распределения дорожно-строительных материалов позволит обеспечить требуемую норму их распределения, не зависящую от скорости движения.

Техническая реализация комбинированного управления по возмущению распределением жидких дорожно-строительных материалов возможна посредством управления насосом подачи вяжущего.

Данная идея реализована в работах [13, 14], где основными критериями управления подачей материала являются его вид, скорость движения и норма распределения. Но у рассмотренных способов отсутствует возможность осуществления распределения материала с переменным расходом (отсутствие опции сканирования покрытия), что приводит к перерасходу распределяемого материала.

Дополнение рассмотренного способа управления автоматической системой регулирования ширины распределения позволяет рассматривать комплексную автоматизацию технологического процесса. Данная система включает в себя лазерные или ультразвуковые дальнометры 1, датчики контроля за выполнением работы 2, микропроцессорный блок обработки данных 3, блок управления форсунками системы распределения 4 и пульт управления 5 (рисунок 5).



**Рисунок 5** – Способ обеспечения работы системы управления дозированием жидких дорожно-строительных материалов  
 а – принципиальная схема; б – конструктивная схема  
 1 – лазерные считывающие датчики; 2 – датчики контроля выполнения работы; 3 – микропроцессорный блок обработки данных;  
 4 – пульт управления; 5 – блоки управления форсунками распределения

Дальнометры 1 находятся впереди машины на вынесенных штангах и считывают информацию о состоянии дорожного покрытия (наличие люков, препятствий; расстояние до обочины или бортового камня; обработан участок ранее или нет и т. д.). На основе полученных данных при помощи микропроцессорного блока 3, в который перед началом работы загружена информация о требуемых параметрах обработки, осуществляются проверка и корректировка режима работы посредством сравнения фактических параметров распределения с заданными и подача управляющего сигнала на независимое включение и выключение каждой из форсунок. Ширина распределения при этом контролируется датчиками 2.

**Выводы**

1. Разработаны технические условия на «Состав гидрофобный профилактический ПРОТЕКТ-01» для выполнения профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. Предлагаемая технология профилактической обработки асфальтобетонного покрытия прошла производственную апробацию в ДРСУ-149 КПРСУП «Гомельоблдорстрой» на участке автомобильной дороги четвертой технической категории Н-4321 «Стрешин – Нижняя Олба» протяженностью 2000 м.

2. На основании представленных теоретических и экспериментальных данных можно сделать вывод, что при увеличении скорости устройства и плотности состава, а также уменьшении давления в системе толщина слоя состава уменьшается, при этом более значительное влияние на изменение толщины слоя оказывает скорость устройства.

3. Теоретически и экспериментально установлена взаимосвязь технологических режимов распределения СГП с конструктивными особенностями и техническими характеристиками распределительного устройства. Это позволило разработать модернизированную конструкцию устройства для распределения и с помощью моделирования определить и оптимизировать его технические и эксплуатационные характеристики в зависимости от параметров технологического процесса профилактической обработки, а также предложить функциональную схему АСУ и конструктивное решение.

**Список цитируемых источников**

1. Радовский, Б. С. Проблема повышения долговечности дорожных одежд и методы ее решения в США / Б. С. Радовский // Дорожная техника. – 2006. – С. 20–30.

2. Mirsa, A. Guidelines for a Roadway Management System (RMS) for Local Governments / A. Mirsa // Midwest Transportation Consortium; Iowa State University. Final Report. – 2003. – P. 1–43.
  3. Flintsch, G. Assessment of continuous pavement deflection measuring technologies / G. Flintsch, B. Ferne, B. Diefenderfer // Draft Final Report. SHRP 2 R06(F), Virginia Tech. – 2012. – P. 1–35.
  4. Lee, Ch. Alligator cracking performance and life-cycle cost analysis of pavement preservation treatments / Ch. Lee, W. A. Nokes, J. T. Harvey // Technical Memorandum: UCPRC-TM-2007-08. – 2008. – P. 1–25.
  5. Гидрофобный состав для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог : пат. BY 24097 / Д. И. Бочкарев, В. В. Петрусевич. – Оpub. 30.10.2023.
  6. Состав гидрофобный профилактический ПРОТЕКТ-01 : Технические условия ТУ BY 192670194.002–2019 – Введ. 03.10.2019. – Минск : Минстройархитектуры, 2019. – 29 с.
  7. Петрусевич, В. В. Исследование влияния состава гидрофобного профилактического «Протект-01» на физико-механические свойства материалов асфальтобетонных покрытий / В. В. Петрусевич // Наука и техника. – 2023. – Т. 22, № 4. – С. 294–300.
  8. Taghipoor M. Investigation of material composition, design, and performance of open-graded asphalt mixtures for semi-flexible pavement: a comprehensive experimental study / M. Taghipoor, A. Hassani, M. Karimi // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2024. – P. 92–116.
  9. Nithin Sudarsanan. A critical review of the fatigue life prediction of asphalt mixtures and pavements / Nithin Sudarsanan, Youngsoo Richard Kim // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2022. – P. 808–835.
  10. Витман, Л. А. Распыливание жидкости форсунками / Л. А. Витман, Б. Д. Кацнельсон, И. И. Палеев. – М. : Государственное энергетическое издательство, 1962. – 265 с.
  11. Определение расходно-геометрических характеристик топливных форсунок тепловых двигателей : учеб. изд. / А. А. Диденко. – Самара : Самарский гос. аэрокосмич. ун-т, 2012. – 24 с.
  12. Петрусевич, В. В. Математическое моделирование элементов технологического процесса распределения состава гидрофобного профилактического / В. В. Петрусевич // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 2. – С. 96–101.
  13. Intelligent driving monitoring alarm system based on machine vision : CN 109760694 (A) / Huang Zeyu, Zhu Haohao, Liao Qinghong. – Publ. 17.05.2019.
  14. Способ обеспечения работы системы управления рабочим процессом мобильного распределителя материалов для обработки дорожных покрытий и устройство управления рабочим процессом мобильного распределителя материалов : а. с. RU 2398929 / Г. М. Белоцерковецкий, Э. В. Ахрамеев, С. Б. Карякин. – Оpubл. 10.09.2010.
- References**
1. Radvoskij, B. S. Problema povysheniya dolgovechnosti dorozhnyh odezhd i metody ee resheniya v SSHA / B. S. Radvoskij // Dorozhnaya tekhnika. – 2006. – S. 20–30.
  2. Mirsa, A. Guidelines for a Roadway Management System (RMS) for Local Governments / A. Mirsa // Midwest Transportation Consortium; Iowa State University. Final Report. – 2003. – P. 1–43.
  3. Flintsch, G. Assessment of continuous pavement deflection measuring technologies / G. Flintsch, B. Ferne, B. Diefenderfer // Draft Final Report. SHRP 2 R06(F), Virginia Tech. – 2012. – P. 1–35.
  4. Lee, Ch. Alligator cracking performance and life-cycle cost analysis of pavement preservation treatments / Ch. Lee, W. A. Nokes, J. T. Harvey // Technical Memorandum: UCPRC-TM-2007-08. – 2008. – P. 1–25.
  5. Hidrofobnyj sostav dlya profilakticheskoj obrabotki asfal'tobetonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog : pat. BY 24097 / D. I. Bochkarev, V. V. Petrusevich. – Opub. 30.10.2023.
  6. Sostav gidrofobnyj profilakticheskij PROTEKT-01 : Tekhnicheskie usloviya TU BY 192670194.002–2019 – Vved. 03.10.2019. – Minsk : Minstrojarchitektury, 2019. – 29 s.
  7. Petrusevich, V. V. Issledovanie vliyaniya sostava gidrofobnogo profilakticheskogo «Protekt-01» na fiziko-mekhanicheskie svojstva materialov asfal'tobetonnyh pokrytij / V. V. Petrusevich // Nauka i tekhnika. – 2023. – T. 22, № 4. – S. 294–300.
  8. Taghipoor M. Investigation of material composition, design, and performance of open-graded asphalt mixtures for semi-flexible pavement: a comprehensive experimental study / M. Taghipoor, A. Hassani, M. Karimi // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2024. – P. 92–116.
  9. Nithin Sudarsanan. A critical review of the fatigue life prediction of asphalt mixtures and pavements / Nithin Sudarsanan, Youngsoo Richard Kim // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2022. – P. 808–835.
  10. Vitman, L. A. Raspylivanie zhidkosti forsunkami / L. A. Vitman, B. D. Kacnel'son, I. I. Paleev. – M. : Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo, 1962. – 265 s.
  11. Opredelenie raskhodno-geometricheskikh harakteristik toplivnyh forsunok teplovyh dvigatelej : ucheb. izd. / A. A. Didenko. – Samara : Samarskij gos. aerokosmich. un-t, 2012. – 24 s.
  12. Petrusevich, V. V. Matematicheskoe modelirovanie elementov tekhnologicheskogo processa raspredeleniya sostava gidrofobnogo profilakticheskogo / V. V. Petrusevich // Gornaya mekhanika i mashinostroenie. – 2022. – № 2. – S. 96–101.
  13. Intelligent driving monitoring alarm system based on machine vision : CN 109760694 (A) / Huang Zeyu, Zhu Haohao, Liao Qinghong. – Publ. 17.05.2019.
  14. Sposob obespecheniya raboty sistemy upravleniya rabochim processom mobil'nogo raspredelitelya materialov dlya obrabotki dorozhnyh pokrytij i ustrojstvo upravleniya rabochim processom mobil'nogo raspredelitelya materialov : a. s. RU 2398929 / G. M. Belocerkoveckij, E. V. Ahrameev, S. B. Karyakin. – Opubl. 10.09.2010.

Материал поступил 25.01.2024, одобрен 25.02.2024, принят к публикации 06.03.2024

## РАЗРАБОТКА СОСТАВА ОГНЕЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ПО СТАЛЬНЫМ СТРОИТЕЛЬНЫМ КОНСТРУКЦИЯМ

М. И. Кузьменков<sup>1</sup>, Е. И. Румынская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д. т. н., профессор, профессор кафедры «Химическая технология вяжущих материалов», УО «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь, e-mail: kuzmenkov@belstu.by

<sup>2</sup>Сотрудник, УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: rumynskaya@inbox.ru

### Реферат

Изложены результаты исследования состава и термохимии превращений, протекающих в жаростойком покрытии по стальным строительным конструкциям. Отмечается, что высокие эксплуатационные свойства – адгезия, прочность на сжатие обеспечивают высокое качество разработанному композиционному материалу, намеченного к выпуску в виде сухой строительной смеси.

Применение термодинамических расчетов и современных методов исследования термогравиметрического анализа, микрорентгеноспектрального, рентгенофазового анализа и других позволили надежно установить характер термохимических превращений в твердеющей в составе композиции. Сделан вывод о перспективности ее производства и применения в строительной практике.

**Ключевые слова:** адгезия, вермикулит, огнезащитное покрытие, огнестойкость, периклазохромит, прочность на сжатие, фосфатное вяжущее, холодное отверждение.

## DEVELOPMENT OF A FIRE-RESISTANT COATING COMPOSITION FOR STEEL BUILDING STRUCTURES

M. I. Kuzmenkov, E. I. Rumynskaya

### Abstract

The results of a study of the composition and thermochemistry of transformations occurring in a heat-resistant coating on steel building structures are presented. It is noted that high performance properties - adhesion, compressive strength ensure high quality of the developed composite material planned for release in the form of a dry building mixture.

The use of thermodynamic calculations and modern research methods of thermo-gravimetric analysis, micro-X-ray spectral, X-ray phase analysis and others made it possible to reliably establish the nature of thermochemical transformations in the hardening composition. A conclusion is made about the prospects of its production and use in construction practice.

**Keywords:** adhesion, vermiculite, fire retardant coating, fire resistance, periclase chromite, compressive strength, phosphate binder, cold curing.

### Введение

Значимость защиты зданий от пожаров не требует доказательств. Актуальность этой проблемы обусловлена социальными и экономическими потерями от пожаров в стране. В Республике Беларусь по данным МЧС за 2023 г. произошло 5677 пожаров, в результате которых погибло 526 и травмировано 535 человек, уничтожено 1083 строения, 304 единиц техники, 1429 голов скота [1].

При пожарах наиболее незащищенными элементами в зданиях являются стальные несущие конструкции, так как при достижении ими температуры 500 °С происходит практически мгновенное их разрушение. Одной из основных причин, вызывающих пожары в жилых и промышленных зданиях, является недостаточная огнезащитная эффективность используемых покрытий.

Для снижения уровня потерь, ежегодно наносимых пожарами, применяют пассивную противопожарную защиту за счет конструктивно-технических решений и материалов, защищающих здания и сооружения при температурной нагрузке. Наиболее остро проблема огнезащиты стоит для стальных несущих конструкций при возведении административных и промышленных зданий и сооружений.

Поэтому в настоящее время в зданиях с высокими требованиями по огнестойкости, в особенности в жилом многоэтажном строительстве, несущие стальные конструкции практически не применяются. Причиной этого является отсутствие современных эффективных решений по их огнезащите. Известные способы огнезащиты штукатурками, красками, облицовкой кирпичом и листовыми материалами, как правило, не удовлетворяют современным требованиям из-за высокой трудоёмкости, стоимости, малой долговечности, большой массивности, что делает эти решения неприемлемыми для использования.

На строительном рынке Республики Беларусь в последнее время используются, в основном, импортные и некоторые отечественные огнезащитные материалы на различных связующих: на органических полимерах, на жидком стекле, алюмосиликатных связках, глиноземистом цементе. Многим из них присущи недостатки – большинство из них не обеспечивают требуемую для зданий I степени

огнестойкости огнезащиту стальных несущих конструкций (не выдерживают действия температурных нагрузок, развиваемых до 1060 °С в течение не менее 150 минут), не технологичны, либо очень дорогостоящи [2].

Одной из основных причин сложившегося положения является отсутствие эффективных видов связующих для огнезащитных композиций. Поэтому для решения этой задачи необходимо было осуществить разработку эффективного доступного жаростойкого покрытия отечественного производства.

Анализ основополагающих источников в этой области показал, что наиболее перспективными связующими являются фосфатные, которые свободны от перечисленных недостатков. На основании этого была сформулирована цель настоящего исследования и задачи ее достижения. В литературных и патентных источниках сведения об огнезащитных композициях носят отрывочный характер, отмечая при этом, что покрытия по стальным конструкциям I группы огнестойкости – немногочисленны.

Особое внимание было уделено способам получения покрытий на основе фосфатных связок, которые способны обеспечивать высокую жаростойкость и термостойкость композиционным материалам, получаемых на их основе. Отмечено, что перспективным при решении данной материаловедческой задачи могло стать вовлечение в качестве сырьевых материалов техногенных продуктов – вторичного огнеупора (периклазохромитового), а также крупно тоннажных продуктов, выпускаемых промышленностью (аммофоса и вермикулита). Их использование обеспечивает не только придание высоких физико-технических свойств, но и позволяет решить важную задачу с экологической точки зрения, касающуюся утилизации отработанного в известковых и цементных вращающихся печах огнеупора.

Было выявлено также, что системных исследований в многокомпонентной сырьевой системе, включающей фосфатное вяжущее и наполнители различного функционального назначения, в литературных источниках не обнаружено, что обусловило цель постановки данного комплексного исследования.

Решением поставленных задач является разработка состава защитного жаростойкого покрытия на фосфатной связке холодного отверждения из техногенных продуктов. Это, как следствие, позволит обеспечить огнезащиту I степени огнестойкости стальных строительных конструкций, расширить номенклатуру огнезащитных материалов, используемых в строительной отрасли Республики Беларусь, а также самое главное – снизить ущерб, наносимый пожарами.

**Основная часть**

Цель исследования – разработка состава и технологии получения и применения жаростойкого покрытия холодного отверждения из техногенных продуктов.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- изучить процесс холодного отверждения фосфатного связующего в системе  $NH_4H_2PO_4-(NH_4)_2HPO_4-MgO-Cr_2O_3-MgCr_2O_4-H_2O$ ;
- исследовать свойства фосфатного связующего и жаростойкого покрытия на его основе и влияние технологических параметров.

Объектом исследования являлось магнийаммонийфосфатное связующее, полученное из техногенных продуктов – периклазохромитовых огнеупоров и аммофоса, и жаростойкое покрытие на его основе.

Предмет исследования – технология получения и применения защитного жаростойкого покрытия по стальным конструкциям и его свойства.

Характеристика сырьевых материалов и методов и исследования.

В качестве фосфатного вяжущего использовали аммофос марки «12–50», производства ОАО «Гомельский химический завод», массовая доля общих фосфатов в аммофосе составляет не менее 50 масс.%. Вещественный состав аммофоса состоял из 90 масс.% дигидроортофосфата аммония  $NH_4H_2PO_4$  при содержании 10 масс.% гидрофосфата аммония  $(NH_4)_2HPO_4$ .

Отвердителем фосфатного вяжущего, обеспечивающим холодное отверждение, использовали отработанный молотый периклазохромитовый огнеупор марки «ПХЦ», среднее содержание MgO в котором составило 70 масс.%.

В качестве регулятора схватывания применялась – борная кислота квалификации «Ч» по ГОСТ 18704 [3].

Для снижения массы покрытия использовался вспученный вермикулит марки 100, средней фракции с размером зерен от 0,6 до 5 мм, выпускаемый по ГОСТ 12865 [4]. Обработка полученных результатов производилась с применением методов математической статистики, что позволило установить доверительный интервал значений определяемых характеристик.

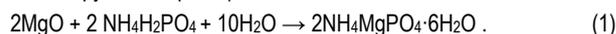
Сырьевые компоненты измельчали в лабораторной планетарной мельнице марки «Reatsch PM 100». На просеивающей машине марки «Reatsch AS 200» производили сепарацию измельченных сырьевых компонентов (по отдельности) до остатка на сите с сеткой № 008 5...8 масс.%.

Для достижения поставленной цели использовались следующие методы исследования: термогравиметрия (дериватограф «ОДО» Q-1500 D), рентгенофазовый анализ (дифрактометр «ДРОН-3», для идентификации кристаллических фаз использовалась картотека ICSD), микрорентгеноспектральный анализ (сканирующий электронный микроскоп «Cam Scan» фирмы «Cambrig»

с микрорентгеноспектральным анализатором «AN 10000 фирмы «Link Analytical» по программе количественного анализа «ZAF4-FLS»), лазерная гранулометрия (анализатор частиц «Fritsch ANALYSETTE 22 MicroTec Plus» и компьютерная программа «Анализетте 22»), а также стандартные методы определения физико-технических свойств, согласно действующих ТНПА.

Разработке состава предшествовал выполненный термодинамический прогноз вероятности формирования новообразований в процессе твердения композиционного материала в нормальных условиях. Исследуемая вяжущая система  $NH_4H_2PO_4-(NH_4)_2HPO_4-MgO-Cr_2O_3-MgCr_2O_4-H_2O$  являлась сырьевой базой для формирования композита требуемого вещественного состава.

В литературных источниках отсутствовали данные изменения стандартной энергии Гиббса для исследуемых соединений. Поэтому на первом этапе работы для широкого перечня других кристаллогидратов, были проведены дополнительные расчеты с целью определения усредненного аддитивного вклада молекул воды в их термодинамические свойства. Таким образом, недостающие сведения, требуемые для проведения термодинамических расчетов, были восполнены. И на основе уже этих рассчитанных усредненных значений была проведена вторая стадия расчетов значений изменения стандартной энергии Гиббса  $\Delta G^\circ$  для соединений, участвующих в реакциях взаимодействия и продуктов реакций – струвита  $NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$ , шертелита  $(NH_4)_2Mg(HPO_4)_2 \cdot 4H_2O$  и дитмарита  $NH_4MgPO_4 \cdot H_2O$ . Результаты проведенных расчетов энергии Гиббса свидетельствует о том, что взаимодействие периклазохромитового огнеупора в нормальных условиях с аммофосом происходит с образованием струвита по реакции:



Образованием струвита содержащего шесть молекул кристаллизационной воды является важным. Выделяющиеся при нагревании струвита пары воды будут блокировать доступ теплового потока к стальной конструкции и кислорода к очагу горения. Полученные термодинамические данные послужили теоретической основой осуществления структурно управляемого синтеза жаростойкого покрытия как регулирования исходного состава, так и обоснования введения добавок, регулирующих фазообразование струвита. Для подтверждения правильности сделанного термодинамического прогноза в дальнейшем было проведено рентгенофазовое и микрорентгеноспектральное исследование вещественного состава продуктов взаимодействия и доказано их присутствие. Таким образом, показана целесообразность и перспективность использования этого теоретического подхода к решению материаловедческой задачи.

На первом этапе работы была проведена предварительная серия опытов по получению магнийаммонийхромфосфатного связующего на основе выбранного сырья, результаты которой позволили выявить наиболее значимые технологические параметры и их диапазоны, что позволило в дальнейшем сократить количество экспериментов. В дальнейшем было исследовано влияние состава (таблица 1, рисунок 1), водо-твердого соотношения (В/Т) и подвижности (Пк) на свойства фосфатного вяжущего при различном соотношении сырьевых компонентов. Составы с варьированием сырьевых компонентов, показавшие наилучшие свойства, представлены в таблице 1.

**Таблица 1** – Зависимость свойств композиции от содержания фосфатного связующего при разных В/Т и Пк

Содержание масс.%		Адгезия, МПа	Прочность на сжатие, МПа	Адгезия, МПа	Прочность на сжатие, МПа
аммофоса	периклазохромитового порошка				
		В/Т = 0,37, подвижность Пк4		В/Т = 0,2, подвижность Пк2	
35	65	0,6	4	0,9	20
36	64	0,6	5	0,9	21
37	63	0,6	6	1,0	22
38	62	0,7	7	1,1	22
39	61	0,7	8	1,1	23
40	60	0,8	9	1,2	24
41	59	0,8	10	1,2	24
<b>42</b>	<b>58</b>	<b>0,9</b>	<b>12</b>	<b>1,3</b>	<b>25</b>
43	57	0,8	10	1,2	24
44	56	0,8	9	1,1	23
45	55	0,7	8	1	23

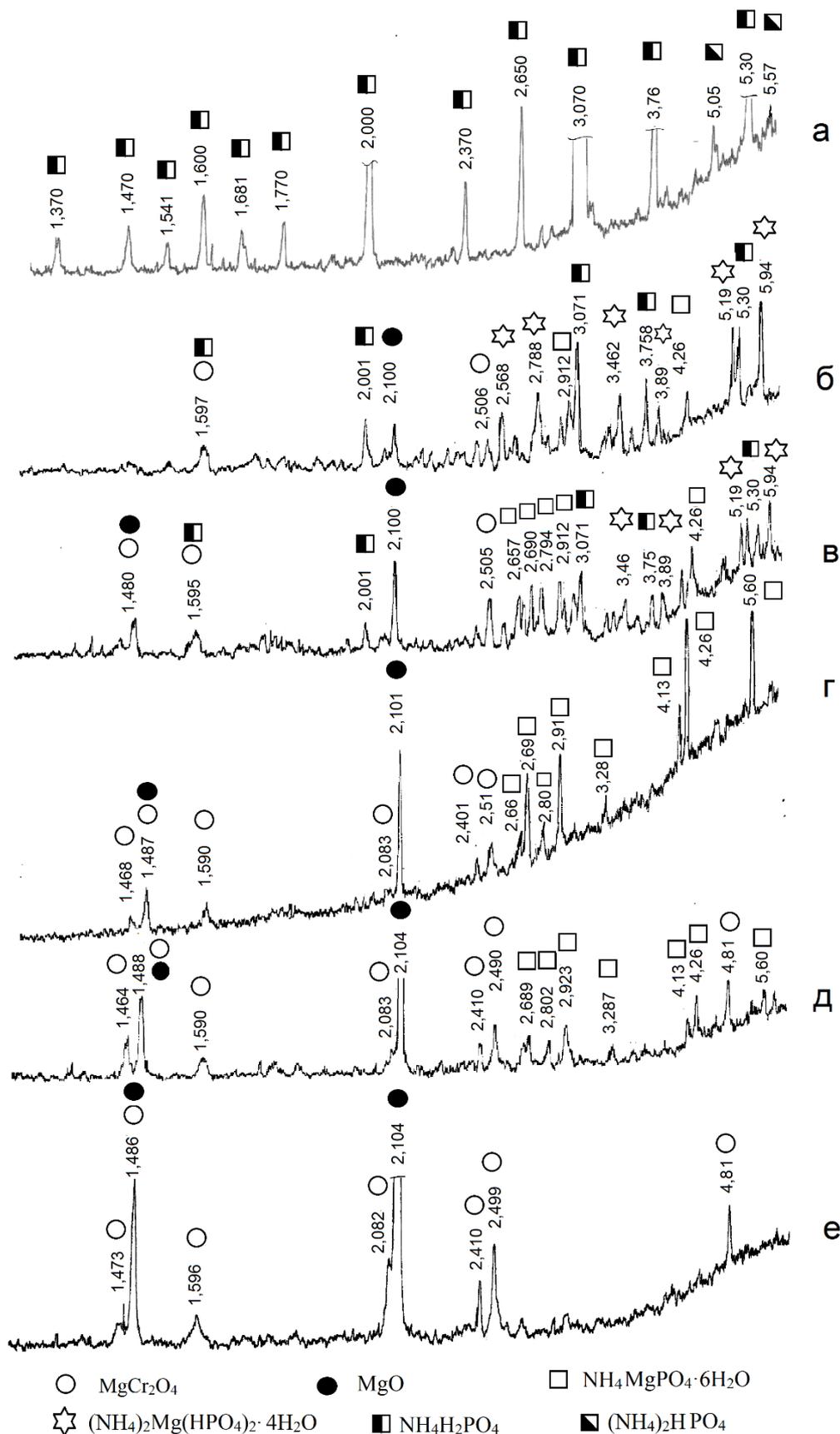


Рисунок 1 – Рентгенограммы образцов  
 а – аммофоса; связующего с содержанием аммофоса б – 80 масс.%; в – 60 масс.%; г – 40 масс.%;  
 д – 20 масс.%; е – периклазохромитового порошка

Из таблицы 1 видно, что наилучшие свойства, которые определяли в 2х-суточном возрасте, проявляет состав с содержанием 42 масс.% аммофоса. Увеличение прочностных и адгезионных свойств при повышении содержания аммофоса до 42 масс.% происходит вследствие формирования в этой многокомпонентной системе струвита  $NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$ , фиксируемого рентгенофазовым анализом, о чем свидетельствует наличие дифракционных рефлексов новообразований ( $d = 4,26$  (100 %),  $5,60$  (60 %),  $2,919$  (55 %),  $2,695$  (50 %),  $4,13$  (40 %)). В составах, с содержанием аммофоса 60 и 80 масс.%, зафиксировано также наличие шертелита  $(NH_4)_2Mg(HPO_4)_2 \cdot 4H_2O$ .

Присутствие в составах с содержанием аммофоса 20, 40, 60, 80 масс.% периклаза  $MgO$  ( $d = 2,100 - 2,104$ , 100 %) и незначительного количества реликтового хромита магния  $MgCr_2O_4$  ( $d = 2,490 - 2,512$ , 100 %) связано с его рекристаллизацией поверхностных слоев и запассивированной поверхностью из-за продолжительной их эксплуатации в печных агрегатах при высоких температурах.

Как было выше сказано, наиболее желательной фазой в составе вяжущего является струвит, обладающий наибольшей огнетушащей потенцицией. Поэтому, по результатам рентгенофазового анализа, можно заключить, что этим качествам отвечает состав, содержащий 42 масс.% аммофоса. Кроме того, этот состав показал наилучшие прочностные и адгезионные свойства, рассмотренные ранее. Полученные данные РФА подтверждают результаты проведенного термодинамического прогноза.

Роль кристаллических фаз в формировании структуры, а следовательно и их вклад в прочностные свойства, были установлены с помощью микрорентгеноспектрального анализа (рисунок 2). Была исследована структура и идентифицирован фазовый состав композиции, представленный струвитом, периклазом  $MgO$  и хромитом магния  $MgCr_2O_4$ . Октаэдрические кристаллы, отмеченные цифрой 1, имеют размер 5–20 мкм, количественный элементный анализ которых показал, что они принадлежат запассивированному реликтовому периклазу  $MgO$ . Из рисунка 2, видно что габитус фазы струвита  $NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$ , отмеченной цифрой 2, имеет игольчатую форму размерами 5–10 мкм. Игольчатые кристаллы струвита по существу выполняют роль микроарматуры, тем самым оказывают положительное влияние на прочностные свойства композита. Кубические кристаллы, отмеченные цифрой 3, размером 5 мкм – принадлежат хромиту магния  $MgCr_2O_4$ .

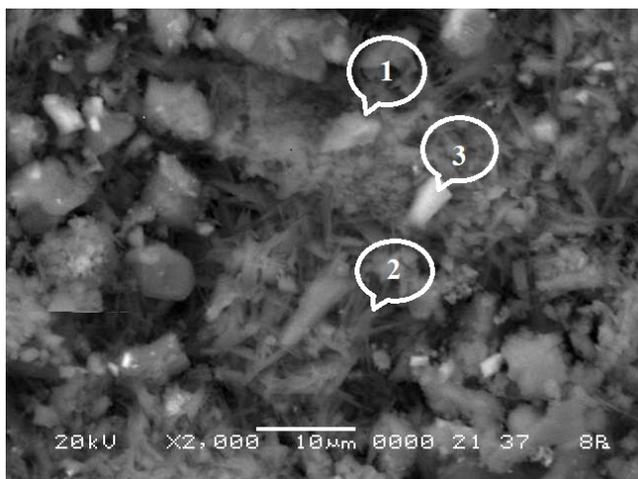


Рисунок 2 – Электронно-микроскопический снимок композиции (увеличение  $\times 2000$ )

На следующем этапе было проведено исследование влияния гранулометрического состава сырьевой смеси на свойства конечного продукта (рисунок 3). Важным параметром, влияющим на свойства вяжущей композиции, является удельная поверхность сырьевых компонентов.

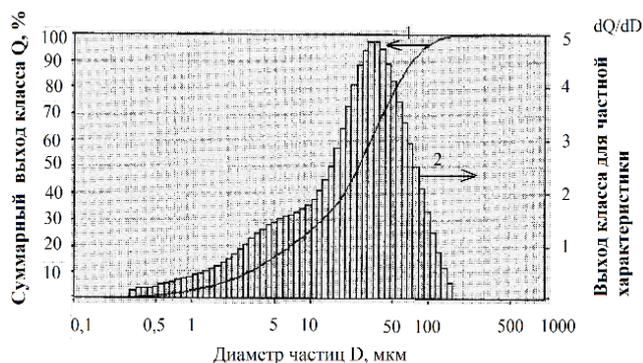


Рисунок 3 – Интегральная кривая распределения частиц (1) и гистограмма дифференциального (2) распределения фракций периклазохромитового огнеупора

Дигидрофосфат аммония, составляющий до 90 масс.% аммофоса, является хорошо растворимым веществом, а гидрофосфат аммония, составляющий до 10 масс.% аммофоса, – малорастворимым. По этим причинам аммофос перед использованием требует помола. Сырьевые компоненты активно реагируют, при этом скорость их взаимодействия будет выше скорости растворения гранул аммофоса.

Оптимальная удельная поверхность указанных сырьевых компонентов находилась в диапазоне  $4000 \pm 50$   $cm^2/g$ . Регулирование величины удельной поверхности производили за счет времени помола.

Увеличение времени помола свыше 18 минут и достижению удельной поверхности при этом свыше  $4000$   $cm^2/g$  не придало существенное увеличение прочностных свойств. Из гранулограммы, полученной на лазерном гранулометре «Анализетте 22» (рисунок 3), видно, что размер частиц находится в пределах 0,5–100 мкм.

Наилучшие свойства продемонстрировал состав с временем помола периклазохромитового огнеупора 18 минут и следующего гранулометрического состава: с содержанием фракций 0–1 мкм – 3 масс.%, 1–5 мкм – 13 масс.%, 5–10 мкм – 9 масс.%, 10–20 мкм – 10 масс.%, 20–30 мкм – 10 масс.%, 30–40 мкм – 16 масс.%, 40–50 мкм – 16 масс.%, 50–100 мкм – 19 масс.%, 100–210 мкм – 4 масс.%, что обеспечивает его технологичность и высокие свойства.

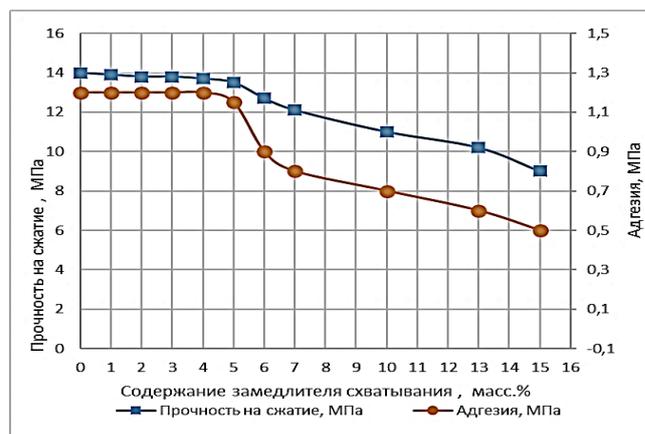


Рисунок 4 – Зависимость прочности на сжатие и адгезии композиции от количества замедлителя от количества замедлителя ( $B/T = 0,37$ )

Для установления оптимальных сроков твердения приемлемых при практическом использовании было исследовано влияние регуляторов темпов твердения, наиболее эффективной из которых явилась борная кислота.

Борная кислота использовалась для регулирования кинетики твердения. Введение ее в количестве 5 масс.% приводило к изменению pH с 3,9 до 4,1, что согласуется с литературными данными, и изменению скорости протекания реакции гидролиза, обеспечивающей при сохранении значений свойств адгезии и прочности на сжатие (рисунок 4) сроки схватывания композиции с 90 до 190 минут.

Таким образом, на основании комплексного исследования разработан состав связующего для жаростойкой композиции, содержащий масс. %: 40 молотого аммофоса, 55 молотого периклазохромитового огнеупора и 5 борной кислоты – в качестве добавки-замедлителя. При водо-твердом соотношении В/Т = 0,2, подвижностью Пк2 и с адгезией не менее 1 МПа, прочность на сжатие состава – не менее 20 МПа, сроки твердения – 2 суток.

### Заключение

1. Анализ литературных и патентных источников, посвященных получению и изучению свойств жаростойких материалов для огнезащиты стальных строительных конструкций, полученных на различных неорганических и органических видах связующих, показал, что при всем многообразии составов и изучении их свойств поиск материалов с постоянно повышающимися требованиями по эффективности по-прежнему остается актуальной материаловедческой задачей. Отмечена перспективность использования фосфатных вяжущих для разработки жаростойких покрытий. Наибольшую целесообразность представляют вяжущие холодного отверждения, которые в этом качестве недостаточно изучены.

2. В дополнение к известным физическим и химическим методам исследования композитных материалов в работе привлечен расчет термодинамической вероятности формирования фазового состава материала. Рассчитанные значения энергии Гиббса позволили установить очередность формирования кристаллических фаз в системе  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4\text{--}(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4\text{--}\text{MgO--Cr}_2\text{O}_3\text{--}\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{--}\text{H}_2\text{O}$  в жаростойком составе в процессе его холодного отверждения.

3. Установлены концентрационные пределы сырьевых материалов покрытия, включающие: аммофос – 32 масс.%, отвердитель, в качестве которого использовали периклазохромитовый порошок, – 44 масс.%, регулятор сроков схватывания (борная кислота) – 4 масс.%, наполнитель вспученный вермикулит – 20 масс.%, вода.

4. Разработан способ регулирования процесса схватывания твердеющей системы путем введения борной кислоты, которая в количестве 5 масс.% вызывает изменение pH с 3,9 до 4,1, что приводит к изменению скорости гидролиза фосфатов и таким образом обеспечивает начало схватывания – не ранее 90 минут; конец – не более 190 минут [5].

5. Изучены свойства композиции, которые при В/Т = 0,2 обеспечивают: адгезию – 1,1 МПа, прочность на сжатие – 23,5 МПа, подвижность – Пк2, сроки твердения – 2 суток.

6. Разработан состав жаростойкого покрытия по стальным строительным конструкциям, включающий масс. %: фосфатное вяжущее – 80, наполнитель – вспученный вермикулит – 20; и изучены его свойства (при подвижности Пк2): прочность на сжатие не менее 7,5 МПа в возрасте 2 суток, адгезия – не менее 0,8 МПа в возрасте 2 суток; жизнеспособность не менее 60 минут; морозостойкостью – не менее 75 циклов, показатель усадки – отсутствие трещин в слое проектной толщины, гранулометрический состав механоактивированного периклазохромитового отвердителя с содержанием фракций 0–10 мкм – 25 масс.%, 10–50 мкм – 52 масс.%, 50–210 мкм – 23 масс. %.

### Список цитированных источников

1. Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mchs.gov.by/ministerstvo/statistika/svedeniya-o-chs>. – Дата доступа: 24.12.2023.
2. Румынская, Е. И. Легкие жаростойкие бетоны для огнезащиты стальных строительных конструкций / Е. И. Румынская, М. И. Кузьменков // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Институт БелНИИС ; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2015. – Вып. 7. – С. 111–132.
3. Кислота борная. Технические условия : ГОСТ 18704-78. – Взамен ГОСТ 18704-73; введ. 01.01.80. – М. : Издательство стандартов, 1978. – 33 с.
4. Вермикулит вспученный : ГОСТ 12865-67. – Введ. 01.07.68. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 7 с.
5. Румынская, Е. И. Исследование термохимических превращений в огнезащитных покрытиях по стальным строительным конструкциям / Е. И. Румынская, М. И. Кузьменков // Труды БГТУ. – Минск : БГТУ, 2013. – № 3 (159). – С. 118–122.

### References

1. Ministerstvo po chrezvychajnym situacijam Respubliki Belarus' [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://mchs.gov.by/ministerstvo/statistika/svedeniya-o-chs>. – Data dostupa: 24.12.2023.
2. Rumynskaya, E. I. Legkie zharostojkie betony dlya ognезashchity stal'nyh stroitel'nyh konstrukcij / E. I. Rumynskaya, M. I. Kuz'menkov // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona: sb. nauch. tr. / Institut BelNIIS ; redkol.: O. N. Leshkevich [i dr.]. – Minsk, 2015. – Vyp. 7. – S. 111–132.
3. Kislota bornaya. Tekhnicheskie usloviya : GOST 18704-78. – Vzamen GOST 18704-73; vved. 01.01.80. – M. : Izdatel'stvo standartov, 1978. – 33 s.
4. Vermikulit vspuchennyj : GOST 12865-67. – Vved. 01.07.68. – M. : Izdatel'stvo standartov, 1987. – 7 s.
5. Rumynskaya, E. I. Issledovanie termohimicheskikh prevrashchenij v ognезashchitnyh pokrytyyah po stal'nyh stroitel'nyh konstrukcijam / E. I. Rumynskaya, M. I. Kuz'menkov // Trudy BGTU. – Minsk : BGTU, 2013. – № 3 (159). – S. 118–122.

*Материал поступил 28.01.2024, одобрен 15.02.2024, принят к публикации 27.02.2024*

## НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИНТЕРВАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ КВАНТИЛЕЙ ЭМПИРИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ СНЕГОВЫХ НАГРУЗОК

С. С. Дереченник

К. т. н., доцент, заведующий кафедрой электронных вычислительных машин и систем УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ssderechennik@gmail.com

### Реферат

Установление характеристических значений климатических, в частности снеговых нагрузок, выполняется путем статистического оценивания имеющихся эмпирических данных. Известные методы оценивания, основанные на приближении правой «хвостовой» части рядов эмпирических данных разнотипными распределениями экстремальных значений, не имеют определенного уровня статистической достоверности получаемой оценки. Предложена новая методика непараметрического интервального оценивания квантили эмпирического распределения с пятиточечным выравниванием эмпирических данных, позволяющая задавать необходимый уровень достоверности результата. Эффективность методики показана на примере оценивания медианы квантили уровня 0,98 (соответствует периоду повторяемости 50 лет) при решении задачи прогнозирования характеристических значений снеговой нагрузки, в ходе которого выполнено районирование территории Республики Беларусь по снеговым нагрузкам с учетом выявленных зависимостей нагрузки от высоты местности.

**Ключевые слова:** эмпирическое распределение, непараметрическое оценивание квантили, статистическая достоверность, снеговая нагрузка, характеристическое значение.

### NONPARAMETRIC INTERVAL ESTIMATION OF QUANTILES OF EMPIRICAL DISTRIBUTIONS IN THE PROBLEM OF PRONOSIS OF CHARACTERISTIC VALUES OF SNOW LOADS

S. S. Derechennik

### Abstract

The establishment of characteristic values of climatic loads, in particular snow loads, is carried out by statistical estimation of available empirical data. Known estimation methods based on approximating the right "tail" part of empirical data series with different types of distributions of extreme values do not have a certain level of statistical confidence of the resulting estimate. A new technique for nonparametric interval estimation of quantiles of an empirical distribution with five-point alignment of empirical data is proposed, which allows one to set the required level of statistical confidence of the result. The effectiveness of the methodology is shown by the example of estimating the median quantile level of 0.98 (corresponding to a return period of 50 years) when solving the problem of predicting the characteristic values of snow load, during which the territory of the Republic of Belarus was zoned according to snow loads, taking into account the identified dependencies of the load on the terrain height.

**Keywords:** empirical distribution, nonparametric quantile estimation, statistical confidence, snow load, characteristic value.

### Введение

Согласно действующим концепциям надежности при проектировании зданий и сооружений, нормирование климатических, в частности снеговых нагрузок, выполняется путем анализа наблюдаемых временных рядов годовых максимумов нагрузки в данной местности с целью установления так называемых характеристических значений нагрузки. В течение некоторого заданного срока эксплуатации здания или сооружения (периода повторяемости, или числа лет  $T$ ), допускается однократное (в среднем) превышение фактической случайной нагрузкой этого характеристического значения. Такие значения находят статистическими методами как квантиль уровня  $p = 1 / (1 - T)$  вероятностного распределения случайной величины нагрузки [1]. Обычно для этого строят некоторую эмпирическую функцию распределения как оценку (эмпирическую меру) неизвестной функции распределения генеральной совокупности по имеющейся выборке данных измерений. Качество нормирования при этом в решающей степени зависит от способа статистической обработки эмпирических данных.

Наиболее развитым подходом считается подход, основанный на асимптотической теории экстремальных значений, изложенной, например, в работе [2], согласно которой возможны три типа распределениями экстремальных значений, известные соответственно как законы Фишера-Тилпета типа I (распределение Гумбеля), типа II (распределение Фреше) и типа III (распределение Вейбулла). Данный подход предусматривает анализ соответствия имеющихся эмпирических данных одному из указанных законов (типов) распределения [3, 4].

На этой основе ранее нами была разработана непараметрическая, основанная на ранговых статистиках, методика оценивания квантили уровня  $p = 0,98$  (период повторяемости  $T = 50$  лет) и заключающаяся в приближении правой («хвостовой») части эмпирических рядов разнотипными распределениями экстремальных значений снеговых нагрузок. Методика явилась достаточно эффективной и позволила получить более обоснованные, по сравнению с существовавшими методами, нормативные значения нагрузки, а также выполнить районирование территории Республики Беларусь по снеговым нагрузкам и типам распределений [5, 6].

При дальнейшем практическом использовании методики были выявлены некоторые ее недостатки (несовершенства).

Во-первых, ранговые статистики принимались фактически в качестве точечных оценок квантилей в хвостовой части эмпирической функции распределения, поскольку статистическая достоверность оценки не определялась, ни тем более не задавалась. Однако любая квантиль эмпирического распределения сама является случайной величиной и имеет собственное распределение вероятности. Представляется целесообразной интервальной оценкой квантилей с некоторым заданным уровнем достоверности (например, уровню достоверности 0,5 будет соответствовать медиана искомого квантили).

Во-вторых, приближение хвостовой части эмпирических рядов выполнялось для дважды логарифмической шкалы фактора (вероятности), в которой отсчеты неэквидистантны, т. е. не являются равноотстоящими – с увеличением вероятности расстояние между соседними отсчетами фактора прогрессивно возрастает. Известно, однако, что классический метод наименьших квадратов для вычисления параметров регрессионной модели вполне корректен лишь

при условии регулярного (эквидистантного) расположения отсчетов на шкале фактора. Ранее нами был разработан метод интегральной (на интервалах) минимизации квадратической ошибки регрессионных моделей, нечувствительный к регулярности расположения отсчетов на шкале фактора.

В-третьих, в задаче определения типа эмпирического распределения требовался анализ хвостовой части распределения достаточной длины (от 9 до 20 отсчетов) и во многих случаях лучшее приближение выбиралось из очень хороших аппроксимаций двух или даже трех различных типов. Это свидетельствует о возможном наличии смеси распределений различных типов (аналогичное утверждается также, например, в [4]), что, наряду с малым общим количеством метеостанций, обуславливает существенную неопределенность районирования территории по типам распределений. Однако задача определения характеристической снеговой нагрузки, как квантили эмпирической функции распределения определенного уровня, непосредственно не требует ни оценки самого распределения, ни определения типа его хвостовой части.

**Достоверность оценок квантилей эмпирической функции распределения**

В методике [6] оценивания квантили  $S_p$  уровня  $p$  распределения случайной величины снеговой нагрузки, представленной в виде вариационного ряда  $S_{(1)} \leq S_{(2)} \leq \dots \leq S_{(N)}$ , статистики  $S_{(R)}$  ранга  $R$  используются в качестве точечных оценок эмпирической функции распределения:

$$\tilde{F}(S_{(R)}) = R / (N + 1). \tag{1}$$

Как сказано выше, такая оценка функции распределения не предполагает задания статистической достоверности результата. Так, для двух наибольших отсчетов вариационного ряда с  $N = 49$  по (1) получаем  $\tilde{F}(S_{(N-1)}) = 0,96$  и  $\tilde{F}(S_{(N)}) = 0,98$ . Отметим, что последнее значение в точности соответствует уровню квантили, необходимой для определения характеристической снеговой нагрузки с периодом повторяемости  $T = 50$  лет. Однако любая квантиль

эмпирического распределения сама является случайной величиной и имеет собственное распределение вероятности. Как известно, вероятность того, что квантиль  $S_p$  уровня  $p$  принадлежит непараметрическому интервалу между соседними статистиками  $S_{(R)}$  и  $S_{(R+1)}$ , может быть найдена из биномиального распределения [7]:

$$\gamma_{(R,R+1)} = \binom{N}{R} p^R (1 - p)^{N-R}. \tag{2}$$

Из (2) находим, что вероятность нахождения квантили уровня 0,98 правее отсчета  $S_{(49)}$  составляет  $0,98^N \approx 0,372$ , квантиль же уровня 0,96 лежит правее отсчета  $S_{(48)}$  с вероятностью, равно  $N \cdot 0,96^{N-1} \cdot (1 - 0,96) + 0,96^N \approx 0,412$ .

Медианные значения квантилей в данном примере, очевидно, лежат левее, чем это следует из (2), поэтому данная оценка является оценкой уровня квантили «сверху», а самой функции распределения – «снизу». При этом обеспеченность оценки зависит от длины ряда, более того – оказывается неодинаковой для различных отсчетов в пределах одного вариационного ряда, вследствие чего дальнейшая аппроксимация функции не вполне корректна.

Сформулируем задачу следующим образом: необходимо оценить вероятностное распределение  $G(S_p)$  искомой квантили эмпирического распределения как случайной величины. Такое оценивание, в свою очередь, также может заключаться в поиске квантилей, но уже для функции  $G(S_p)$ . Например, для оценивания положения медианы квантили уровня  $p = 0,98$  необходимо решение обратной задачи  $G(S_{0,98}) = 0,5$ .

Выполним с использованием (2) интервальное приближение плотности вероятности случайной величины  $S_{0,98}$  для некоторых значений длины выборочного ряда измерений, как представлено в таблице 1 [8].

**Таблица 1** – Вероятность принадлежности квантили уровня 0,98 непараметрическим интервалам в правой части вариационного ряда

Длина вариационного ряда	Обозначение вероятности принадлежности квантили интервалу					
	$\gamma_{(N-5,N-4)}$	$\gamma_{(N-4,N-3)}$	$\gamma_{(N-3,N-2)}$	$\gamma_{(N-2,N-1)}$	$\gamma_{(N-1,N)}$	$\gamma_{(N, \dots)}$
$N = 30$	0,00028	0,0026	0,0188	0,0988	0,3340	0,5455
$N = 34$	0,00050	0,0040	0,0256	0,1176	0,3491	0,5031
$N = 35$	0,00057	0,0045	0,0274	0,1222	0,3522	0,4931
$N = 50$	0,00273	0,0145	0,0607	0,1858	0,3716	0,3642
$N = 60$	0,00575	0,0252	0,0865	0,2194	0,3644	0,2978
$N = 70$	0,01330	0,0387	0,1131	0,2445	0,3473	0,2431

Примечание – Вероятность в последнем столбце таблицы соответствует расположению квантили правее последнего (наибольшего) отсчета.

Как следует из таблицы 1, функция  $G(S_p)$  почти целиком сосредоточена на нескольких, крайних справа в вариационном ряду, интервалах, а также правее последнего (наибольшего) отсчета ряда. Для коротких (менее 34 отсчетов) рядов медиана 0,98-квантили располагается за пределами размаха ряда, т. е. правее наибольшего значения, но уже при  $N = 35$  она попадает внутрь «старшего» интервала (ячейки таблицы выделены фоном). Вероятность  $\gamma_{(N-5,N-4)}$  нахождения квантили левее отсчета  $S_{(N-4)}$  очень мала даже для весьма длинных рядов (0,0133 при  $N = 70$ ). Таким образом, на положение квантили высокого уровня не влияют не только отсчеты вариационного ряда, лежащие в его левой и средней части, но также и большая часть отсчетов правой части ряда. При прогнозировании характеристических нагрузок с периодом по-

вторяемости 50 лет можно ограничиться, например, пятью старшими отсчетами ряда (в случае малых периодов повторяемости, и, соответственно, меньшего уровня квантили, аналогичным образом могут быть выбраны другие пять отсчетов внутри ряда).

**Методика непараметрического интервального оценивания квантили эмпирического распределения нагрузки**

Новая методика непараметрического оценивания распределения квантили, включающая процедуру пятиточечного сглаживания эмпирических данных, представлена на примере поиска положения медианы квантили уровня  $p = 0,98$  применительно к задаче оценивания характеристических значений снеговой нагрузки.

1) Для известной длины  $N$  эмпирического ряда наблюдений, согласно (2), вычисляются вероятности принадлежности квантили пяти непараметрическим интервалам:  $\gamma_{(N-4, N-3)}$ ,  $\gamma_{(N-3, N-2)}$ ,  $\gamma_{(N-2, N-1)}$ ,  $\gamma_{(N-1, N)}$  и  $\gamma_{(N, \dots)}$ .

2) Из вариационного ряда  $S_{(1)} \leq S_{(2)} \leq \dots \leq S_{(N)}$  выделяется пять старших отсчетов:

$$S_{(N-4)} \leq S_{(N-3)} \leq S_{(N-2)} \leq S_{(N-1)} \leq S_{(N)}. \quad (3)$$

3) Вычисляются значения функции распределения  $G(S_p)$  для значений (3) аргумента:

$$\begin{cases} G(S_{(N)}) = 1 - \gamma_{(N, \dots)}, \\ G(S_{(N-k)}) = G(S_{(N-k+1)}) - \gamma_{(N-k, N-k+1)}, \quad k = 1, 2, 3, 4. \end{cases} \quad (4)$$

4) Отсчеты (4) наносятся на различные диаграммы: с одинаковой осью ординат, соответствующей параметру  $S_p$ , и с различными осями абсцисс – простой шкалой значения функции распределения, логарифмической шкалой, дважды логарифмической шкалой (параметрами  $G$ ,  $-\ln G$ ,  $\ln |\ln G|$ ).

5) Для каждого из трех видов диаграммы выполняется линейная регрессия с интегральной минимизацией квадратической ошибки – методом, представленным в [9].

6) По критерию наибольшего достигнутого коэффициента интегральной детерминации  $R_{DD}$  – квадрат выбирается наилучшая регрессионная модель, с помощью которой вычисляется ордината  $S_p$ , соответствующая медиане искомой квантили, т. е. значению функции ее распределения  $G(S_p) = 0,5$ .

При практическом использовании данной методики возможны ситуации присутствия в вариационном ряду эмпирических данных т. н. «связок» – отсчетов с одинаковыми по величине значениями, которые формально не образуют непараметрического интервала (точнее, его ширина равна нулю). При этом сокращается количество точек для процедуры сглаживания.

Например, если в ряду длиной  $N = 60$  совпадают 57-й, 58-й и 59-й отсчеты, то они образуют связку со «средним» рангом, равным 58. В этом случае правая часть вариационного ряда для сглаживания будет представлена только тремя отсчетами:  $S_{(56)}$ ,  $S_{(58)}$  и  $S_{(60)}$ . Соответственно, следует вычислять три значения функции  $G(S_p)$  по второму из уравнений (4). Если же совпадают два отсчета, то их средний ранг оказывается нецелым (половинным), и, хотя точек для сглаживания остается больше (четыре), расчет вероятностей становится более трудоемким, т. к. вместо (2) необходимо использование неполной бета-функции Пирсона [7].

В ходе применения разработанной методики установлено, что при прогнозировании характеристических значений снеговой нагрузки рассмотрение «связок» вариационного ряда не является обязательным. Поскольку теоретическая вероятность полного равенства двух измерений непрерывной величины равна нулю, практическое совпадение отсчетов следует считать следствием погрешности измерения и округления результатов. Поэтому возможно, например, «восстановить» совпадающие результаты к их значениям «до округления» (с большей разрядностью после запятой) – например, путем случайной генерации значений величины, равномерно распределенной в интервале, соответствующем правилам округления. Однако даже наличие в анализе равных по величине отсчетов не являлось существенным препятствием для эффективного пятиотчетного сглаживания, поскольку достигаемая при этом погрешность прогноза, по сравнению со строгой процедурой формирования «связок», не превышала 0,5 %.

### Непараметрическое прогнозирование характеристических значений снеговой нагрузки для территории Республики Беларусь

С использованием изложенной выше новой непараметрической методики был выполнен анализ эмпирических данных годовых максимумов запаса воды в снеге для 46 метеостанций Республики Беларусь [8]. Процедуру применения новой непараметрической методики проиллюстрируем на примере прогнозирования характеристического значения снеговой нагрузки для метеостанции Лида.

1) Исходный временной ряд наблюдений имеет длину  $N = 70$  (зимние периоды, с 1944–1945 гг. по 2013–2014 гг.). Вероятности принадлежности пяти непараметрическим интервалам  $\gamma_{(66,67)}$ ,  $\gamma_{(67,68)}$ ,  $\gamma_{(68,69)}$ ,  $\gamma_{(69,70)}$  и  $\gamma_{(70, \dots)}$  соответствуют вычисленным ранее значениям, представленным в последней строке таблицы 1.

2) После построения вариационного ряда выделяем, начиная с 66-го, пять наибольших отсчетов запаса воды в снеге (100 мм запаса воды соответствуют 1 кПа снеговой нагрузки): 108 мм, 109 мм, 118 мм, 120 мм и 147 мм (наблюдались, соответственно, в 1979–80 гг., 1969–70 гг., 1995–96 гг., 1985–86 гг. и 1978–79 гг.).

3) По (3.16) вычисляем значения функции распределения  $G(S_p)$  для выделенных значений аргумента:

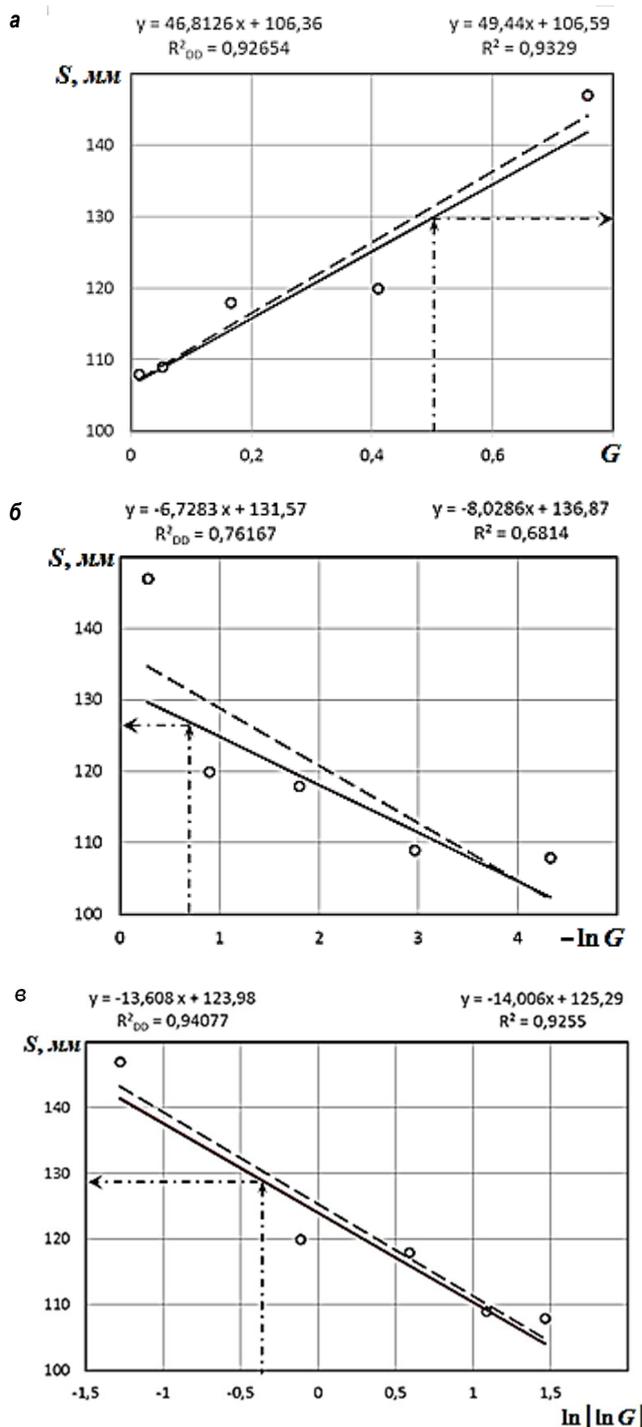
$$\begin{aligned} G(S_{(70)}) &= 1 - \gamma_{(70, \dots)} = 0,7569; \\ G(S_{(69)}) &= G(S_{(70)}) - \gamma_{(69,70)} = 0,4096; \\ G(S_{(68)}) &= G(S_{(69)}) - \gamma_{(68,69)} = 0,165; \\ G(S_{(67)}) &= G(S_{(68)}) - \gamma_{(67,68)} = 0,0519; \\ G(S_{(66)}) &= G(S_{(67)}) - \gamma_{(66,67)} = 0,0132. \end{aligned}$$

4) Строим три варианта диаграммы с одинаковой осью ординат (величина запаса воды в снеге) и различными шкалами для оси абсцисс – простую шкалой значения функции распределения ( $G$ ); логарифмическую шкалу ( $-\ln G$ ); дважды логарифмическую шкалу ( $\ln |\ln G|$ ), и на них наносим выбранные эмпирические точки, как показано на рисунке 1.

5) Для каждого из трех видов диаграммы выполняем линейную регрессию (выравнивание) с интегральной минимизацией квадратической ошибки (для сравнения – классическим методом наименьших квадратов), как показано на рисунке 1.

6) Наибольший коэффициент интегральной детерминации  $R_{DD} = 0,94077$  достигнут на диаграмме по рисунку 3.9в. Используем полученную регрессионную модель для оценивания квантили уровня 0,98 (коэффициенты модели умножим на 0,01 для пересчета 100 мм запаса воды в 1 кПа снеговой нагрузки):  $S_{0,98}(G) \approx 0,0137 \cdot \ln |\ln G| + 1,240$  кПа. Подставляя в уравнение  $G = 0,5$  (оценка положения медианы квантили), получаем:  $S_{0,98}(G) \approx 1,29$  кПа.

Из приведенного примера следует, что во всех трех вариантах шкалы абсцисс отсчеты функции распределения не являются эквидистантными, поэтому выполнение линейной регрессии с интегральной минимизацией квадратической ошибки дает, по сравнению с классическим методом наименьших квадратов, заметно отличающиеся (в сторону снижения) и более обоснованные результаты прогнозирования.



а – с простой шкалой абсцисс;  
 б – с логарифмической шкалой абсцисс;  
 в – с дважды логарифмической шкалой абсцисс

**Рисунок 1** – Линейная регрессия эмпирических точек максимумов запаса воды в снеге для метеостанции Лида с интегральной минимизацией квадратической ошибки (сплошные линии, уравнения вверху слева) и классическим методом наименьших квадратов (пунктирные линии, уравнения вверху справа)

В таблице 2 представлены полученные результаты прогнозирования характеристических значений снеговой нагрузки для периода повторяемости 50 лет по 46 метеостанциям. Для сравнения в таблице приведены результаты прогнозирования, полученные по предыдущей методике с точечной оценкой функции распределения, в том числе с исключением рекордных значений, если таковые имеют большой период повторяемости [6].

**Таблица 2** – Характеристические значения снеговой нагрузки (период повторяемости 50 лет, 0,98-квантиль вероятностного распределения годовых максимумов) для 46 метеостанций Республики Беларусь

Регион, метеостанция	Точечная оценка квантили на хвостовой части эмпирического распределения, кПа		Интервальная оценка медианы квантили с пятиточечным выравниванием, кПа
	без удаления рекордных значений	с удалением рекордных значений с периодом повторяемости (лет)	
<b>Брестская область</b>			
Барановичи	1,43	1,25 (>1000)	1,37
Ганцевичи	1,22	–	1,19
Ивацевичи	1,13	–	1,10
Пружаны	1,05	0,92 (800)	1,12
Высокое	1,61	–	1,51
Полесская	1,22	1,01 (>1000)	1,18
Пинск	1,31	1,15 (330)	1,26
Брест	1,05	–	1,00
<b>Витебская область</b>			
Езерище	1,47	–	1,43
Верхнедвинск	1,53	1,39 (320)	1,48
Полоцк	1,48	1,38 (390)	1,47
Шарковщина	1,36	–	1,31
Лынтупы	1,88	–	1,83
Докшицы	1,73	–	1,66
Лепель	1,39	–	1,38
Сенно	1,22	–	1,21
Орша	1,88	–	1,87
Витебск	1,82	–	1,77
<b>Гомельская область</b>			
Жлобин	1,28	1,20 (590)	1,25
Чечерск	1,60	–	1,56
Октябрь	1,33	–	1,27
Василевичи	1,36	–	1,31
Житковичи	1,29	–	1,34
Мозырь	1,46	–	1,38
Лельчицы	1,16	–	1,12
Брагин	1,48	–	1,43
Гомель	1,39	1,29 (360)	1,35
<b>Гродненская область</b>			
Ошмяны	1,33	–	1,28
Лида	1,24	–	1,29
Новогрудок	1,90	–	1,84
Волковыск	1,41	–	1,35
Гродно	1,40	–	1,35
<b>Могилевская область</b>			
Горки	1,60	–	1,58
Кличев	1,48	–	1,44
Славгород	1,48	–	1,45
Костюковичи	1,58	–	1,52
Бобруйск	1,35	–	1,32
Могилев	1,46	–	1,50
<b>Минская область</b>			
Вилейка	1,39	–	1,36
Борисов	1,65	–	1,60
Воложин	1,66	–	1,59
Березино	1,62	1,43 (>1000)	1,59
Столбцы	1,50	–	1,44
Марына Горка	1,48	1,31 (930)	1,42
Слуцк	1,26	–	1,24
Минск	1,48	–	1,46

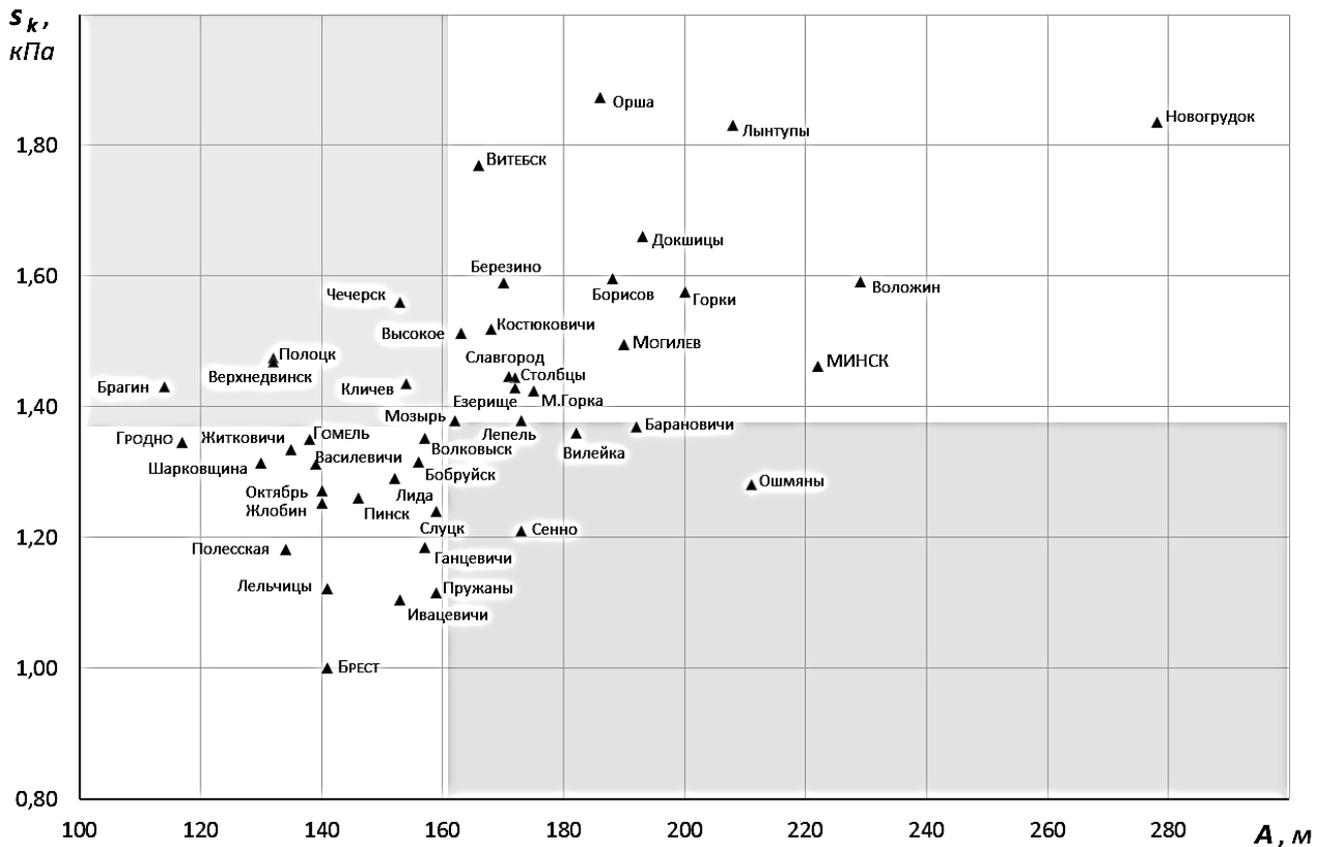
Подавляющее большинство результатов, полученных новым методом, заметно (от 0,01 до 0,1 кПа) ниже, чем оценки, полученные по предыдущей методике. Важно отметить, что в новой методике рекордные значения из временных рядов не удалялись. Для временных рядов, в которых, при оценивании предыдущей методики, условия позволяли удалить из рассмотрения рекордные значения (что ведет к снижению оценки), полученные новым методом результаты находятся внутри диапазона двух таких оценок. Это свидетельствует о корректности нового метода прогнозирования. Лишь в четырех случаях (метеостанции Пружаны, Житковичи, Лида, Могилев) полученная новым методом, несколько (на величину до 0,07 кПа) превысила оценку прежней методики, что может быть связано с принципиальной приближенностью любых методов прогнозирования, а также особенностями структуры конкретных временных рядов в правой их части.

**Районирование характеристических значений снеговой нагрузки в Республике Беларусь с зависимостями от высотного положения местности**

Выше, при обсуждении несовершенств методики точечного оценивания и установления типа эмпирической функции распределения

снеговой нагрузки, указывалось на существенную неопределенность районирования территории по типам распределений. Наряду с этим, для определения характеристических значений нагрузки в некоторых географических пунктах (в северо-западной части района III, согласно [6]) привлекались высотные зависимости. Непараметрическое прогнозирование характеристической снеговой нагрузки в принципе не предусматривает оценивания распределения нагрузки, а значит и определения типа его хвостовой части. В связи с этим, а также для оптимизации количества снеговых районов, была предложена следующая концепция: установление фоновых районных значений снеговой нагрузки с их корректировкой в зависимости от альтитуды (высоты над уровнем моря) местности.

В таблице 3 представлены данные о величине характеристических значений снеговой нагрузки  $S_k$  (данные из таблицы 2) и альтитуде  $A$  для рассматриваемых метеостанций. Для предварительной оценки тесноты корреляционной связи между альтитудой и снеговой нагрузкой приведенные в табл. 3 данные расположим на соответствующей диаграмме рассеяния, представленной на рисунке 2.



**Рисунок 2** – Корреляционная диаграмма зависимости характеристического значения снеговой нагрузки от высоты местности для территории Республики Беларусь

Разделим поле диаграммы на четыре квадранта горизонтальной и вертикальной линиями, положение которых соответствует медианным значениям исследуемых факторов:  $Me(A) = 160,5 м$ ,  $Me(S_k) = 1,38 кПа$ . Девять точек расположены в левом верхнем и правом нижнем квадрантах диаграммы (отмечены на рисунках серой заливкой), что означает несоответствие знаков отклонений исследуемых параметров от медианных значений. Большинство (а именно 35) точек расположено в левом нижнем и правом верхнем квадрантах, где знаки отклонений нагрузки и высоты местности от своих медианных значений совпадают. Снеговая нагрузка для станций Мозырь и Лепель совпадает с медианным значением, поэтому эти две станции в подсчете не участвуют.

Вычислим коэффициент Фехнера парной корреляции знаков [10]:

$$K_{\Phi} = \frac{n_C - n_H}{n_C + n_H} = \frac{35 - 9}{35 + 9} = 0,59, \tag{5}$$

где  $n_C$  и  $n_H$  – число точек на диаграмме, соответственно, с совпадением и с несопадением знаков отклонений от медианных значений.

Величина коэффициента Фехнера свидетельствует о положительной и заметной (согласно шкале Чеддока [10]) связи параметров альтитуды и нагрузки. Установленный факт наличия заметной корреляции сам по себе не означает существования единственной математической функций (регрессии), с хорошей точностью связывающей все эмпирические данные. Возможен, однако, поиск регрессии

(точнее, функции, выполняющей оценку сверху величины снеговой нагрузки в зависимости от высоты местности) для отдельных районов исследуемой территории. Для этого необходимо объединять территориально соседствующие метеостанции в кластеры, если для образующейся группы удается найти простую (например, линейную) закономерность взаимосвязи «альтитуда-нагрузка».

Принцип выделения кластеров из соседних метеостанций на примере западной части территории Республики Беларусь иллюстрируется рисунком 3, в южной и юго-восточной части территории – рисунком 4, в северной и северо-восточной части территории – рисунком 5. Некоторые пункты (например, Лида, Волковыск) могут ока-

заться в различных, но соседних группах. Некоторые из найденных линий регрессии, например, для группы «Ивацевичи-Новогрудок» (рисунок 3) и групп «Верхнедвинск-Орша» и «Шарковщина-Лынтупы» (рисунок 5), оказались весьма близкими по угловому коэффициенту. Это свидетельствует, в частности, об объективной устойчивости рассматриваемых зависимостей и позволяет в дальнейшем оптимизировать районирование территории с точки зрения количества районов. С другой стороны, наблюдаются явные артефакты – на примере метеостанции Сенно, имеющей аномально малое индивидуальное значение снеговой нагрузки, что не позволяет обоснованно включить ее ни в одну из регрессионных зависимостей.

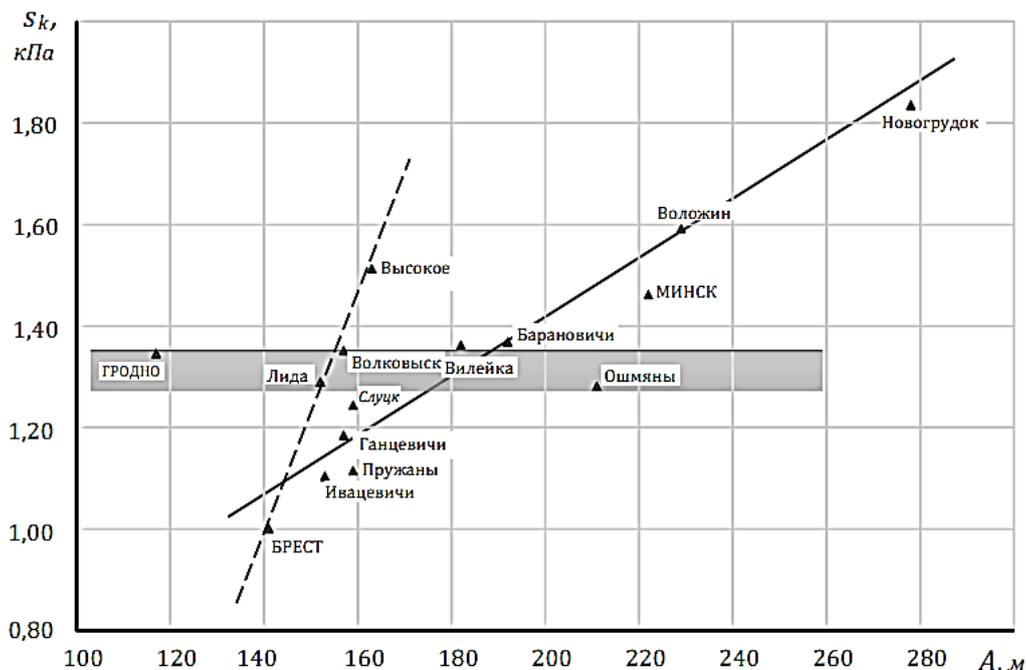


Рисунок 3 – Группирование метеостанций в западной части территории Республики Беларусь по принципу наличия линейной регрессии

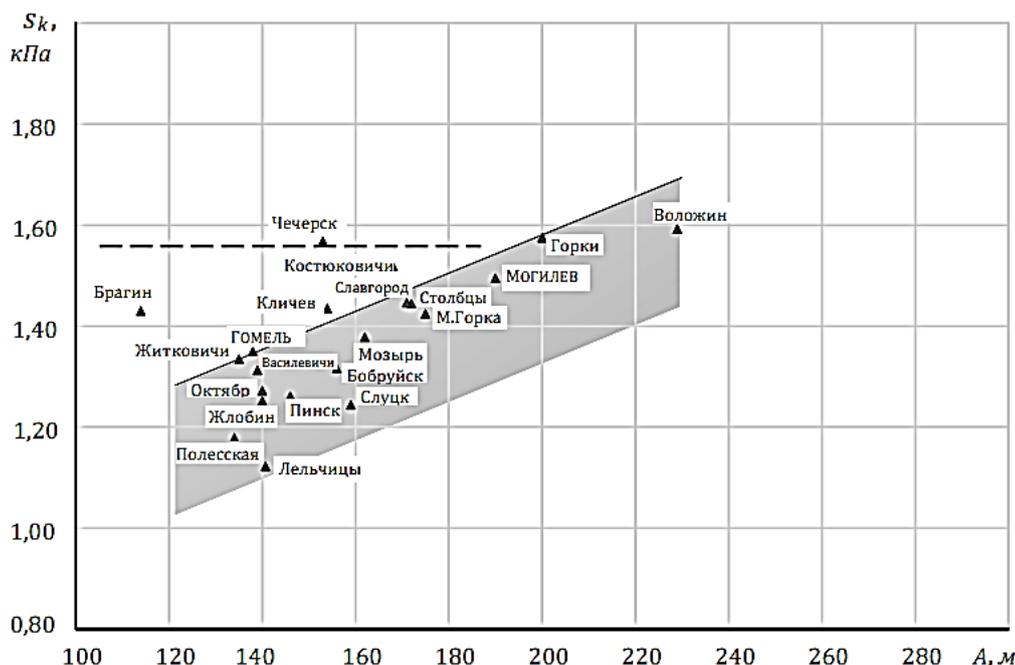


Рисунок 4 – Группирование метеостанций в южной и юго-восточной части территории Республики Беларусь по принципу наличия линейной регрессии

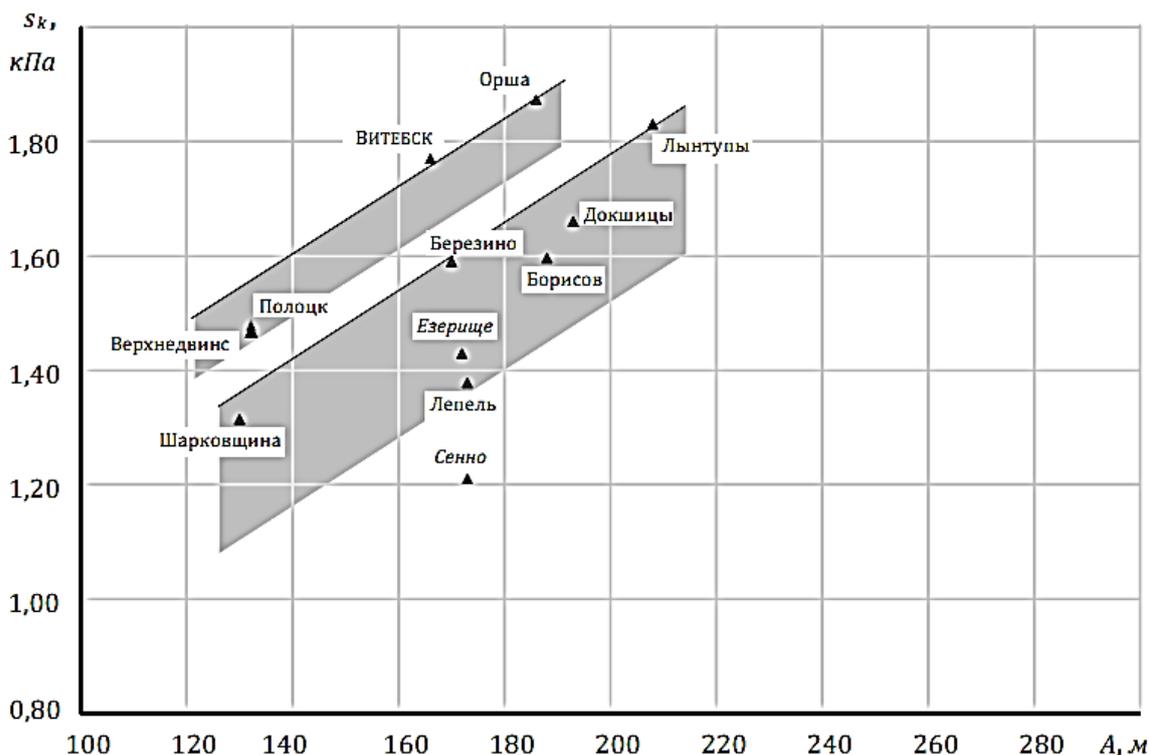


Рисунок 5 – Группирование метеостанций в северной и северо-восточной части территории Республики Беларусь по принципу наличия линейной регрессии

Установленные регрессионные зависимости снеговой нагрузки от высоты местности в отдельных группах (кластерах) территориально соседствующих станций, после представления к удобному для практического использования виду, сведены в таблицу 3 [11].

Таблица 3 – Зависимости характеристических значений снеговой нагрузки  $S_k$  [кПа] от альтитуды  $A$  [м] для территории Республики Беларусь [11]

Номер района	Номер подрайона	Метеостанции	Регрессионная зависимость «альтитуда-нагрузка»
1	1а	Гродно, Ошмяны, Вилейка, <u>Лида</u> , <u>Волковыск</u> , Слуцк, Барановичи	$s_k = 1,35$ (константа)
1	1б	Брест, Высокое, <u>Лида</u> , <u>Волковыск</u>	$s_k = 1,35 + 0,022(A - 155)$
1	1в	Гомель, Житковичи, Василевичи, Пинск, Октябрь, Жлобин, Кличев, Полесская, Лельчицы, Мозырь, Бобруйск, Славгород, Столбцы, Марьино Горка, Воложин, Горки, Могилев, <u>Слуцк</u>	$s_k = 1,35 + 0,0038(A - 140)$
2	2а	Езерице, Верхнедвинск, Новополоцк, Витебск, Орша	$s_k = 1,45 + 0,006(A - 125)$
2	2б	Березино, Борисов, Сенно, Лепель, Докшицы, Шарковщина, Лынтупы	$s_k = 1,45 + 0,006(A - 150)$
2	2в	Пружаны, Ивацевичи, Ганцевичи, Минск, Воложин, Новогрудок, <u>Барановичи</u>	$s_k = 1,45 + 0,006(A - 210)$
3	–	Костюковичи, Брагин, Чечерск	$s_k = 1,55$ (константа)

Некоторые группы, близкие по угловому коэффициенту регрессии и/или по фоновому (среднему) значению нагрузки, рассматриваются как подрайоны более крупных объединенных районов. В таблице 3 курсивом выделены метеостанции, принадлежность которых к районам (подрайонам) является вариативной. На основании климатологических и географических соображений такие станции, в итоге, отнесены к конкретным районам, что выделено в таблице подчеркиванием.

Для территории Республики Беларусь, таким образом, устанавливаются три снеговых района с фоновыми значениями снеговой нагрузки 1,35 кПа, 1,45 кПа и 1,55 кПа. Характеристическое значение снего-

вой нагрузки для конкретного объекта строительства определяется, в большинстве случаев, с учетом высотного положения площадки (местности). В районах 1 и 2 выделяются по три подрайона. Границы районов и подрайонов увязаны с физико-географическими особенностями территории, в том числе Белорусского Полесья ([11]), как показано на рисунках 6, 7.

Выполненные исследования стали основой для разработки Изменений в Национальное приложение к ТКП EN 1991-1-3-2009 Еврокод 1: Воздействия на конструкции. Часть 1–3: Общие воздействия. Снеговые нагрузки.

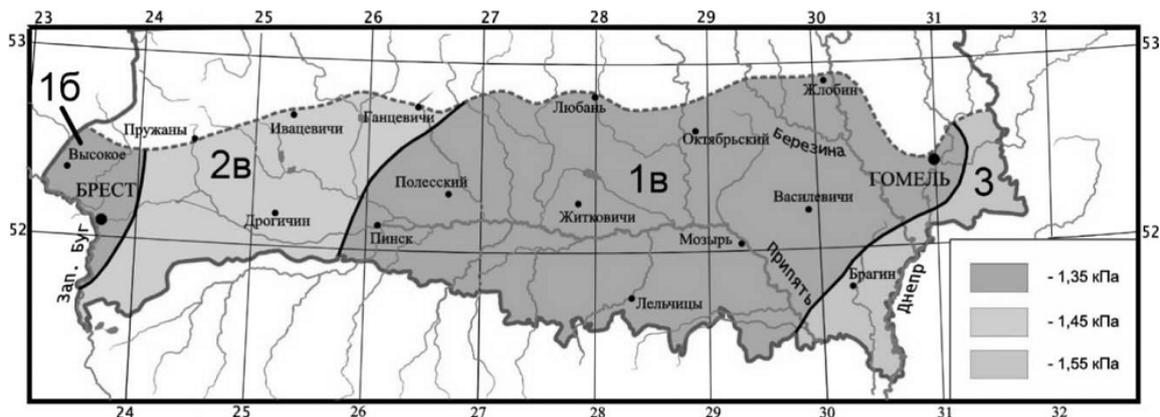


Рисунок 6 – Районирование территории Белорусского Полесья по характеристическим значениям снеговой нагрузки (используется совместно с закономерностями «альтитуда-нагрузка» из таблицы 3)

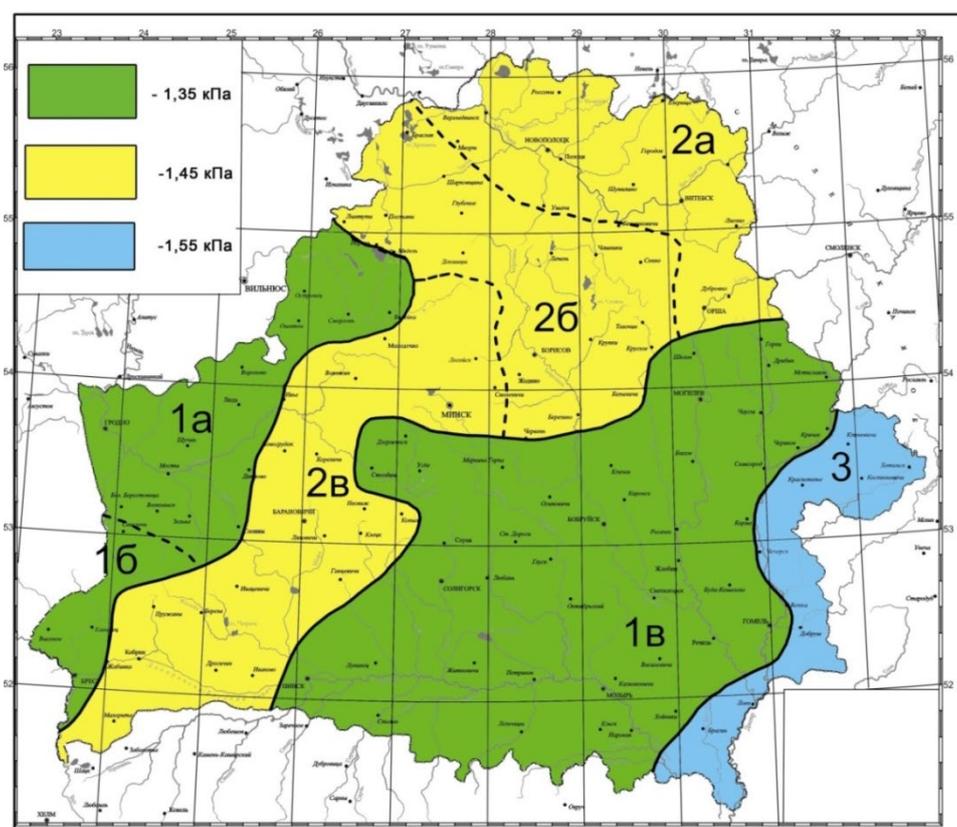


Рисунок 7 – Районирование территории Республики Беларусь по характеристическим значениям снеговой нагрузки (используется совместно с закономерностями «альтитуда-нагрузка» из таблицы 3)

#### Заключение

Разработанная методика непараметрического интервального оценивания квантили эмпирического распределения снеговой нагрузки не предусматривает ни оценки самого распределения, ни определения типа распределения экстремальных значений. При этом обеспечивается прогнозирование характеристических значений нагрузки с заданным уровнем достоверности. Эффективность методики подтверждена на примере оценивания медианы квантили уровня 0,98 (соответствует периоду повторяемости 50 лет) при прогнозировании характеристических значений снеговой нагрузки для территории Республики Беларусь. Установлены устойчивые регрессионные зависимости прогнозных значений нагрузки от высоты местности над уровнем моря (альтитуды), на основании чего предложено районирование территории, учитывающее закономерности «альтитуда-нагрузка», внесенное в качестве изменений в действующие ТНПА по нормированию климатических нагрузок.

#### Список цитированных источников

1. Райзер, В. Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций / В. Д. Райзер. – М.: Стройиздат, 1995. – 352 с.
2. Лидбеттер, М. Экстремумы случайных последовательностей и процессов / М. Лидбеттер, Г. Линдгрэн, Х. Ротсен. – М.: Мир, 1989. – 392 с.
3. Учет метеорологических явлений при оценке площадок для атомных электростанций: руководство по безопасности. Серия изданий по безопасности, № NS-G-3.4. – Вена: Международное агентство по атомной энергии, 2005. – 33 с.
4. Шпете, Г. Надежность строительных несущих конструкций / Г. Шпете; пер. с нем. О. О. Андреева. – М.: Стройиздат, 1994. – 288 с.
5. Ground Snow Loads in Belarusian Code / V. Tur [et al.] // Environmental Effects on Building, Structures, Materials and People / ed.: A. Flaga, T. Lipecki. – Lublin: Alf-Graf, 2007. – P. 131–138.

6. Нормирование снеговых нагрузок для территории Республики Беларусь / В. В. Тур [и др.] // Строительная наука и техника. – 2008. – № 2 (17). – С. 27–45.
7. David, H. A. Order statistics / H. A. David. – New York : John Wiley & Sons, 1981. – 360 p.
8. Проведение исследований изменения климатических воздействий на строительные конструкции в Республике Беларусь с целью внесения изменений в действующие ТНПА : отчет о НИР (заключ.) / Научно-проектно-производств. республ. унитарное предприятие «Стройтехнорм» ; рук. И. Л. Лишай. – Минск, 2015. – 205 с. – № ГР 20143712.
9. Дереченник, С. С. Интегральная оценка качества регрессионных моделей / С. С. Дереченник, А. В. Дмитриева, С. С. Дереченник-мл. // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2009. – № 5 (59) : Физика, математика, информатика. – С. 77–80.
10. Елисеева, И. И. Общая теория статистики / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев. – М.: Финансы и Статистика, 2002. – 480 с.
11. Климатические воздействия на конструкции зданий и сооружений / В. В. Тур [и др.] // Природообустройство Полесья: монография : в 4 кн. / под общ. науч. ред. Ю. А. Мажайского [и др.]. – Рязань : Мещер. ф-л ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова», 2018. – Кн. 1: Белорусское Полесье. Т. 1: Природно-ресурсный потенциал. – Разд. 3.9. – С. 235–246.
4. SHpete, G. Nadezhnost' stroitel'nyh ne-sushchih konstrukcij / G. SHpete ; per. s nem. O. O. Andreeva. – M. : Strojizdat, 1994. – 288 s.
5. Ground Snow Loads in Belarusian Code / V. Tur [et al.] // Environmental Effects on Building, Structures, Materials and People / ed.: A. Flaga, T. Lipecki. – Lublin : Alf-Graf, 2007. – P. 131–138.
6. Normirovanie snegovykh nagruzok dlya territorii Respubliki Belarus' / V. V. Tur [i dr.] // Stroitel'naya nauka i tekhnika. – 2008. – № 2 (17). – S. 27–45.
7. David, H. A. Order statistics / H. A. David. – New York : John Wiley & Sons, 1981. – 360 p.
8. Provedenie issledovaniy izmeneniya klimaticheskikh vozdeystviy na stroitel'nye konstrukcii v Respublike Belarus' s cel'yu vnoseniya izmeneniy v dejstvuyushchie TNPA : otchet o NIR (zaklyuch.) / Nauchno-proektno-proizvodstv. respubl. unitarnoe predpriyatie «Strojtekhnorm» ; ruk. I. L. Lishaj. – Minsk, 2015. – 205 s. – № GR 20143712.
9. Derechennik, S. S. Integral'naya ocenka kachestva regressionnykh modelej / S. S. Derechennik, A. V. Dmitrieva, S. S. Derechennik-ml. // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2009. – № 5 (59) : Fizika, matematika, informatika. – S. 77–80.
10. Eliseeva, I. I. Obshchaya teoriya statistiki / I. I. Eliseeva, M. M. YUzbashev. – M.: Finansy i Statistika, 2002. – 480 s.
11. Klimaticheskie vozdeystviya na konstrukcii zdaniy i sooruzhenij / V. V. Tur [i dr.] // Prirodoobustrojstvo Poles'ya: monografiya: v 4 kn. / pod obshch. nauch. red. YU. A. Mazhajsikogo [i dr.]. – Ryazan' : Meshcher. f-l FGBNU «VNIIGiM im. A. N. Kostyakova», 2018. – Kn. 1: Belorusskoe Poles'e. T. 1: Prirodno-resursnyj potencial. – Razd. 3.9. – S. 235–246.

#### References

1. Rajzer, V. D. Raschet i normirovanie nadezhnosti stroitel'nykh konstrukcij / V. D. Rajzer. – M. : Strojizdat, 1995. – 352 s.
2. Lidbetter, M. Ekstremumy sluchajnykh posledovatel'nostej i processov / M. Lidbetter, G. Lindgren, H. Rotsen. – M. : Mir, 1989. – 392 s.
3. Uchet meteorologicheskikh yavlenij pri ocenke ploshchadok dlya atomnykh elektrostancij: rukovodstvo po bezopasnosti. Seriya izdaniy po bezopasnosti, № NS-G-3.4. – Vena : Mezhdunarodnoe agentstvo po atomnoj energii, 2005. – 33 s.

*Материал поступил 27.03.2024, одобрен 27.03.2024, принят к публикации 27.03.2024*

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ МАЛЫХ ВЫБОРОК С ЗАДАННОЙ ДОСТОВЕРНОСТЬЮ

С. С. Дереченник<sup>1</sup>, Н. Н. Мешечек<sup>2</sup>

<sup>1</sup> К. т. н., доцент, заведующий кафедрой электронных вычислительных машин и систем УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ssderechennik@gmail.com

<sup>2</sup> Аспирант, старший преподаватель кафедры электронных вычислительных машин и систем УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: meshechek88@gmail.com

### Реферат

В силу случайной природы функционирования реальных технических систем как физических объектов, их состояние работоспособности, определяемое как разность между сопротивлением и внешней нагрузкой, не может быть определено абсолютно точно. В практических задачах анализа надежности строительных конструкций оценивание параметров сопротивления и нагрузок выполняется на основе сравнительно малых выборок результатов реальных измерений, статистический анализ которых обычно связан с построением эмпирических функций распределения. Известные классические методы построения такой функции не позволяют определять, ни тем более задавать, достоверную вероятность (статистическую обеспеченность) получаемых результатов.

Предложены два метода оценивания эмпирической функции распределения, основанные на порядковых статистиках: достоверная оценка квантилей искомой выбранного уровня, а также оценка уровня квантили для имеющихся точек (данных выборки). Первый метод связан с численным восстановлением функции распределения квантили, второй – с необходимостью численного решения обратной непараметрической задачи для самой эмпирической функции распределения. Оба метода включают задание необходимого уровня достоверной вероятности результата. Показана их эффективность для малых выборок эмпирических данных.

**Ключевые слова:** эмпирическая функция распределения, непараметрический метод, малая выборка, порядковая статистика, квантиль, достоверная вероятность.

### NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEM OF ESTIMATING THE EMPIRICAL DISTRIBUTION FUNCTION FOR SMALL SAMPLES WITH A GIVEN CONFIDENCE

S. S. Derechennik, N. N. Meshechek

### Abstract

Due to the random nature of the functioning of real technical systems as physical objects, their state of operability, defined as the difference between resistance and external load, cannot be determined absolutely accurately. In practical tasks of analyzing the reliability of building structures, the estimation of resistance and load parameters is performed on the basis of relatively small samples of real measurement results, the statistical analysis of which is usually associated with the construction of empirical distribution functions. The well-known classical methods of constructing such a function do not allow us to determine, much less set, the confidence probability (statistical security) of the results obtained.

Two methods of estimating the empirical distribution function based on ordinal statistics are proposed: a reliable estimate of the quantiles of the desired selected level, as well as an estimate of the quantile level for available points (sample data). The first method is associated with the numerical reconstruction of the quantile distribution function, the second with the need for a numerical solution of the inverse nonparametric problem for the empirical distribution function itself. Both methods involve setting the required confidence level of the result. Their effectiveness is shown for small samples of empirical data.

**Keywords:** empirical distribution function, nonparametric method, small sample, ordinal statistics, quantile, confidence probability.

### Введение

Согласно действующим нормативным документам, надежность технических систем при их внезапных отказах, в частности механических отказах, определяется вероятностью (риском) потери элементом (элементами) системы своей несущей способности в условиях некоторого внешнего воздействия (нагрузки) окружающей среды. Поэтому исходными данными для расчета надежности могут выступать оценки несущей способности элементов исходя из параметров примененных материалов, а также оценки параметров нагруженности элементов (частей конструкции). При этом такие оценки могут выполняться расчетным или экспериментальным путем на различных стадиях жизненного цикла объекта – при проектировании, создании, а также в процессе эксплуатации [1].

Функционирование реальных технических систем как физических объектов содержит в себе элементы случайности. С точки зрения несущей способности (прочности), она проявляется в разбросе размеров изделий, локальных неоднородностях структуры и состава материалов, изменчивости технологических условий обработки. Внешние нагрузки также зависимы от стохастичности условий функционирования объекта, связанной со случайными проявлениями

воздействий окружающей среды. Указанные характеристики, в подавляющем большинстве случаев, следует рассматривать как непрерывные случайные величины. В теории и практике анализа надежности наиболее распространен подход, основанный на принятии, для описания генеральной совокупности случайной величины, некоторой параметрической вероятностной модели. Однако реальные инженерные данные далеко не всегда можно рассматривать как выборку из абстрактной генеральной совокупности с известным (например, нормальным) распределением, при этом в практических задачах оценивания искомых параметров прочности или нагрузок, в особенности при наличии малых эмпирических выборок результатов измерений, применимы и вполне эффективны непараметрические (порядковые) статистики [2].

На начальном этапе статистического (как параметрического, так и непараметрического) анализа эмпирических данных обычно требуется определить эмпирическую функцию распределения как оценку (эмпирическую меру) неизвестной функции распределения генеральной совокупности по имеющейся выборке данных измерений.

**Оценки эмпирической функции распределения с неизвестной достоверностью**

Классическим определением ([3]) эмпирической функции распределения случайной выборки  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  непрерывной случайной величины  $X$  является неубывающая ступенчатая функция вероятности  $\hat{F}(X) = \Pr(x < X)$  с  $\hat{F}(-\infty) = 0$  и  $\hat{F}(\infty) = 1$ . Эта функция определяет частотное (эмпирическое) распределение, которое может быть найдено, например, по формуле

$$\hat{F}(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(x_i < X), \quad (1)$$

где функция  $I(x_i < X)$  – индикатор событий, равный 1 при  $x_i < X$  и 0 в противном случае.

Для удобства графического построения данной кусочно-непрерывной кумулятивной функции, возрастающей на величину  $1/n$  в каждой из точек данных, обычно выполняют ранжирование данных, т. е. преобразуют исходную выборку, например временной ряд измерений, в вариационный (обычно возрастающий) ряд  $(x_{(1)} \leq \dots \leq x_{(r)} \leq \dots \leq x_{(n)})$ , где  $r$  – ранг конкретного элемента в ранжированной выборке. Заметим, что операция ранжирования сама по себе является уже действием из аппарата порядковых статистик.

Известно, что функция (1) является несмещенной состоятельной оценкой неизвестной функции распределения  $F(X)$  для гипотетически бесконечной выборки случайной величины. Однако данное теоретическое утверждение формулируется для случая наращивания числа членов выборки (на практике – до 35 и более). При малых же размерах выборок уже интуитивно понятно, что такая оценка оказывается завышенной на правом конце (возрастающего) вариационного выборочного ряда, поскольку, например, из (1) следует, что  $\hat{F}(X = x_{(n)} < \infty) = 1$ , но наибольшее значение  $x_{(n)}$  в данной выборке, конечно, не является предельным, поэтому не исключено его превышение в другой выборке (либо же при наращивании текущей выборки). Аналогично, равная нулю оценка эмпирической функции распределения левее начала вариационного ряда будет заниженной. Наиболее приближенными к истинным значениям представляются оценки в области среднего, соответствующего величине  $F(X) = 0,5$ .

Таким образом, получаемые соотношением вида (1) оценка сопротивления элемента (в левой части вариационного ряда) и оценка внешней нагрузки (в правой) являются неточными. Это весьма проблематично с точки зрения безопасности, поскольку может привести к неверным расчетам вероятности отказа, например к переоценке надежности конструкции [4]. В инженерной практике данная проблема решается путем введения специально калибруемых коэффициентов безопасности. Широко известны также варианты скорректированных формул оценивания эмпирической функции распределения, например (с использованием ранга  $r$  элемента упорядоченной выборки):

$$\hat{F}(X) = \frac{r}{n+1}, \quad (2)$$

$$\hat{F}(X) = \frac{r+1/2}{n+1}, \quad (3)$$

которые призваны уменьшать систематическую ошибку оценки в левой и правой частях вариационного ряда (т. е. на «хвостах распределения»). Однако все указанные выше методы не дают ответа

на важный вопрос: какова статистическая обеспеченность получаемой оценки эмпирической функции, например в виде доверительной вероятности вывода о принадлежности функции некоторому интервалу (например, «вероятность не превышает величину 0,9»)? По нашему мнению, статистические выводы относительно искомого функции распределения (например, верхняя граница функции на ее левом хвосте либо нижняя граница – на правом) должны быть обеспечены конкретным значением доверительной вероятности – затем, чтобы дальнейшие расчеты надежности конструкции и последующие действия имели некоторую хотя бы известную (а лучше задаваемую) меру достоверности. Полагаем, что вывод о надежности конструкции, имеющий требуемую достоверность  $\gamma$  (т. е. сделанный на уровне значимости  $\alpha = 1 - \gamma$ ), должен основываться на использовании эмпирических функций распределения (или/и иных оценок, например, квантилей распределения уровня  $0 < p < 1$ ), найденных с той же достоверностью.

Абсолютно достоверный расчет надежности конструкции теоретически выполним лишь при известных (теоретических) функциях распределения, как для случайной величины сопротивления элемента, так и для действующей на него нагрузки. Такой метод расчета известен как метод предельных состояний, но на практике применим только в варианте «полувероятностный метод», поскольку теоретические функции распределения неизвестны и заменяются их оценками (различного вида, зачастую с использованием произвольно выбранных типовых функций), обеспеченность которых также неизвестна. Поэтому данный метод требует введения уже упомянутых коэффициентов безопасности – по сути, дополнительных коэффициентов конструкционного запаса. Увеличение коэффициентов ведет к повышению достоверности выводов о надежности (безопасности), но самое важное состоит в том, что сама достоверность остается неизвестной.

**Достоверная оценка заданных квантилей эмпирической функции распределения**

Оценивание квантилей распределения случайной величины с известной достоверностью может быть выполнено с применением аппарата непараметрических (порядковых, ранговых) статистик [5]. Здесь каждый результат эмпирической выборки, как член вариационного ряда  $x_{(r)}$ , имеет ранг  $1 \leq r \leq n$  (является  $r$ -й порядковой статистикой), а квантиль  $X_p$  уровня  $p$  определяется как принадлежащая непараметрическому интервалу  $(x_{(r)}, x_{(s)})$  с известной доверительной вероятностью  $\gamma(r \dots s)$ . В частном случае, если интервалы определены соседними статистиками  $x_{(r)}$  и  $x_{(r+1)}$ , доверительная вероятность определяется из биномиального распределения:

$$\gamma(r, r+1) = C_n^r p^r (1-p)^{n-r}. \quad (4)$$

Отметим, что значению  $r = n$  соответствует вероятность  $\gamma(n, n+1) = \gamma(n, \dots)$  принадлежности квантили теоретически бесконечному интервалу  $(x_{(n)}, \infty)$ , а значению  $r = 0$  – вероятность  $\gamma(0, 1) = \gamma(\dots, 1)$  принадлежности физически корректному (например, для параметра прочности материала) интервалу  $(0, x_{(1)})$ . В таблице 1 приведены примеры расчета доверительных вероятностей принадлежности квантилей некоторых уровней доверительным интервалам для выборок размера  $n = 7$ .

**Таблица 1** – Вероятность принадлежности квантилей непараметрическим интервалам

Обозначение вероятности принадлежности квантили $X_p$ к интервалу $[X_{(r)}, X_{(s)}]$	$\gamma(\dots, 1)$	$\gamma(1, 2)$	$\gamma(2, 3)$	$\gamma(3, 4)$	$\gamma(4, 5)$	$\gamma(5, 6)$	$\gamma(6, 7)$	$\gamma(7, \dots)$
Значение вероятности для квантили уровня $p = 0,05$	0,6983	0,2573	0,0406	0,0036	0,0002	6E-06	1E-07	8E-10
Значение вероятности для квантили уровня $p = 0,10$	0,4783	0,3720	0,1240	0,0230	0,0026	0,0002	6E-06	1E-07
Значение вероятности для квантили уровня $p = 0,25$	0,1335	0,3115	0,3115	0,1730	0,0577	0,0115	0,0013	6E-05
Значение вероятности для квантили уровня $p = 0,50$	0,0078	0,0547	0,1641	0,2734	0,2734	0,1641	0,0547	0,0078
Значение вероятности для квантили уровня $p = 0,80$	1E-05	0,0004	0,0043	0,0287	0,1147	0,2753	0,367	0,2097
Значение вероятности для квантили уровня $p = 0,90$	1E-07	6E-06	0,0002	0,0026	0,023	0,124	0,372	0,4783

Из таблицы 1 следует крайне малая вероятность попадания квантилей низкого уровня в правую (верхнюю) часть вариационного ряда, равно как и квантилей высокого уровня – в левую (нижнюю) его часть. Очевидна также «зеркальность» (слева направо / справа налево) вычисленных значений для квантилей, сумма уровней которых равна единице (например, для квантилей уровней  $p = 0,1$  и  $p = 0,9$ ), равно как и симметричность значений в строке таблицы, соответствующей медиане искомого распределения ( $p = 0,5$ ) относительно серединного (четвертого) элемента вариационного ряда.

Суммируя значения вероятностей (4) по интервалам слева направо (от «нулевого» до заданного), находим оценку  $\hat{G}(X_p)$  функции распределения искомого квантили во всех точках, определенных имеющимися статистиками  $x(1), x(2), \dots, x(n)$ :

$$\begin{cases} \hat{G}(X_p = x(1)) = \gamma(\dots, 1), \\ \hat{G}(X_p = x(r+1)) = \hat{G}(X_p = x(r)) + \gamma(r, r+1). \end{cases} \quad (5)$$

Данная точечная оценка позволяет также путем интерполяции (сглаживания) найти значения функции  $\hat{G}(X_p)$  в промежуточных точках непараметрических интервалов, для оценки же функции за пределами интервалов требуется уже процедура экстраполяции. Выбор метода интерполяции и экстраполяции является самостоятельной задачей и в данной статье не рассматривается. Однако ранее нами была показана возможность использования линейных методов сглаживания эмпирических данных с использованием нелинейного преобразования шкалы вероятности [6, 7]. Были найдены эффективные линейные соотношения для поиска, с заданной достоверностью, квантили весьма низкого уровня ( $p = 0,5$ ), например в качестве оценки характеристической прочности бетона при малых ( $3 \leq n \leq 15$ ) выборках эмпирических данных [8, 9]. С использованием численного имитационного моделирования возможно даже восстанавливать функцию распределения квантили в диапазоне доверительной вероятности  $\gamma = 0,05 \dots 0,95$  с шагом 0,05 [10].

Таким образом, значения функции (5) определяют доверительную вероятность неперевышения заданной квантилью эмпирической функции распределения значения, соответствующего каждой из имеющихся точек вариационного ряда, а с использованием интерполяции и экстраполяции – и другим значениям аргумента. Это позволяет находить квантили любого заданного уровня искомого распределения  $F(X)$  на известном уровне достоверности, а значит, оценивать саму функцию распределения в целом с известной достоверностью. Так, например, при  $\hat{G}(X_p) = 0,5$  получаем медианную оценку

$$\hat{G}(X_p = x(r)) = \sum_{i=0}^{r-1} \gamma(i, i+1) = \sum_{i=0}^{r-1} C_n^i p^i (1-p)^{n-i} = 0,5 \quad (7)$$

аналитического решения в общем случае не имеют.

некоторого набора квантилей  $X_p$  (например, децилей с  $p = 0,1; 0,2; \dots; 0,9$ ) искомой функции распределения.

Значения  $\hat{G} > 0,5$  соответствуют уровню достоверности оценки таких квантилей по их правой границе, соответственно искомой функции распределения  $F(X)$  – по нижней границе. Если суммировать вероятности (4) по интервалам справа налево, то доверительной вероятности оценки левой границы квантилей, т. е. верхней границы функции распределения  $F(X)$  будет соответствовать величина  $1 - \hat{G}$ .

Метод оценки заданных квантилей эмпирической функции распределения наиболее эффективен в отношении конкретной квантили, например уровня 0,05 – для оценивания характеристической прочности материала (бетона) или уровня 0,98 – для оценивания характеристической климатической нагрузки (веса снегового покрова) в задачах надежности строительных конструкций. Для построения же всей функции  $F(X)$  метод менее эффективен, поскольку требуется сглаживание для каждой выбранной квантили, что обуславливает определенную трудоемкость данной процедуры. Следует отметить, что параметры сглаживания для оценки функции  $\hat{G}(X_p)$  квантили некоторого уровня  $p$  можно использовать (в зеркальном представлении) также и в отношении квантили уровня  $(1 - p)$ .

**Поиск квантили эмпирической функции распределения с заданной достоверностью (обратная непараметрическая задача)**

Сформулируем обратную по отношению к (5) задачу: найти уровни  $p$  квантилей, оценки которых, выполненные с заданной достоверностью  $\gamma$ , будут совпадать с конкретными имеющимися порядковыми статистиками  $x(1), x(2), \dots, x(n)$ .

Например, для оценивания медианы функции распределения  $F(X)$  первое из соотношений (5), т. е. задача для первой статистики  $x(1)$ , становится аналитически разрешимым уравнением относительно  $p$  вида:

$$\hat{G}(X_p = x(1)) = \gamma(\dots, 1) = (1-p)^n = 0,5. \quad (6)$$

Аналогичное, аналитически разрешимое уравнение имеем и для последней статистики  $x(n)$  ряда. Для всех же порядковых статистик ранга  $1 < r < n$  получаемые уравнения вида

Тем не менее, такие уравнения решаются численными методами, поэтому возможно в каждой из имеющихся точек вариационного ряда, получить либо медианную оценку уровня квантили, либо оценку уровня квантили снизу, сверху или в двустороннем интервале с заданной обеспеченностью (доверительной вероятностью). Тем самым достигается (с такой же обеспеченностью) соответствующая оценка эмпирической функции распределения в точках вариационного ряда. При необходимости затем можно выполнять сглаживание (интерполяцию, экстраполяцию) полученных результатов, однако такая процедура будет однократной, в отличие от сглаживания функции (5) в отношении каждой выбираемой квантили.

Пример численного решения обратной непараметрической задачи поиска уровня квантили для выборки данных из  $n = 7$  измерений случайной величины  $X$  (конкретные измеренные значения необходимы лишь для графического представления эмпирической функции распределения), в сравнении с грубыми оценками функции распределения вида (2) и (3), представлен в таблице 2. Ступенчатые эмпирические функции вида (2) и (3), а также медианная оценка этой функции в точках данных – для некоторого условного ряда измерений  $(1, 0; 1, 6; 2, 6; 3, 6; 4, 6; 5, 8; 6, 7)$  – представлены на рисунке 1.

Таблица 2 – Результаты оценивания эмпирической функции распределения случайной выборки из  $n = 7$  измерений

Метод оценки функции распределения	Значение функции распределения для точек вариационного ряда $x(r)$						
	$x(1)$	$x(2)$	$x(3)$	$x(4)$	$x(5)$	$x(6)$	$x(7)$
Грубая оценка							
$\hat{F}(X) = r/(n+1)$	0,125	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750	0,875
$\hat{F}(X) = (r+1/2)/(n+1)$	0,188	0,313	0,438	0,563	0,688	0,813	0,938
Численное решение уравнений (6), (7) с заданной достоверностью $\gamma$							
$\gamma = 0,5$ (медианная оценка)	0,094	0,228	0,364	0,500	0,636	0,772	0,906
$\gamma = 0,4$ (верхняя граничная оценка)	0,123	0,268	0,410	0,546	0,680	0,808	0,930
$\gamma = 0,6$ (нижняя граничная оценка)	0,070	0,192	0,320	0,454	0,590	0,732	0,877
$\gamma = 0,1$ (верхняя граничная оценка)	0,280	0,453	0,597	0,721	0,830	0,921	0,985
$\gamma = 0,9$ (нижняя граничная оценка)	0,015	0,079	0,170	0,279	0,403	0,547	0,720

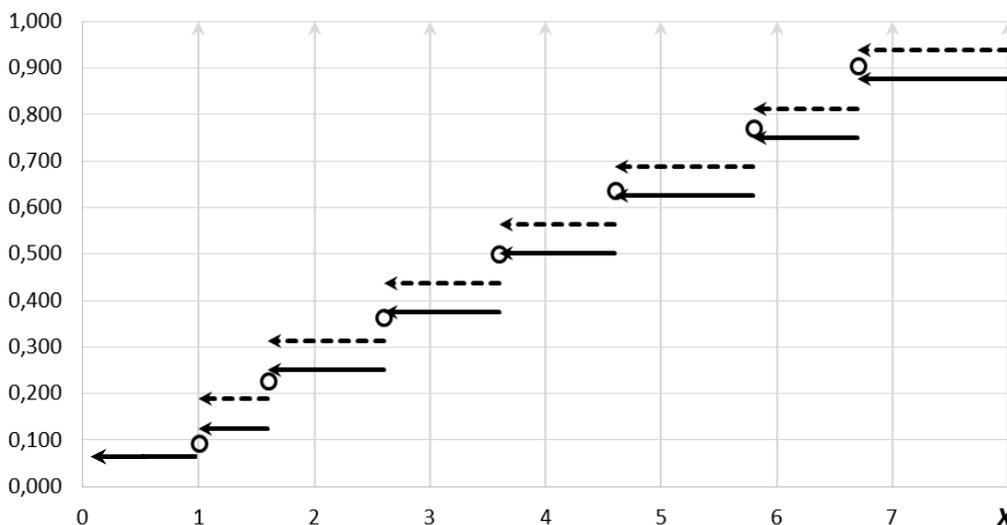


Рисунок 1 – Оценка эмпирической функции распределения: сплошные линии – приближение вида (2); пунктирные линии – приближение вида (3); кружки – результат медианной оценки путем численного решения непараметрической задачи

Из рисунка 1 следует, что известные грубые оценки эмпирической функции распределения на выборках небольшого объема дают в целом неточные результаты и могут считаться приемлемыми лишь в области средних (точнее, медианных) значений. В нижней и верхней частях вариационного ряда, т. е. на «хвостах» распределения, отличия значений функции от значений, найденных численным непараметрическим методом, становятся существенными и могут повлиять на дальнейшую аппроксимацию с целью интерполяции и экстраполяции функции. Для улучшения качества аппроксимации за пределами размаха выборки эмпирических данных можно рекомендовать также дополнительное использование предыдущего метода – достоверной оценки квантилей заданного (малого или высокого уровня – соответственно, на левом или правом хвостах распределения).

Из таблицы 2 следует определенная «симметричность» найденных численных решений. Так, например, сумма значения 0,123 уровня квантили для точки  $x(1)$  с  $\gamma = 0,4$  и значения 0,877 уровня квантили для точки  $x(7)$  с  $\gamma = 0,6$  (т. е. для случая  $0,4 + 0,6 = 1$ ) составляет ровно единицу. Такова же сумма симметричных значений (относительно серединной – четвертой в данном примере точки данных) в численном решении для медианной оценки. Данный факт снижает объем, а значит и трудоемкость задачи численного решения обратной задачи для больших объемов выборки.

**Заключение**

Предложенные методы оценивания эмпирической функции распределения, основанные на непараметрических (порядковых) статистиках, весьма эффективны для случая выборки данных малого объема. Важнейшим их достоинством является возможность задания достоверности (статистической обеспеченности) одно- или двусторонней интервальной оценки функции. Это позволяет затем аппроксимировать эмпирическую функцию распределения, например медианной оценкой, либо в задачах анализа надежности конструкций, верхней граничной оценкой для функции распределения прочности (на левом хвосте распределения) и нижней граничной оценкой для функции распределения нагрузки (на правом хвосте распределения). Проблема выбора подходящей функции аппроксимации (линейного сглаживания с некоторым нелинейным преобразованием координатных осей) является задачей дальнейших исследований.

**Список цитированных источников**

1. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения : ГОСТ 27.301-95. – Взамен ГОСТ 27.410-87 ; введ. 01.01.1997. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. – 19 с.
2. Дереченник, С. С. Возможности применения порядковых статистик в задачах обеспечения надежности технических объектов / С. С. Дереченник // Цифровая среда: технологии и перспективы : материалы междунар. науч.-техн. конф., Брест, 31 окт. 2022 г. – Брест : БрГТУ, 2022. – С. 7–13.
3. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1978. – 832 с.
4. Дереченник, С. С. Решение задачи анализа функции состояния на основе приближения хвостовых частей распределений случайных величин нагрузки и сопротивления / С. С. Дереченник, Н. Н. Мешечек // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 1 (130). – С. 7–9.
5. David, H. A. Order statistics / H. A. David. – John Wiley & Sons, New York, 1981. – 360 p.
6. Тур, В. В. О применении критериев соответствия прочности бетона согласно СТБ EN 206-1-2000 / В. В. Тур, С. С. Дереченник, А. С. Дереченник // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / БелНИИС. – 2012. – С. 152–177.
7. Статистический контроль прочности бетона на сжатие в соответствии с требованиями СТБ EN 206-1:2000 и ГОСТ 18105-2010 (EN 206-1:2000; NEQ) / В. В. Тур [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2014. – № 1 (76). – С. 113–136.
8. Тур, В. В. Новый критерий для оценивания соответствия прочности бетона в условиях ограниченной выборки результатов испытаний / В. В. Тур, С. С. Дереченник // Строительство и реконструкция. – 2016. – № 6 (68). – С. 71–84.
9. Tur, V. V. An Innovation Conformity Criterion for Assessment of the Concrete Strength Under Uncertainty Conditions / V. V. Tur, S. S. Derechennik // High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet: Proc. of the 2017 fib Symposium, held in Maastricht, The Netherlands, June 12–14, 2017 / D. A. Hordijk, M. Luković (eds.). – Springer International Publishing AG, 2018. – P. 628–1635.
10. Дереченник, С. С. Новый подход к оцениванию in-situ характеристической прочности бетона в существующих железобетонных конструкциях при ограниченном количестве результатов полевых испытаний / С. С. Дереченник, В. В. Тур // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2018. – № 1 (109). – С. 109–115.

**References**

1. Nadezhnost' v tekhnike. Raschet nadezhnosti. Osnovnye polozheniya : GOST 27.301-95. – Vzamen GOST 27.410-87 ; vved. 01.01.1997. – Minsk : Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Brest, 31 okt. 2022 g. – Brest : BrGTU, 2022. – S. 7–13.
2. Derechennik, S. S. Vozmozhnosti primeneniya porjadkovykh statistik v zadachah obespecheniya nadezhnosti tekhnicheskikh ob"ektov / S. S. Derechennik // Cifrovaya sreda: tekhnologii i perspektivy : materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Brest, 31 okt. 2022 g. – Brest : BrGTU, 2022. – S. 7–13.
3. Korn, G. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov / G. Korn, T. Korn. – M. : Nauka, 1978. – 832 s.
4. Derechennik, S. S. Reshenie zadachi analiza funkcii sostoyaniya na osnove priblizheniya hvostovykh chastej raspredelenij sluchajnykh velichin nagruzki i soprotivleniya / S. S. Derechennik, N. N. Meshechek // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2023. – № 1 (130). – S. 7–9.
5. David, H. A. Order statistics / H. A. David. – John Wiley & Sons, New York, 1981. – 360 p.
6. Tur, V. V. O primenenii kriteriev sootvetstviya prochnosti betona согласно STB EN 206-1-2000 / V. V. Tur, S. S. Derechennik, A. S. Derechennik // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : sb. nauch. tr. / BelNIIS. – 2012. – S. 152–177.
7. Statisticheskij kontrol' prochnosti betona na szhatie v sootvetstvii s trebovaniyami STB EN 206-1:2000 i GOST 18105-2010 (EN 206-1:2000; NEQ) / V. V. Tur [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2014. – № 1 (76). – S. 113–136.
8. Tur, V. V. Novyj kriterij dlya ocenivaniya sootvetstviya prochnosti betona v usloviyah ogranichennoj vyborki rezul'tatov ispytaniy / V. V. Tur, S. S. Derechennik // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2016. – № 6 (68). – S. 71–84.
9. Tur, V. V. An Innovation Conformity Criterion for Assessment of the Concrete Strength Under Uncertainty Conditions / V. V. Tur, S. S. Derechennik // High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet: Proc. of the 2017 fib Symposium, held in Maastricht, The Netherlands, June 12–14, 2017 / D. A. Hordijk, M. Luković (eds.). – Springer International Publishing AG, 2018. – P. 1628–1635.
10. Derechennik, S. S. Novyj podhod k ocenivaniyu in-situ harakteristicheskoy prochnosti betona v sushchestvuyushchih zhelezobetonykh konstrukciyah pri ogranichennom kolichestve rezul'tatov polevykh ispytaniy / S. S. Derechennik, V. V. Tur // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2018. – № 1 (109). – S. 109–115.

*Материал поступил 11.03.2024, одобрен 27.03.2024, принят к публикации 27.03.2024*

## СОПОСТАВЛЕНИЕ НОРМИРУЕМЫХ ЗНАЧЕНИЙ СНЕГОВЫХ НАГРУЗОК С МНОГОЛЕТНИМИ МЕТЕОНАБЛЮДЕНИЯМИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРАТЕГИИ БЕЗАВАРИЙНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**В. С. Рудольф<sup>1</sup>, В. А. Кудряшов<sup>2</sup>, В. В. Надольский<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Начальник Брестского областного управления МЧС Республики Беларусь, Брест, Беларусь

<sup>2</sup> К. т. н., доцент, профессор кафедры пожарной безопасности ГУО «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», Минск, Беларусь, e-mail: vadkud@gmail.com

<sup>3</sup> К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии строительного производства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nadolskivv@gmail.com

### Реферат

В статье проведен краткий анализ чрезвычайных ситуаций, сопровождающихся воздействием снеговой нагрузки на покрытия зданий. Проведен ретроспективный анализ районирования снеговой нагрузки для территории Республики Беларусь, определены нормативные (характеристические) значения для населенных пунктов метеостанций (в том числе с учетом высот над уровнем моря), которые сопоставлены с фактическими метеонаблюдениями за 73 года наблюдений, с 1944 по 2016 год. Результат анализа показал существенные частоты превышения снеговых нагрузок по отношению к их расчетным значениям (для отдельных регионов до 0,47 – т. е. фактически каждый второй год) особенно для зданий, спроектированных согласно положениям СНиП 2.01.07-85.

Результат анализа позволил сформировать стратегию безаварийной эксплуатации указанных зданий, позволяющую снизить количество чрезвычайных ситуаций в Республике Беларусь, связанных с превышением снеговой нагрузки.

**Ключевые слова:** снеговая нагрузка, чрезвычайные ситуации, особое воздействие, районирование, метеонаблюдения, мониторинг.

### COMPARISON OF STANDARDISED VALUES OF SNOW LOADS IN BUILDING DESIGN WITH LONG-TERM WEATHER OBSERVATIONS FOR DETERMINING THE STRATEGY OF ACCIDENT-FREE OPERATION

**V. S. Rudolf, V. A. Kudryashov, V. V. Nadolski**

### Abstract

This paper is a study of the consequences of snow accumulation on the roofs of buildings in emergency situations. A retrospective analysis was conducted on snow load zoning for the Republic of Belarus, determining normative values for meteorological stations in settlements, including altitude above sea level. The study compared actual observations over a 73-year period, spanning from 1944 to 2016. The analysis revealed that there is a high incidence of snow load exceedance in comparison to their calculated values, especially in certain regions where it occurs every other year (0.47). This is evident particularly for buildings constructed according to SNiP 2.01.07-85 guidelines.

The study's conclusion allowed for the establishment of a strategy, aimed at ensuring that buildings operate safely, thereby minimizing emergencies brought about by snow load exceedance in the Republic of Belarus.

**Keywords:** snow load, emergency situations, zoning, meteorological observations, monitoring.

### Введение

Природные чрезвычайные ситуации в Республике Беларусь происходят довольно редко, однако наносят, как правило, значительный ущерб. Территория Республики Беларусь регулярно оказывалась под действием циклонов («Хавьер» (2013 г.), «Даниэлла» и «Эмма» (2016 г.), «Аксель» (2017 г.)), приводящих к значительному увеличению снежного покрова за довольно короткий промежуток времени, что способствовало разрушению несущих элементов кровель и покрытий зданий и сооружений. По данным Республиканского центра управления и реагирования на чрезвычайные ситуации МЧС Республики Беларусь, только с 2006 по 2020 год в Республике Беларусь произошло 150 обрушений кровли по причинам, связанным с увеличением нагрузки снежного покрова [1]. Большая часть из них пришлась на сельскохозяйственные здания, жилые дома и хозяйственные постройки. Вместе с тем, почти 10 % в этой статистике составляют объекты общественного и производственного назначения, при разрушении которых возможны последствия как с экономической, так и социальной позиции.

Не обходится без подобных чрезвычайных ситуаций и за рубежом. Так, 3 января 2006 года произошло обрушение крыши ледового катка в г. Бад-Райхенхалль, Германия, вследствие обильного снегопада и разрушения одной из главных клеедеревянных балок [2]. По данным журналистов, в аварии погибли 15 человек (из них 12 детей), 34 человека получили травмы. Здание было 1970 года постройки, причиной аварии признан некачественный клей, использо-

ванный для изготовления балок, утративших свою прочность в условиях чрезмерного снегопада.

Однако наиболее трагический случай произошел 28 января 2006 года. Трагедия, унесшая жизни 65 человек, была связана с обрушением крыши выставочного зала в г. Катовице, Польша [3]. По данным следствия, причинами явились ошибки в проектировании (недостаточная несущая способность 51 ферм покрытия и возникновение значительных горизонтальных сил, приведших к потере устойчивости колонн), а также превышение расчетного значения снеговой нагрузки вследствие обильного снегопада.

25 января 2011 года в магазине «Окей» в спальном Выборгском районе Санкт-Петербурга произошло обрушение более полутора тысяч квадратных метров кровли, в результате которого один человек погиб и еще 17 человек пострадали.

Если исключить из обзора ошибки при проектировании, то в оставшихся ситуациях снеговая нагрузка носила исключительно редкий характер и в рамках существующих методов проектирования должна рассматриваться как особое воздействие, в Республике Беларусь принимаемое согласно нормативному документу СН 2.01.01-2022 [6]. К сожалению, ввиду сложности систематизации, обработки и описания редких явлений, в частности чрезвычайных снеговых нагрузок, проблема проектирования строительных конструкций с учетом особого воздействия недостаточно освещена в научной и нормативной литературе.

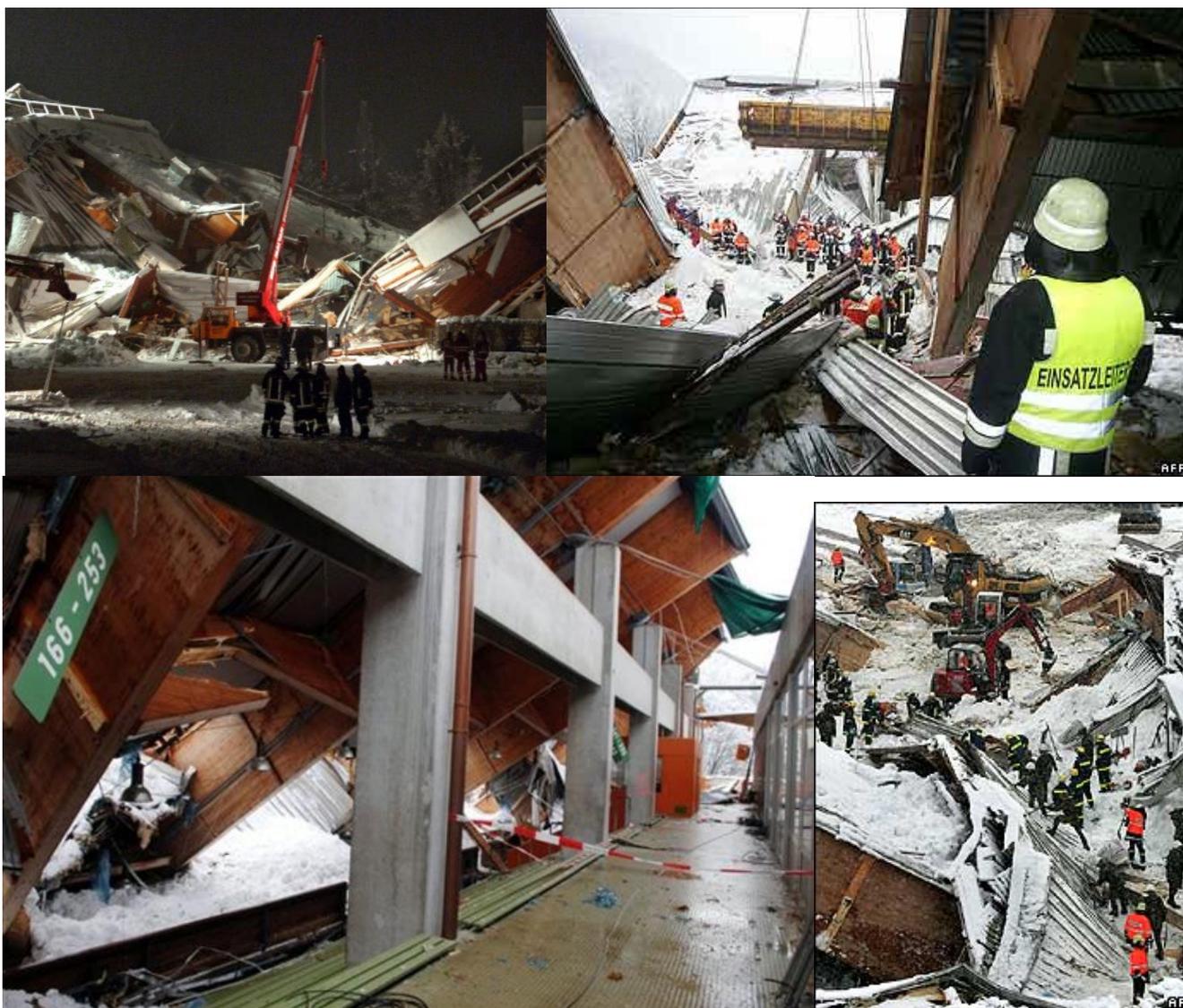


Рисунок 1 – Обрушение крыши ледового катка в г. Бад-Райхенхалль, Германия

Для целей проектирования снеговую нагрузку как правило классифицируют переменным, стационарным воздействием. Предусматривается также рассмотрение снеговых нагрузок в качестве особой (чрезвычайной) нагрузки в особой расчетной ситуации, однако национальное приложение, действующее на территории Республики Беларусь [6], не допускает (не предполагает) учитывать такие ситуации: «На территории Республики Беларусь нет чрезвычайных снеговых заносов, подразумеваемых настоящим пунктом, поэтому настоящий пункт не применяется на территории Республики Беларусь». Вероятнее всего это связано с отсутствием целенаправленных исследований в этом направлении. Также стоит отметить тот факт, что значения снеговых нагрузок увеличивались в последних редакциях стандартов относительно прошлых версий [7]. Поэтому даже если для новых сооружений текущие редакции стандартов обеспечивают достаточный уровень надежности, то для определенных существующих сооружений снеговую нагрузку необходимо, в некоторых случаях, рассматривать как особое воздействие.

В данной статье впервые рассмотрены метеорологические наблюдения снеговой нагрузки с позиции особого воздействия с целью минимизировать вероятность возникновения и последствия чрезвычайных ситуаций, связанных с обрушением зданий от снеговой нагрузки. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- установлены количественные показатели превышения нормативных (характеристических) / расчетных значений снеговой нагрузки, определенных в соответствии с СН 2.01.04-2019 [5] и согласно СНиП 2.01.07-1985 [4], по сравнению с фактическим снегонакоплением<sup>2</sup>;

- установлена необходимость нормирования снеговой нагрузки как особого воздействия, при котором для новых/реконструируемых сооружений эффективными являются проектные стратегии, а для существующих сооружений – системы мониторинга.

<sup>2</sup> Следует отметить, что сравнение значений снеговых нагрузок, определенных согласно СН 2.01.04-2019 [5] и согласно СНиП 2.01.07-1985 [4], между собой является не в полной мере корректным, так как в основу этих документов положены разные методологические подходы. Поэтому акцент исследования и сравнительный анализ сфокусирован на сравнение значений, определенных по нормативным документам, с данными метеорологических наблюдений.



Рисунок 2 – Обрушение крыши выставочного зала г. Катовице, Польша [3]

**Оценка проектируемого и фактического веса снегового покрова**

В настоящее время в Республике Беларусь правила определения снеговых нагрузок, используемых при проектировании конструкций зданий и инженерных сооружений, регламентированы СН 2.01.04-2019 «Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Снеговые нагрузки» [5]<sup>3</sup>. Указанный документ в 2020 году заменил длительно действовавший на территории Республики Беларусь СНиП 2.01.07-85 [4], а также действовавший параллельно ТКП EN 1991-1-3-2009 [8]. Немаловажно, что, согласно действующему законодательству Республики Беларусь, здания могут проектироваться по действующим нормам на момент выдачи разрешительной документации на застройку и проектирование, поэтому вполне очевидно, что построенных зданий по СН 2.01.04-2019 [5] в процентном соотношении к количеству эксплуатируемых крайне мало<sup>4</sup>.

Исходной величиной для проектирования силовых воздействий на конструкции согласно СН 2.01.01-2022 [6] принимается характеристическое значение воздействий – значение силового воздействия, установленное с учетом статистической изменчивости и соответствующее установленному квантилю принятого статистического распределения значений. В качестве характеристического значения снеговой нагрузки на грунт (веса снегового покрова на 1 м<sup>2</sup> горизонтальной поверхности земли) по СН 2.01.04-2019 [5] и ТКП EN 1991-1-3-2009 [8] принимается значение, определенное с годовой вероятностью (частотой) превышения 0,02 или 1 раз в 50 лет. Более старые документы (по которым по сути построено подавляющее количество сооружений), такие как СНиП 2.01.07-85 [4,10] и СНиП II-6-74 [9], предполагали в качестве исходной (нормативной) величины снеговой нагрузки принимать директивно, а для малоизученных районов – как среднее значение ежегодных максимумов запаса воды по результатам снегосъемок на участке, защищенном от воздействия ветра, за период не менее 10 лет.

Ситуация усугубляется не только методическим подходом к оценке снеговых нагрузок, но и в ретроспективных количественных значениях самих нагрузок. Так, здания, запроектированные на территории Республики Беларусь до 2004 года<sup>5</sup>, в зависимости от района, делились на 3 снеговых района преимущественно меридианного направления: 50/70/100 кг/м<sup>2</sup> (условно: Брест – Гродно / Минск – Гомель / Могилев – Витебск). После 2004 года было введено 2 снеговых района преимущественно широтного направления: 80/120 кг/м<sup>2</sup> (условно: Брест – Гродно – Гомель / Минск – Могилев – Витебск). В 2009 году параллельно с действующими нагрузками СНиП 2.01.07-85 [4,10] в ТКП EN 1991-1-3-2009 [8] было введено 4 снеговых района, выделяющих преимущественно высотные отметки Беларуси: 120/140/160/180 кг/м<sup>2</sup> (условно: Брест / Лида, Пинск – Мозырь / Минск – Могилев – Гомель / Нарочь, Витебск – Орша).

Наконец, в 2015 и 2020 году выделено 3 снеговых района [6] с фоновыми снеговыми нагрузками 135/145/155 кг/м<sup>2</sup>, с корректировкой по высотным отметкам (рисунок 3). Указанная корректировка является в некоторой степени неоднозначной ввиду переменного рельефа территории Республики Беларусь и несовпадением границ снеговых районов с границами административного деления (для которого статистика рельефа является широкодоступной). Поэтому в настоящей статье проведено подробное сопоставление рельефа Беларуси со снеговыми районами и расчетом теоретического размаха снеговой нагрузки.

Известно, что рельеф Беларуси характеризуется перепадом абсолютной отметки над уровнем моря от 80 м (долина реки Неман вблизи границы) до 345 м (гора Дзержинская на Минской возвышен-

ности). Очевидно, что для более точной оценки разброса необходимо карту снеговых районов рассматривать совместно с физической картой рельефа (рисунок 5), т. к. простая подстановка крайних отметок приводит к нереалистичным результатам.

В таблице 1 приведены результаты расчета характеристических значений снеговой нагрузки для снеговых районов с учетом рельефа Беларуси. Крайние минимальные (80 м) и максимальные отметки (345 м) приведены только для соответствующих районов. Для остальных районов минимальная и максимальная высота принята согласно данным физической карты (рисунок 5). Среднее значение 160 м над уровнем моря принято согласно имеющимся географическим данным.

Совместный анализ таблицы 1 и рисунка 4 позволил установить, что выделенным в 2015 и 2020 году 3 снеговыми районам соответствуют снеговые нагрузки: 58...234/100...214/155 кг/м<sup>2</sup> (условно: Брест – Гродно – Лида – Свирь, Пинск – Узда – Могилев – Мозырь – Гомель / Малорита – Барановичи – Минск – Поставы – Новополоцк – Орша / Брагин – Добруш – Климовичи).

Для сопоставления данных регулярных наблюдений на метеостанциях Республики Беларусь с 1944 по 2016 год (73 периода наблюдения) с нормативными значениями снеговой нагрузки соответствующего периода строительства зданий в соответствии с картой снеговых районов были выделены ретроспективные и современные снеговые районы расположения метеостанций Республики Беларусь в соответствии с нормами [4,5,8,10] и внесены в таблицу 2.

В эту же таблицу были внесены соответствующие нормативные значения снеговых нагрузок, в том числе для СН 2.01.04-2019 [5] – с учетом высоты расположения над уровнем моря. Нормативные нагрузки были проанализированы с фактическими данными снегонакопления на метеостанциях за рассматриваемый период наблюдения, и для каждого значения нормативных нагрузок было рассчитано количество лет, в которых снеговая нагрузка была превышена хотя бы один раз<sup>6</sup>. Для сопоставления данных согласно СН 2.01.04-2019 [5], учитывающих высоту расположения местности над уровнем моря<sup>7</sup>, была выдвинута гипотеза: в пределах населенного пункта предельные значения массы снегового покрова, зафиксированные на метеостанции справедливы для всего населенного пункта, невзирая на перепад рельефа<sup>8</sup>. Указанная гипотеза является вполне справедливой до получения более подробных данных по разности снегонакопления в пределах одной местности.

Анализ таблицы 2 показывает, что наибольшее количество превышений снеговой нагрузки относительно нормативных значений характерно для СНиП 2.01.07-85 [4,9], причем в большей мере – до введения изменения № 1 для Республики Беларусь: наибольшее количество лет с превышением зафиксировано для Новогрудка (47), Лынтупы (37), Борисова (35); лишь в 8 метеостанциях из 47 не зафиксировано превышение, среди них Брест, Гомель и др. В среднем для Беларуси нормативное значение превышалось 15 раз за 73 года, что соответствует частоте 0,20 (разброс частоты от 0 до 0,64).

<sup>3</sup> Карта снеговых районов СН 2.01.04-2019 в целом идентична карте, предложенной в изменении № 2 к ТКП EN 1991-1-3-2009 [8], введенного в действие 09.04.2015 г.

<sup>4</sup> Ввиду того, что для подавляющего количества зданий в стране срок эксплуатации после капитального ремонта не превышает 50 лет, очевидно, что количество сооружений, спроектированных по более старым нормам, таким как СНиП II-6-74, также пренебрежимо мало.

<sup>5</sup> В 2004 году вышло изменение № 1 к СНиП 2.01.07-85 [10], установившее новую карту районирования Беларуси по снеговому нагрузкам и их численным (нормативным) значениям.

<sup>6</sup> Ситуации с превышением снеговой нагрузки несколько раз в год не рассматривались в настоящей работе.

<sup>7</sup> Высота местности над уровнем моря была определена с использованием данных сайта <https://ru-ru.topographic-map.com>

<sup>8</sup> Данное предположение обусловлено несколькими факторами: 1. В пределах одной местности высота снежного покрова в меньшей мере зависит от высоты местности, а в большей мере – от скорости ветра, переносающего снегонакопления – преимущественно в низменные части местности. 2. Нормативные значения снеговых нагрузок применяются для покрытий зданий, отметка которых относительно уровня земли достаточно случайна.

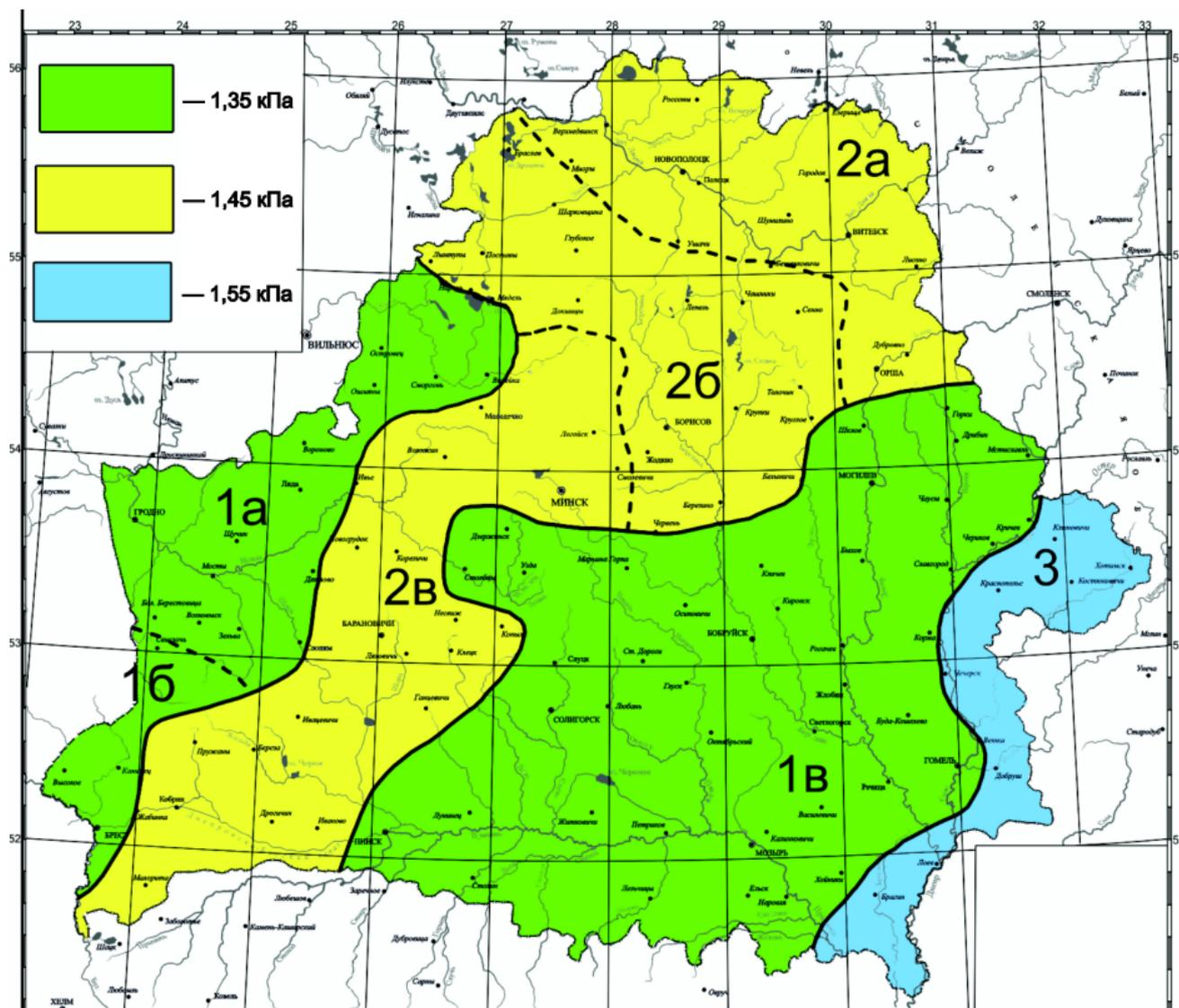
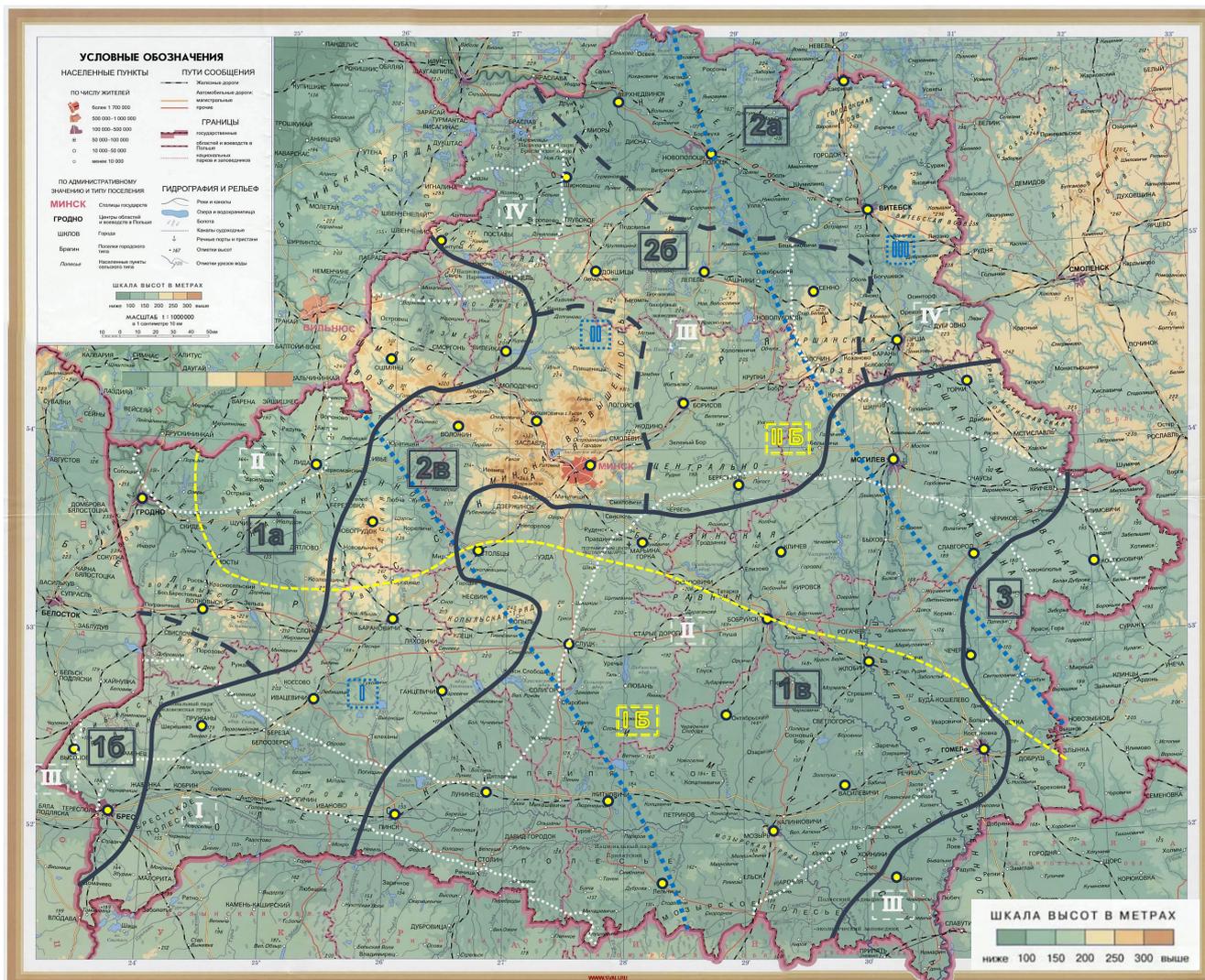


Таблица НП.1.1 (ВУ) — Характеристические значения снеговой нагрузки на грунт в зависимости от высоты местности над уровнем моря А, м

Номер снегового района	Подрайон	Снеговая нагрузка $s_k$ , кПа, для местности с высотой над уровнем моря А, м
1	1а	$s_k = 1,35^*$
	1б	$s_k = 1,35 + 2,20 \cdot (A - 155) / 100$
	1в	$s_k = 1,35 + 0,38 \cdot (A - 140) / 100$
2	2а	$s_k = 1,45 + 0,60 \cdot (A - 125) / 100$
	2б	$s_k = 1,45 + 0,60 \cdot (A - 150) / 100$
	2в	$s_k = 1,45 + 0,60 \cdot (A - 210) / 100, s_k \geq 1,00$
3	3	$s_k = 1,55^*$

\* Характеристическое значение снеговой нагрузки в данном подрайоне (районе) принимается постоянным.

Рисунок 3 – Карта снеговых районов для условий Республики Беларусь [5]



Желтыми точками обозначены метеостанции  
 Черные линии – снеговые районы согласно СН 2.01.04-2019 [5]  
 Белые линии – снеговые районы согласно ТКП EN 1991-1-3-2009 [8]  
 Желтые линии – снеговые районы согласно СНиП 2.01.07-85 (2004) [4, 10]  
 Синие линии – снеговые районы согласно СНиП 2.01.07-85 [4]  
**Рисунок 4** – Карта снеговых районов для условий Республики Беларусь, совмещенная с физической картой рельефа

**Таблица 1** – Минимальное, максимальное и среднее значение снеговой нагрузки исходя из фактического рельефа Республики Беларусь

		Высота над уровнем моря (А)				
		минимальная	средняя	максимальная		
Снеговой район		80 м	100/120 <sup>9</sup> м	160 м	300/240 (250 <sup>9</sup> /200) <sup>4</sup> м	345 м
1	1a	1,35	1,35	1,35	1,35	–
	1б	–	0,14/0,58	1,46	3,44/2,34	–
	1в	–	1,20/1,27	1,43	1,96/1,73	–
2	2a	–	1,30/1,42	1,66	2,50/2,14	–
	2в	–	1,15/1,27	1,51	2,35/1,99	–
3	2в	–	1,00/1,00	1,15	1,99/1,63	2,26
	3	–	1,55	1,55	1,55	–

Примечание: \* – для снеговых районов 1б и 3 наивысшая точка над уровнем моря не превышает 250 м, поэтому расчеты проведены исходя из максимума 250 м

<sup>9</sup> Очевидно, что высотные отметки на физической карте приведены ввиду дискретности с определенными допусками. Практически значимые значения следует принимать с 20 % допуском.

Таблица 2 – Сопоставление данных снеговой нагрузки в зависимости от снегового района метеостанций с нормативными снеговыми нагрузками

Метеостанции	Высота над уровнем моря, м			СНиП 2.01.07 (до Изм 1 - 2004)	СНиП 2.01.07 (после Изм 1 - 2004)	ТКП EN 1991-1-3 (до Изм 2 - 2015)	СН 2.01.04	СНиП 2.01.07 (до Изм 1 - 2004)	СНиП 2.01.07 (после Изм 1 - 2004)	ТКП EN 1991-1-3 (до Изм 2 - 2015)	СН 2.01.04 (с учетом высоты над уровнем моря)			СНиП 2.01.07 (до Изм 1 - 2004)	СНиП 2.01.07 (после Изм 1 - 2004)	ТКП EN 1991-1-3 (до Изм 2 - 2015)	СН 2.01.04 (с учетом высоты над уровнем моря) Количество превышений (годы)		
	norm	min	max								norm	min	max				norm	min	max
Вилейка	163	140	204	II	IIБ	III	1А	0,70	1,20	1,6	1,35	1,35	1,35	25	4	0	1	1	1
Волковыск	180	124	242	I	IB	III	1А	0,50	0,80	1,6	1,35	1,35	1,35	0	0	0	0	0	0
Гродно	134	79	229	I	IB	III	1А	0,50	0,80	1,6	1,35	1,35	1,35	19	7	0	1	1	1
Лида	154	121	183	I	IIБ	II	1А	0,50	1,20	1,4	1,35	1,35	1,35	31	1	1	1	1	1
Ошмяны	211	159	232	II	IIБ	III	1А	0,70	1,20	1,6	1,35	1,35	1,35	18	2	0	0	0	0
Брест	142	120	171	I	IB	I	1Б	0,50	0,80	1,2	1,06	0,58	1,70	0	0	0	0	0	0
Высокое	163	142	169	I	IB	III	1Б	0,50	0,80	1,6	1,53	1,06	1,66	17	4	1	1	2	1
Бобруйск	156	126	192	II	IIБ	II	1В	0,70	1,20	1,4	1,41	1,30	1,55	21	1	0	0	0	0
Василевичи	139	123	144	II	IB	II	1В	0,70	0,80	1,4	1,35	1,29	1,37	2	2	0	0	0	0
Гомель	125	109	189	II	IB	III	1В	0,70	0,80	1,6	1,29	1,23	1,54	0	0	0	0	0	0
Горки	200	163	219	III	IIБ	IV	1В	1,00	1,20	1,8	1,58	1,44	1,65	21	10	0	1	4	0
Житковичи	136	118	171	I	IB	II	1В	0,50	0,80	1,4	1,33	1,27	1,47	4	0	0	0	0	0
Жлобин	140	119	158	II	IB	II	1В	0,70	0,80	1,4	1,35	1,27	1,42	16	12	0	1	1	0
Кличев	154	137	176	II	IIБ	II	1В	0,70	1,20	1,4	1,40	1,34	1,49	0	0	0	0	0	0
Лельчицы	141	125	152	I	IB	II	1В	0,50	0,80	1,4	1,35	1,29	1,40	23	9	0	0	0	0
Марьина Горка	175	152	188	II	IIБ	II	1В	0,70	1,20	1,4	1,48	1,40	1,53	21	1	0	0	0	0
Могилев	151	137	218	III	IIБ	III	1В	1,00	1,20	1,6	1,39	1,34	1,65	13	7	1	1	3	1
Мозырь	189	107	213	II	IB	II	1В	0,70	0,80	1,4	1,54	1,22	1,63	12	11	0	0	3	0
Октябрь	141	91	180	II	IB	II	1В	0,70	0,80	1,4	1,35	1,16	1,50	11	8	0	0	3	0
Пинск	140	128	162	I	IB	II	1В	0,50	0,80	1,4	1,35	1,30	1,43	0	0	0	0	0	0
Полесская	133	124	148	I	IB	II	1В	0,50	0,80	1,4	1,32	1,29	1,38	21	6	0	1	1	0
Славгород	171	77	197	III	IIБ	II	1В	1,00	1,20	1,4	1,47	1,11	1,57	13	6	2	1	9	0
Слуцк	159	146	179	II	IB	III	1В	0,70	0,80	1,6	1,42	1,37	1,50	11	9	0	0	0	0
Столбцы	172	140	200	II	IB	III	1В	0,70	0,80	1,6	1,47	1,35	1,58	0	0	0	0	0	0

Продолжение таблицы 2

Метеостанции	Высота над уровнем моря, м			СНиП 2.01.07 (до Изм 1 - 2004)	СНиП 2.01.07 (после Изм 1 - 2004)	ТКП EN 1991-1-3 (до Изм 2 - 2015)	СН 2.01.04	СНиП 2.01.07 (до Изм 1 - 2004)	СНиП 2.01.07 (после Изм 1 - 2004)	ТКП EN 1991-1-3 (до Изм 2 - 2015)	СН 2.01.04 (с учетом высоты над уровнем моря)			СНиП 2.01.07 (до Изм 1 - 2004)	СНиП 2.01.07 (после Изм 1 - 2004)	ТКП EN 1991-1-3 (до Изм 2 - 2015)	СН 2.01.04 (с учетом высоты над уровнем моря) Количество превышений (годы)		
	norm	min	max								norm	min	max				Количество превышений (годы)	norm	min
Верхнедвинск	132	97	149	III	IIБ	III	2А	1.00	1,20	1,6	1,49	1,28	1,59	10	4	0	1	4	1
Витебск	174	116	262	III	IIБ	IV	2А	1.00	1,20	1,8	1,74	1,40	2,27	16	9	1	1	6	0
Езерище	172	156	192	III	IIБ	III	2А	1.00	1,20	1,6	1,73	1,64	1,85	9	6	0	0	0	0
Орша	186	143	244	III	IIБ	IV	2А	1.00	1,20	1,8	1,82	1,56	2,16	15	8	2	2	3	0
Полоцк	132	102	155	III	IIБ	III	2А	1.00	1,20	1,6	1,49	1,31	1,63	12	6	0	1	3	0
Березино	153	138	195	II	IIБ	II	2Б	0.70	1,20	1,4	1,47	1,38	1,72	2	1	1	1	1	1
Борисов	188	144	236	II	IIБ	III	2Б	0.70	1,20	1,6	1,68	1,41	1,97	35	6	1	1	3	0
Докшицы	193	174	224	II	IIБ	III	2Б	0.70	1,20	1,6	1,71	1,59	1,89	28	7	2	1	2	0
Лепель	173	136	228	II	IIБ	III	2Б	0.70	1,20	1,6	1,59	1,37	1,92	1	0	0	0	0	0
Лынтупы	208	175	236	II	IIБ	IV	2Б	0.70	1,20	1,8	1,80	1,60	1,97	37	11	1	1	4	0
Сенно	173	139	233	III	IIБ	IV	2Б	1.00	1,20	1,8	1,59	1,38	1,95	0	0	0	0	0	0
Шарковщина	130	117	137	II	IIБ	IV	2Б	0.70	1,20	1,8	1,33	1,25	1,37	0	0	0	0	0	0
Барановичи	192	168	216	I	IB	III	2В	0.50	0,80	1,6	1,34	1,20	1,49	1	0	0	0	0	0
Воложин	229	146	274	II	IIБ	III	2В	0.70	1,20	1,6	1,56	1,07	1,83	27	5	1	1	7	0
Ганцевичи	157	150	180	I	IB	III	2В	0.50	0,80	1,6	1,13	1,09	1,27	29	9	0	2	2	0
Ивацевичи	153	142	185	I	IB	III	2В	0.50	0,80	1,6	1,11	1,04	1,30	22	7	0	1	2	0
Минск	222	173	287	II	IIБ	III	2В	0.70	1,20	1,6	1,52	1,23	1,91	33	11	0	0	10	0
Новогрудок	278	186	323	I	IIБ	III	2В	0.50	1,20	1,6	1,86	1,31	2,13	47	11	2	1	6	0
Пружаны	162	150	178	I	IB	II	2В	0.50	0,80	1,4	1,16	1,09	1,26	19	7	1	1	1	1
Радошковичи	202	180	285	II	IIБ	III	2В	0.70	1,20	1,6	1,40	1,27	1,90	21	1	0	0	0	0
Брагин	115	108	136	II	IB	III	3	0.70	0,80	1,6	1,55	1,55	1,55	13	12	0	0	0	0
Костюковичи	168	141	207	III	IIБ	III	3	1.00	1,20	1,6	1,55	1,55	1,55	8	4	0	2	2	2
Чечерск	145	116	177	II	IIБ	II	3	0.70	1,20	1,4	1,55	1,55	1,55	19	4	2	1	1	1

Примечание: norm, min, max – соответственно, высота над уровнем моря: метеостанции, минимальной и максимальной отметки в городе, где находится метеостанция. Цветом выделены случаи превышения нормативных значений более 1 раза за рассматриваемый период (73 года)

Таблица 3 – Сопоставление данных снеговой нагрузки в зависимости от снегового района метеостанций с нормативными снеговыми нагрузками

Метеостанция	Высота над уровнем моря, м			СНиП 2.01.07 (до Изм 1 - 2004)	СНиП 2.01.07 (после Изм 1 - 2004)	ТКП EN 1991-1-3 (до Изм 2 - 2015)	СН 2.01.04	СНиП 2.01.07 (до Изм 1 - 2004)	СНиП 2.01.07 (после Изм 1 - 2004)	ТКП EN 1991-1-3 (до Изм 2 - 2015)	СН 2.01.04 (с учетом высоты над уровнем моря)			СНиП 2.01.07 (до Изм 1 - 2004)	СНиП 2.01.07 (после Изм 1 - 2004)	ТКП EN 1991-1-3 (до Изм 2 - 2015)	СН 2.01.04 (с учетом высоты над уровнем моря) Количество превышений (годы)		
	norm	min	max								Снеговой район	Расчетная нагрузка, кПа					norm	min	max
Вилейка	163	140	204	II	IIБ	III	1А	0,98	1,80	2,4	2,03	2,03	2,03	7	0	0	0	0	0
Волковыск	180	124	242	I	IB	III	1А	0,70	1,20	2,4	2,03	2,03	2,03	0	0	0	0	0	0
Гродно	134	79	229	I	IB	III	1А	0,70	1,20	2,4	2,03	2,03	2,03	9	2	0	0	0	0
Лида	154	121	183	I	IIБ	II	1А	0,70	1,80	2,1	2,03	2,03	2,03	22	0	0	0	0	0
Ошмяны	211	159	232	II	IIБ	III	1А	0,98	1,80	2,4	2,03	2,03	2,03	6	0	0	0	0	0
Брест	142	120	171	I	IB	I	1Б	0,70	1,20	1,8	1,60	0,87	2,55	0	0	0	0	0	0
Высокое	163	142	169	I	IB	III	1Б	0,70	1,20	2,4	2,29	1,60	2,49	7	2	0	0	1	0
Бобруйск	156	126	192	II	IIБ	II	1В	0,98	1,80	2,1	2,12	1,95	2,32	5	0	0	0	0	0
Василевичи	139	123	144	II	IB	II	1В	0,98	1,20	2,1	2,02	1,93	2,05	1	0	0	0	0	0
Гомель	125	109	189	II	IB	III	1В	0,98	1,20	2,4	1,94	1,85	2,30	0	0	0	0	0	0
Горки	200	163	219	III	IIБ	IV	1В	1,40	1,80	2,7	2,37	2,16	2,48	5	0	0	0	0	0
Житковичи	136	118	171	I	IB	II	1В	0,70	1,20	2,1	2,00	1,90	2,20	1	0	0	0	0	0
Жлобин	140	119	158	II	IB	II	1В	0,98	1,20	2,1	2,03	1,91	2,13	7	1	0	0	0	0
Кличев	154	137	176	II	IIБ	II	1В	0,98	1,80	2,1	2,10	2,01	2,23	0	0	0	0	0	0
Лельчицы	141	125	152	I	IB	II	1В	0,70	1,20	2,1	2,03	1,94	2,09	10	0	0	0	0	0
Марьина Горка	175	152	188	II	IIБ	II	1В	0,98	1,80	2,1	2,22	2,09	2,30	6	0	0	0	0	0
Могилев	151	137	218	III	IIБ	III	1В	1,40	1,80	2,4	2,09	2,01	2,47	1	0	0	0	0	0
Мозырь	189	107	213	II	IB	II	1В	0,98	1,20	2,1	2,30	1,84	2,44	6	3	0	0	0	0
Октябрь	141	91	180	II	IB	II	1В	0,98	1,20	2,1	2,03	1,75	2,25	7	3	0	0	0	0
Пинск	140	128	162	I	IB	II	1В	0,70	1,20	2,1	2,03	1,96	2,15	0	0	0	0	0	0
Полесская	133	124	148	I	IB	II	1В	0,70	1,20	2,1	1,99	1,93	2,07	10	1	0	0	0	0
Славгород	171	77	197	III	IIБ	II	1В	1,40	1,80	2,1	2,20	1,67	2,35	2	0	0	0	0	0
Слуцк	159	146	179	II	IB	III	1В	0,98	1,20	2,4	2,13	2,06	2,25	4	0	0	0	0	0
Столбцы	172	140	200	II	IB	III	1В	0,98	1,20	2,4	2,21	2,03	2,37	0	0	0	0	0	0
Верхнедвинск	132	97	149	III	IIБ	III	2А	1,40	1,80	2,4	2,24	1,92	2,39	2	0	0	0	0	0

Продолжение таблицы 3

Метеостанция	Высота над уровнем моря, м			СНИП 2.01.07 (до Изм 1 - 2004)	СНИП 2.01.07 (после Изм 1 - 2004)	ТКП EN 1991-1-3 (до Изм 2 - 2015)	СН 2.01.04	СНИП 2.01.07 (до Изм 1 - 2004)	СНИП 2.01.07 (после Изм 1 - 2004)	ТКП EN 1991-1-3 (до Изм 2 - 2015)	СН 2.01.04 (с учетом высоты над уровнем моря)			СНИП 2.01.07 (до Изм 1 - 2004)	СНИП 2.01.07 (после Изм 1 - 2004)	ТКП EN 1991-1-3 (до Изм 2 - 2015)	СН 2.01.04 (с учетом высоты над уровнем моря) Количество превышений (годы)		
	norm	min	max								Снеговой район						Расчетная нагрузка, кПа		
Витебск	174	116	262	III	IIБ	IV	2А	1,40	1,80	2,7	2,62	2,09	3,41	5	1	0	0	0	0
Езерище	172	156	192	III	IIБ	III	2А	1,40	1,80	2,4	2,60	2,45	2,78	2	0	0	0	0	0
Орша	186	143	244	III	IIБ	IV	2А	1,40	1,80	2,7	2,72	2,34	3,25	5	2	0	0	0	0
Полоцк	132	102	155	III	IIБ	III	2А	1,40	1,80	2,4	2,24	1,97	2,45	2	0	0	0	0	0
Березино	153	138	195	II	IIБ	II	2Б	0,98	1,80	2,1	2,20	2,07	2,58	1	0	0	0	0	0
Борисов	188	144	236	II	IIБ	III	2Б	0,98	1,80	2,4	2,52	2,12	2,95	17	0	0	0	0	0
Докшицы	193	174	224	II	IIБ	III	2Б	0,98	1,80	2,4	2,56	2,39	2,84	17	0	0	0	0	0
Лепель	173	136	228	II	IIБ	III	2Б	0,98	1,80	2,4	2,38	2,05	2,88	1	0	0	0	0	0
Лынтупы	208	175	236	II	IIБ	IV	2Б	0,98	1,80	2,7	2,70	2,40	2,95	24	1	0	0	0	0
Сенно	173	139	233	III	IIБ	IV	2Б	1,40	1,80	2,7	2,38	2,08	2,92	0	0	0	0	0	0
Шарковщина	130	117	137	II	IIБ	IV	2Б	0,98	1,80	2,7	2,00	1,88	2,06	0	0	0	0	0	0
Барановичи	192	168	216	I	IB	III	2В	0,70	1,20	2,4	2,01	1,80	2,23	0	0	0	0	0	0
Воложин	229	146	274	II	IIБ	III	2В	0,98	1,80	2,4	2,35	1,60	2,75	11	0	0	0	1	0
Ганцевичи	157	150	180	I	IB	III	2В	0,70	1,20	2,4	1,70	1,64	1,91	14	1	0	0	0	0
Ивацевичи	153	142	185	I	IB	III	2В	0,70	1,20	2,4	1,66	1,56	1,95	8	0	0	0	0	0
Минск	222	173	287	II	IIБ	III	2В	0,98	1,80	2,4	2,28	1,84	2,87	19	0	0	0	0	0
Новогрудок	278	186	323	I	IIБ	III	2В	0,70	1,80	2,4	2,79	1,96	3,19	34	1	0	0	1	0
Пружаны	162	150	178	I	IB	II	2В	0,70	1,20	2,1	1,74	1,64	1,89	8	1	0	0	0	0
Радошковичи	202	180	285	II	IIБ	III	2В	0,98	1,80	2,4	2,10	1,91	2,85	14	0	0	0	0	0
Брагин	115	108	136	II	IB	III	3	0,98	1,20	2,4	2,33	2,33	2,33	6	5	0	0	0	0
Костюковичи	168	141	207	III	IIБ	III	3	1,40	1,80	2,4	2,33	2,33	2,33	2	0	0	0	0	0
Чечерск	145	116	177	II	IIБ	II	3	0,98	1,80	2,1	2,33	2,33	2,33	9	0	0	0	0	0

Примечание: norm, min, max – соответственно, высота над уровнем моря: метеостанции, минимальной и максимальной отметки в городе, где находится метеостанция. Цветом выделены случаи превышения нормативных значений за рассматриваемый период (73 года)

Цветным шрифтом выделены местности, где несущей способности может быть недостаточно для мокрого снега толщиной 30 см.

Для СНиП 2.01.07-85 [4] после введения изменения № 1 [10] для Республики Беларусь ситуация выглядит более благоприятно: наибольшее количество лет с превышением зафиксировано для Брагина, Жлобина (12), Минска, Новогрудка, Лынтупы, Мозыря (11); в 10 метеостанциях из 47 не зафиксировано превышение, среди них Брест, Гомель и др. В среднем для Беларуси нормативное значение превышалось 4,87 раз за 73 года, что соответствует частоте 0,07 (разброс частоты от 0 до 0,16). Снижение средней частоты превышений в 3 раза говорит о более точном учете снеговых районов для СНиП 2.01.07-85 [4,10] по сравнению с советским периодом [4,9], но все еще высоким по сравнению с современным подходом – не более 1 раза в 50 лет, что соответствует частоте 0,02.

Очевидно, при разработке СНиП 2.01.07-85 не было возможности рассмотреть такой длительный период снегонакопления, который имеется в наши дни. Поэтому нормирование снеговых нагрузок согласно СНиП 2.01.07-85 было основано на более коротком периоде наблюдения – 10 лет и косвенно учитывалось имеющимися коэффициентами надежности по снеговой нагрузке и коэффициентами запаса по прочности материалов.

Для ТКП EN 1991-1-3-2009 [8] до 2015 года, согласно данным таблицы 2, характерно наименьшее количество лет превышений снеговой нагрузки относительно характеристических значений. Наибольшее количество лет с превышением зафиксировано для Новогрудка, Чечерска, Орши, Докшиц, Славгорода (2); в 35 метеостанциях из 47 не зафиксировано превышение, среди них все областные центры, кроме Могилева и др. города. В среднем для Беларуси характеристическое значение превышалось 0,4 раз за 73 года, что соответствует частоте 0,005 (разброс частоты от 0 до 0,027). Среднее значение частоты для Республики Беларусь согласно ТКП EN 1991-1-3-2009 [8] достаточно хорошо согласуется с современным подходом, однако в некоторых местностях частота превышает 1/50. При этом следует отметить весьма малое количество объектов, запроектированных с применением норм ТКП EN 1991-1-3-2009 [8] до 2015 года, преобладающее количество объектов в настоящее время – это объекты, запроектированные согласно нормативным значениям снеговой нагрузки СНиП 2.01.07-85.

Представляет интерес провести анализ современного нормирования снеговой нагрузки – СН 2.01.04-2019<sup>10</sup> [5]. Рассматривая характеристические значения относительно метеостанций (т.е. их высоты над уровнем моря) – т. н. фоновые значения – количество лет превышений снеговой нагрузки более одного раза зафиксировано только для городов Костюковичи, Ганцевичи и Орша (2) – что несколько лучше по сравнению со снеговыми районами ТКП EN 1991-1-3-2009 [8] (там зафиксировано 5 городов с 2-кратным превышением). В среднем для Беларуси это характеристическое значение превышалось 0,57 раз за 73 года, что соответствует частоте 0,007 (разброс частоты от 0 до 0,027).

Однако, принимая во внимание выше сформулированную гипотезу о равномерном распределении снеговой нагрузки в пределах одного района, учет высоты местности для населенных пунктов, в которых расположены метеостанции, серьезно меняет положение дел, особенно для низменных участков: наибольшее количество лет с превышением зафиксировано для Минска (10), Славгорода (9); Воложина (7). В 20 населенных пунктах из 47 не зафиксировано превышение, среди них Брест, Гомель и др. В среднем для наиболее низких отметок местности рассматриваемая ситуация выглядит наиболее благоприятно: характеристическое значение превышалось 0,23 раз за 73 года, что соответствует частоте 0,003 (разброс частоты от 0 до 0,027).

Указанные превышения снеговых нагрузок относительно характеристических (нормативных) значений представляют интерес для дальнейших исследований, в том числе в рамках ограничения снеговых нагрузок для низменностей. Однако для принятия решений по стратегии эксплуатации, капитального ремонта либо реконструкции,

модернизации существующих зданий, в особенности построенных с использованием нормативных значений снеговых нагрузок согласно СНиП 2.01.07-85 [4], целесообразно сопоставить фактические снеговые нагрузки с расчетными значениями.

Расчетные значения снеговых нагрузок получают путем характеристических (нормативных) значений на коэффициент надежности (частный коэффициент) по нагрузке  $\gamma_r(\gamma_Q)$ .

**Таблица 4** – Значения коэффициента надежности (частного коэффициента) по нагрузке  $\gamma_r(\gamma_Q)$  для различных нормативных документов

	СНиП 2.01.07 (до Изм 1–2004)	СНиП 2.01.07 (после Изм 1 – 2004)	ТКП EN 1991-1-3 (до Изм 2 – 2015)	СН 2.01.04
$\gamma_r(\gamma_Q)$	1,4	1,5	1,5	1,5

Результаты оценки ретроспективной расчетной снеговой нагрузки в сопоставлении с фактическим снегонакоплением представлены в таблице 3. Вполне логично, что численные значения в указанной таблице меньше, чем в таблице 4, однако представляет интерес провести более подробный анализ. В таблице 3 в отличие от таблицы 4 выделены все ячейки, в которых зафиксировано хотя бы одно превышение за рассматриваемый период наблюдений.

Анализ таблицы 3 показывает, что также наибольшее количество превышений снеговой нагрузки относительно расчетных значений также характерно для СНиП 2.01.07-85 [4] до введения изменения № 1 [10] для Республики Беларусь: наибольшее количество лет с превышением зафиксировано для Новогрудка (34), Лынтупы (24), Лиды (22); лишь в 9 метеостанциях из 47 не зафиксировано превышение, среди них Брест, Гомель и др. В среднем для Беларуси расчетное значение превышалось 6,74 раз за 73 года, что соответствует частоте 0,09 (разброс частоты от 0 до 0,47).

Для СНиП 2.01.07-85 [4] после введения изменения № 1 [10] для Республики Беларусь наибольшее количество лет с превышением зафиксировано для Брагина (5), Мозыря, Октябрьского (3); в 34 метеостанциях из 47 не зафиксировано превышение, среди них Брест, Гродно, Витебск и др. В среднем для Беларуси расчетное значение превышалось 0,51 раз за 73 года, что соответствует частоте 0,007 (разброс частоты от 0 до 0,07).

Для ТКП EN 1991-1-3-2009 [8] и нормальных отметок над уровнем моря СН 2.01.04-2019 [5] превышений расчетных значений снеговой нагрузки за рассматриваемый период не зафиксировано.

Отдельно следует отметить факты превышения расчетного значения снеговых нагрузок относительно современных требований, учитывающих высоту местности над уровнем моря. Подчеркнем, что, принимая во внимание выше сформулированную гипотезу о равномерном распределении снеговой нагрузки, превышение расчетного значения снеговой нагрузки зафиксировано для 3 населенных пунктов: Новогрудок, Воложин, Высокое (1). В среднем для Беларуси расчетное значение превышалось 0,06 раз за 73 года, что соответствует частоте  $8 \cdot 10^{-4}$  (разброс частоты от 0 до 0,014).

Представленный в настоящей статье анализ свидетельствует, что для зданий, в особенности построенных согласно СНиП 2.01.07-85 [4]<sup>11</sup>, снеговая нагрузка для покрытий может представлять собой особое (чрезвычайное) воздействие, не предусмотренное на этапе проектирования. Поэтому для таких зданий в ходе эксплуатации необходимо следить за величиной снеговой нагрузки и проводить своевременную уборку снега, а там, где это невозможно, – проводить мониторинг состояния пролетных конструкций и/или не допускать нахождение людей под такими конструкциями. На этапе капитального ремонта, реконструкции либо модернизации необходимо проводить усиление конструкций, либо рассматривать снеговую нагрузку как особое (чрезвычайное) воздействие – и соответственно

<sup>10</sup> Оно же соответствует ТКП EN 1991-1-3-2009 [8] после 2015 года (изменение № 1 к указанному документу)

<sup>11</sup> Фактически это все здания, получившие разрешительную документацию до 2015 года

рассматривать снеговую нагрузку для конструкций покрытия как особое воздействие и применять соответствующие стратегии восприятия особого воздействия.

Следует отдельно отметить, что в настоящей работе не проводился подробный анализ распределения снеговых нагрузок во времени в течение каждого наблюдаемого года, в том числе не учитывалось, что в течение года могло быть зафиксировано несколько максимумов снеговой нагрузки<sup>12</sup>. Поэтому целесообразно провести дальнейшие исследования значений снеговой нагрузки, в том числе с учетом понижающих коэффициентов сочетания  $\psi_i$ . Также в настоящей статье не проводился подробный анализ распределения снеговых нагрузок по всей местности снеговых районов, анализ ограничен только для наиболее изученных местностей – вблизи метеостанций. Изучение закономерностей для иных местностей Республики Беларусь является предметом дальнейших исследований.

### Стратегия безаварийной эксплуатации зданий при особой снеговой нагрузке

Примечательным является факт, что, несмотря на подробные указания по определению, характеристических (нормативных) и расчетных значений снеговой нагрузки, нормативные документы не содержат конкретных рекомендаций по эксплуатации кровель, а именно – значения предельной величины снегового покрова, который допускается оставлять без уборки.

Очевидно, что при эксплуатации затруднительно оперировать значениями снеговых нагрузок, выраженными в единицах измерения давления, например в кПа. Гораздо более удобно оценивать снеговую нагрузку через высоту снегового покрова. Для расчета искомых значений возможно воспользоваться данными Приложения Е СН 2.01.04-2019 [5] (таблица 5).

Таблица 5 – Удельный вес снега

Вид снега	Удельный вес, кН/м <sup>3</sup> *
Свежий	1,0
Осевший (через несколько часов или суток после выпадения)	2,0
Старый (через несколько недель после выпадения)	2,5–3,5
Влажный	4,0

Примечание: \* – соответствует весу в кг 1 см слоя снега.

Согласно требованиям технических нормативных правовых актов [11,12], при эксплуатации зданий крыши должны очищаться от снега, не допускается образование снегового покрова толщиной более 30 см (при оттепелях, если наблюдается обледенение свесов и водоотводящих устройств, снег должен сбрасываться и при меньшей толщине снегового покрова). Это соответствует нагрузке в 0,6 кПа для осевшего снега (через несколько часов или суток после выпадения), либо 1,2 кПа для влажного снега. Анализ таблицы 3 указывает, что большинство зданий, исходя из проектных (расчетных) значений снеговой нагрузки, способны выдержать вес свежего снега толщиной 30 см. Однако для большинства районов Республики Беларусь здания, построенные по нормам СНиП 2.01.07-85 [4], могут оказаться не рассчитанными на восприятие нагрузки от 30 см мокрого снега (выделены цветом в таблице 3) – особенно это актуально для Новогрудка и Лиды, для которых советские нормы предполагали 0,5 кПа нормативное значение снеговой нагрузки и 0,7 кПа расчетной, а по факту за последние 73 года в указанных городах превышение расчетной нагрузки было зафиксировано соответственно 34 и 22 раза (т. е. в среднем каждые 2–3 года).

Указанные факты свидетельствуют о том, что при эксплуатации зданий снег должен убираться в свежем состоянии, не допуская его накопление до критических значений. Особенно это актуально для старых зданий с учетом накопления усталостных повреждений в конструкциях.

Отдельно следует отметить важность недопущения локальных скоплений снеговой нагрузки при искусственном перемещении или перераспределении снега в процессе уборки.

В случае невозможности уборки снега и его накопления выше критических значений наиболее простым шагом является приостановка работы объектов и исключение нахождения людей под такими покрытиями. Так, в январе 2016 года, после циклона «Даниэлла» в г. Минске, надзорными органами МЧС была приостановлена работа шести объектов из-за несоблюдения требований по очистке кровель от снега и наледи, что могло стать причиной обрушения зданий.

Другим вариантом обеспечения безопасности таких объектов может быть оснащение их системами мониторинга строительных конструкций. Очевидно, что недостаточная несущая способность и жесткость конструкций не всегда может быть выявлена визуально – основные деформации строительных конструкций находятся в диапазоне малых величин, исчисляемых в миллиметрах, визуальный контроль либо мониторинг подручными средствами во многом является трудоемкой задачей. В такой ситуации обоснованным является применение стационарных автоматизированных систем мониторинга, позволяющих обеспечивать диагностику несущих конструкций в режиме реального времени [13–15]. Корректное применение такой системы требует предварительное обследование строительных конструкций на предмет повреждений и определения расчетных значений критических прогибов / перемещений строительных конструкций, в том числе и в рамках особой расчетной ситуации. Кроме того, необходимо назначение критериев оценки соответствия и ограничений, используемых в критериях с учетом фактического состояния конструкции и начальных показателей качества.

### Заключение

Природные чрезвычайные ситуации в Республике Беларусь происходят довольно редко, однако наносят, как правило, значительный ущерб.

Действующие нормативные документы СН 2.01.01-2022 и СН 2.01.04-2019 рассматривают снеговые нагрузки как переменные, стационарные воздействия и требуют обеспечения несущей способности и эксплуатационной пригодности для постоянных и переходных расчетных ситуаций. При этом СН 2.01.01-2022 декларирует, что в тех случаях, когда воздействие является непродолжительным по времени, но значительным по величине, и вероятность появления которого в течение проектного срока эксплуатации строительного сооружения чрезвычайно мала, его следует рассматривать как особое воздействие. Согласно СН 2.01.04-2019 снеговую нагрузку не относят к особым воздействиям. При этом характеристические значения снеговой нагрузки приняты исходя из 1 превышения за 50 лет (для зданий массового строительства). При этом не принимается во внимание, насколько будет превышено характеристическое значение. В связи с чем большой интерес представляет сопоставительный анализ проектных значений снеговой нагрузки, принятой согласно нормативным документам разных лет, и фактических наблюдений на метеостанциях с позиции отнесения снеговой нагрузки к особым воздействиям.

Для решения поставленной цели исследования авторами составлена карта снеговых районов для условий Республики Беларусь, совмещенная с физической картой рельефа, позволившая провести ретроспективный анализ районирования снеговой нагрузки для территории Республики Беларусь, – для населенных пунктов и близлежащей местности метеостанций определены нормативные (характеристические) значения (в том числе с учетом высот над уровнем моря), которые сопоставлены с фактическими метеонаблюдениями за 73 года наблюдений, с 1944 по 2016 год.

Анализ данных свидетельствует, что для зданий, построенных согласно СНиП 2.01.07-85 [4], снеговая нагрузка для покрытий может представлять собой особое (чрезвычайное) воздействие, не предусмотренное на этапе проектирования. Поэтому для таких зданий в ходе эксплуатации необходимо следить за величиной снеговой нагрузки и проводить своевременную уборку снега, а там, где это невозможно, проводить мониторинг состояния пролетных конструкций и/или не допускать нахождения людей под такими конструкциями. На этапе капитального ремонта, реконструкции либо модернизации

<sup>12</sup> Данные метеостанций по снеговой нагрузке фиксируются с периодичностью каждые 10 дней в течение года.

ции необходимо проводить усиление конструкций либо рассматривать снеговую нагрузку как особое (чрезвычайное) воздействие и рассматривать снеговую нагрузку для конструкций покрытия как особое воздействие.

Чистка кровель от снега лишь частично может решить указанную проблему. Анализ данных указывает, что большинство зданий, исходя из проектных (расчетных) значений снеговой нагрузки, способны выдержать лишь вес свежего снега толщиной 30 см. Однако для большинства районов Республики Беларусь здания, построенные по нормам СНиП 2.01.07-85 [4], могут оказаться не рассчитанными на восприятие нагрузки от 30 см мокрого снега – особенно это актуально для Новогрудка и Лиды, для которых советские нормы предполагали 0,50 кПа нормативного значения снеговой нагрузки и 70 кг/м<sup>2</sup> расчетного, а по факту – за последние 73 года в указанных городах превышение расчетной нагрузки было зафиксировано соответственно 34 и 22 раза (т. е. в среднем каждые 2–3 года). Указанные факты свидетельствуют о том, что при эксплуатации зданий снег должен убираться в свежем состоянии, не допуская его накопления до критических значений. Особенно это актуально для старых зданий с плоскими крышами с учетом накопления усталостных повреждений в конструкциях.

Альтернативными шагами для обеспечения безаварийной эксплуатации зданий является приостановка эксплуатации объектов либо внедрение системы мониторинга. Для внедрения систем мониторинга необходима разработка критериев оценки соответствия и ограничений, используемых в критериях с учетом фактического состояния конструкции, в том числе с учетом особой расчетной ситуации.

#### Список цитированных источников

1. Сведения о ЧС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mchs.gov.by/ministerstvo/statistika/svedeniya-o-chs/>. – Дата доступа: 12.12.2023.
2. Die Eissporthalle von Bad Reichenhall [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.welt.de/regionales/muenchen/article1604908/Die-Eissporthalle-von-Bad-Reichenhall.html>. – Дата доступа: 05.01.2024.
3. Biegus, A. Collapse of Katowice fair building / A. Biegus, K. Rykaluk // Engineering Failure Analysis. – 2013. – № 16 (5). – P. 1643–1654.
4. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия : СНиП 2.01.07-85. – Введ. 01.01.1987. – Отменен 16.11.2020. – М. : Госстрой СССР, 1987. – 46 с.
5. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Снеговые нагрузки : СН 2.01.04-2019. – Введ. 16.12.2019. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 43 с.
6. Строительные нормы. Основы проектирования строительных конструкций : СН 2.01.01-2022. – Введ. 23.11.2022. – Минск : Минстройархитектуры, 2022. – 65 с.
7. Надольский, В. В. Сопоставительный анализ снеговой нагрузки, определенной согласно СНиП и Еврокод / В. В. Надольский, Ю. С. Мартынов, А. В. Осипчик // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений / редкол.: С. И. Меркулов (отв. ред.) [и др.]. – Курск : Курск. гос. ун-т., 2018. – С. 63–73.
8. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-3. Общие воздействия. Снеговые нагрузки : ТКП EN 1991-1-3-2009 (02250). – Введ. 01.01.2010. – Отменен 09.09.2020. – Минск : РУП "Стройтехнорм", 2009. – 48 с.
9. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия : СНиП II-6-74. – Введ. 01.09.1974. – Отменен 01.01.1987. – М. : Госстрой СССР, 1974. – 59 с.
10. Изменение № 1 к СНиП 2.01.07-85. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия. – Введ. 01.07.2004. – Минск : Минстройархитектуры, 2004. – 5 с.
11. Техническая эксплуатация производственных зданий и сооружений. Порядок проведения : ТКП 45-1.04-78-2007 (02250). – Введ. 01.04.2008. – Минск : Минстройархитектуры, 2008. – 56 с.
12. Техническая эксплуатация жилых и общественных зданий и сооружений. Порядок проведения : ТКП 45-1.04-14-2005 (02250). – Введ. 01.07.2006. – Минск : Минстройархитектуры, 2006. – 44 с.
13. Рудольф, В. С. К вопросу учета снеговой нагрузки при эксплуатации зданий / В. С. Рудольф, А. В. Суриков // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2017. – № 2 (42). – Минск : НИИ ПБиЧС, 2017. – С. 45–50.
14. Использование системы мониторинга горизонтальных стальных строительных конструкций для предотвращения чрезвычайных ситуаций, вызванных снеговой нагрузкой / В. С. Рудольф [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – № 1, Т. 2. – Минск : УГЗ, 2018. – С. 53–66.
15. Датчик контроля линейного смещения и устройство контроля линейного смещения с его применением : пат. 12115 U Респ. Беларусь / В. С. Рудольф, В. А. Катанаев, О. И. Самарин. Номер заявки у 20180346.

#### References

1. Svedeniya o CHS [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://mchs.gov.by/ministerstvo/statistika/svedeniya-o-chs/>. – Data dostupa: 12.12.2023.
2. Die Eissporthalle von Bad Reichenhall [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.welt.de/regionales/muenchen/article1604908/Die-Eissporthalle-von-Bad-Reichenhall.html>. – Data dostupa: 05.01.2024.
3. Biegus, A. Collapse of Katowice fair building / A. Biegus, K. Rykaluk // Engineering Failure Analysis. – 2013. – № 16 (5). – P. 1643–1654.
4. Stroitel'nye normy i pravila. Nagruzki i vozdejstviya : SNiP 2.01.07-85. – Vved. 01.01.1987. – Otmenen 16.11.2020. – M. : Gosstroj SSSR, 1987. – 46 s.
5. Vozdejstviya na konstrukcii. Obshchie vozdejstviya. Snegovye nagruzki : SN 2.01.04-2019. – Vved. 16.12.2019. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2020. – 43 s.
6. Stroitel'nye normy. Osnovy proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij : SN 2.01.01-2022. – Vved. 23.11.2022. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2022. – 65 s.
7. Nadol'skij, V. V. Sopostavitel'nyj analiz snegovoj nagruzki, opredelennoj sglasno SNiP i Evrokod / V. V. Nadol'skij, JU. S. Martynov, A. V. Osipchik // Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya: materialy Mezhdunarodnyh akademicheskij chtenij / redkol.: S. I. Merkulov (otv. red.) [i dr.]. – Kursk : Kursk. gos. un-t., 2018. – S. 63–73.
8. Evrokod 1. Vozdejstviya na konstrukcii. CHast' 1-3. Obshchie vozdejstviya. Snegovye nagruzki : TKP EN 1991-1-3-2009 (02250). – Vved. 01.01.2010. – Otmenen 09.09.2020. – Minsk : RUP "Strojtehnorm", 2009. – 48 s.
9. Stroitel'nye normy i pravila. Nagruzki i vozdejstviya : SNiP II-6-74. – Vved. 01.09.1974. – Otmenen 01.01.1987. – M. : Gosstroj SSSR, 1974. – 59 s.
10. Izmenenie № 1 k SNiP 2.01.07-85. Stroitel'nye normy i pravila. Nagruzki i vozdejstviya. – Vved. 01.07.2004. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2004. – 5 s.
11. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya proizvodstvennyh zdaniy i sooruzhenij. Poryadok provedeniya : TKP 45-1.04-78-2007 (02250). – Vved. 01.04.2008. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2008. – 56 s.
12. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya zhilyh i obshchestvennyh zdaniy i sooruzhenij. Poryadok provedeniya : TKP 45-1.04-14-2005 (02250). – Vved. 01.07.2006. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2006. – 44 s.
13. Rudolf', V. S. K voprosu ucheta snegovoj nagruzki pri ekspluatatsii zdaniy / V. S. Rudolf', A. V. Surikov // Chrezvychajnye situacii: preduprezhdenie i likvidaciya. – 2017. – № 2 (42). – Minsk : NII PBiCHS, 2017. – S. 45–50.
14. Ispol'zovanie sistemy monitoringa gorizonta'lnyh stal'nyh stroitel'nyh konstrukcij dlya predotvrashcheniya chrezvychajnyh situacij, vyzvannyh snegovoj nagruzkoj / V. S. Rudolf' [i dr.] // Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MCHS Belarusi. – 2018. – № 1, T. 2. – Minsk : UGZ, 2018. – S. 53–66.
15. Datchik kontrolya linejnogo smeshcheniya i ustrojstvo kontrolya linejnogo smeshcheniya s ego primeneniem : pat. 12115 U Rosp. Belarus' / V. S. Rudolf', V. A. Katanaev, O. I. Samarina. Nomer zayavki u 20180346.

Материал поступил 22.02.2024, одобрен 27.03.2024, принят к публикации 27.03.2024

УДК 721.01:696

## МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ИНТЕГРИРОВАННОГО ИНФОРМАЦИОННО-СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ

А. Б. Невзорова<sup>1</sup>, Н. С. Савков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д. т. н., профессор, заведующий кафедрой нефтегазоразработка и гидропневмоавтоматика УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», Гомель, Беларусь, e-mail: anevzorova@gstu.by

<sup>2</sup>Магистр технических наук, инженер-проектировщик, ОДО "ЭНЭКА", Гомель, Беларусь, e-mail: sawkow.nikita@gmail.com

### Реферат

Проведен анализ BIM-технологии при реализации строительного проекта по инженерным сетям водоснабжения и канализации. Определены роли участников процесса проектирования. Разработаны карты базовых процессов (сценариев): разработка моделей, проверка и оценка технических решений, Пространственная междисциплинарная координация и выявление коллизий (3D-координация). В качестве основного протокола процесса совместной работы на протяжении всего жизненного цикла проекта предложено документальное обеспечение «План реализации BIM-проекта», в котором определены роли и функции участников. Показано, что построенные блок-схемы представляют собой методологию разработки интегрированного информационно-строительного проекта с использованием BIM-технологий и включают последовательно этапы инициации, планирования, организации, выполнения, контроля и закрытия проекта строительства.

**Ключевые слова:** BIM-технологии, сети водоснабжения и канализации, строительный проект, жизненный цикл, блок-схема, методология, информационное моделирование зданий.

## METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED INFORMATION AND CONSTRUCTION PROJECT USING BIM TECHNOLOGIES

A. B. Nevzorova, N. S. Savkov

### Abstract

The analysis of BIM technology in the implementation of a construction project on engineering networks of water supply and sewerage has been carried out. The roles of the participants in the design process are defined. Maps of basic processes (scenarios) have been developed: model development; verification and evaluation of technical solutions; spatial interdisciplinary coordination and collision detection (3D-coordination). As the main protocol of the collaboration process throughout the life cycle of the project, the documentation "BIM Project Implementation Plan" is proposed, which defines the roles and functions of the participants. It is shown that the constructed flowcharts represent a methodology for the development of an integrated information and construction project using BIM technologies and include sequentially the stages of initiation, planning, organization, execution, control and closure of a construction project.

**Keywords:** BIM technologies, water supply and sewerage networks, construction project, life cycle, flowchart, methodology, building information modeling.

### Введение

Затраты на эксплуатацию проекта (например, нового жилого здания) часто упускаются из виду заинтересованными сторонами проекта на этапе проектирования и строительства, несмотря на данные, свидетельствующие о том, что они составляют более половины общих затрат на жизненный цикл [1, 2]. В литературе имеется множество свидетельств, демонстрирующих, что внедрение BIM способствует снижению затрат на проектирование и строительство, повышению производительности и улучшению процессов управления рисками [3-5]. Несмотря на это, можно засвидетельствовать, что внедрение BIM в секторе строительства продвигается достаточно ограничено [6]. В России внедрение BIM технологий внедряется гораздо быстрее, чем в Республике Беларусь [7, 8]. Хотя нормативные документы были приняты еще в 2020 году. По результатам мониторинга установлено, что 72 % опрошенных специалистов-проектировщиков согласились с утверждением, что «клиенты не понимают преимуществ BIM», а 65 % выделили «отсутствие запроса подрядчиков на BIM» в качестве барьера для внедрения BIM [9, 10]. Повторяющейся темой являются фундаментальные проблемы демонстрации ценности BIM на этапе ввода в эксплуатацию. Отчасти это происходит потому, что руководители предприятий, сопровождающие проектные организации и исполнители не в состоянии удовлетворить свои информационные требования, что приводит к созданию BIM-моделей, которые приносят мало пользы на этапе ввода строительного проекта в эксплуатацию [11].

Схема базы данных, классификация объектов BIM и требования к обмену информацией – если они вообще разрабатываются – обычно представлены в форме технической документации и не учитывают организационные требования, конкретно относящиеся к этапу ввода в эксплуатацию. Проблемы внедрения BIM на этапе

ввода в эксплуатацию многогранны. Это включает в себя культурно-образовательные проблемы в отрасли, которая исторически не решается внедрять новые и формирующиеся технологические, а также финансовые проблемы в создании надежного бизнес-обоснования для внедрения BIM. С технологической точки зрения, взаимодействие между данными, связанными с BIM (например, 3D-моделями), и системами управления эксплуатационной информацией, такими как управление корпоративными ресурсами (ERM) ограничен. Кроме того, от информационного менеджера с точки зрения разработанной среды, она практически изолирована на отдельных этапах жизненного цикла и между заинтересованными сторонами, при этом данные часто хранятся в корпоративных программных решениях с плохой совместимостью, что приводит к ручному и часто разрозненному обмену информацией [7, 12]. Это четко подчеркивает необходимость разработки и адаптации междисциплинарных и универсальных приложений [13]. Наконец, из-за недостаточного вовлечения высшего персонала строительства в процессы управления BIM их требованиями часто пренебрегают.

Поэтому целью данного исследования является разработка методологии проектирования модели BIM для строительного проекта (в частности систем водоснабжения и канализации) для поддержки ее эксплуатации на этапе ввода в эксплуатацию.

### Разработка собственной методологии

Разработка собственной методологии выполнения проекта в информационном моделировании зданий (BIM) является индивидуальным процессом, который зависит от конкретных потребностей и предпочтений организации-заказчика. Рассмотрим общие этапы, которые можно рассмотреть при разработке методологии выполнения проекта в BIM:

**Определение целей проекта:** четко определить цели вашего проекта, такие как улучшение эффективности проектирования, сокращение издержек или повышение качества проектной документации. Цели помогут сосредоточиться на необходимых этапах и задачах в рамках BIM.

**Анализ требований проекта:** тщательно изучить требования конкретного проекта, включая спецификации, графики, бюджет и другие ограничения. Это поможет определить, какие BIM-процессы и методы необходимо внедрить.

**Изучение стандартов и лучших практик:** изучить и проанализировать существующие стандарты и лучшие практики в области BIM, такие как ISO 19650 и другие руководства. Использование установленных стандартов поможет обеспечить совместимость и согласованность в работе с другими участниками проекта.

**Определение ролей и ответственностей:** определить роли и ответственности всех участников проекта, включая проектировщиков, строителей, заказчика и других заинтересованных сторон. Указать, какие задачи должны быть выполнены в рамках BIM и кто несет ответственность за каждую из них (рисунок 1).

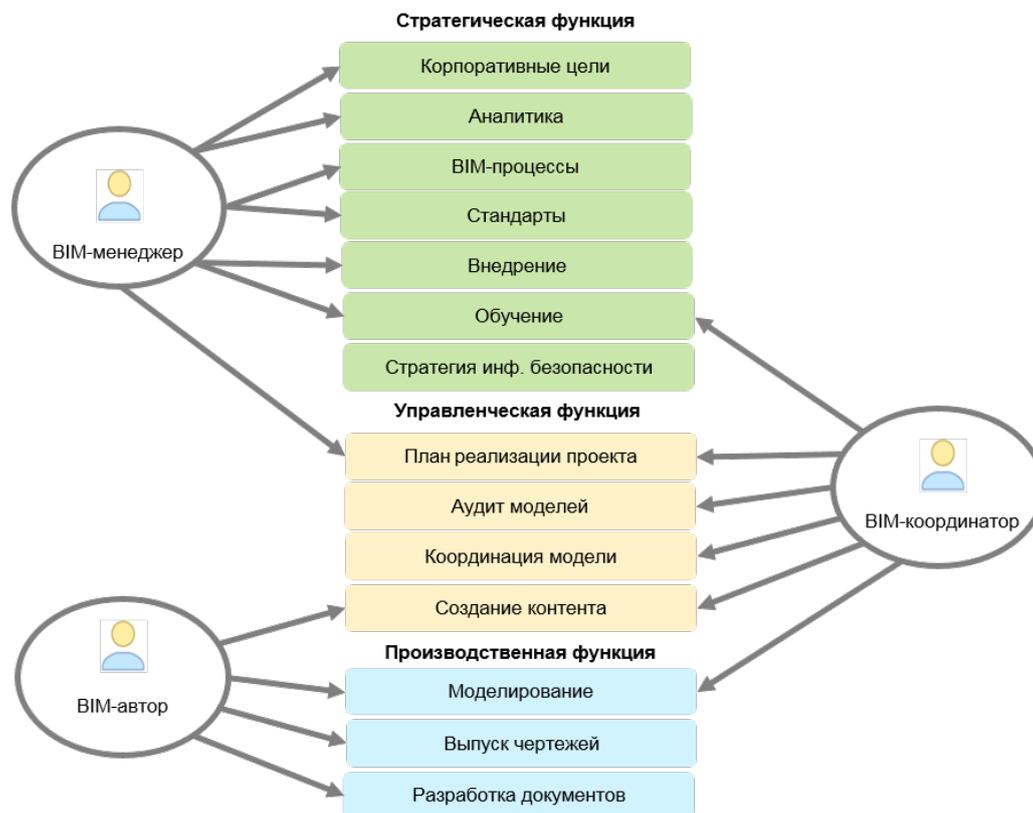


Рисунок 1 – Определение ролей участников процесса проектирования

**Выбор BIM-инструментов:** определить, какие программные инструменты и технологии BIM будут использованы в конкретном проекте. Рассмотреть функциональность инструментов, их совместимость и возможности интеграции с другими системами.

**Обучение и поддержка:** обеспечить достаточное обучение и поддержку для всех участников проекта, чтобы они могли эффективно использовать BIM-инструменты и следовать разработанной методологии. Это может включать обучение внутреннего персонала, найм специалистов или обращение к поставщикам услуг.

**Непрерывное улучшение:** внедрение BIM-методологии является процессом, который можно и нужно постоянно улучшать. Необходимо следить за результатами проекта, выявлять узкие места и проблемы и вносить соответствующие корректировки в методологию для повышения эффективности и результативности.

При выполнении проекта информационной модели систем водоснабжения и канализации [10, 12] необходимо руководствоваться основными нормативными документами и законодательными актами, действующими на территории Республики Беларусь, такими как:

СН 4.01.01-2019 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения», СН 2.02.02-2019 «Противопожарное водоснабжение», СН 4.01.03-2019 «Внутренние сети водоснабжения и канализации», П1-2019 к ТКП 45-4.01-319-2018 «Проектирование систем внутреннего водоснабжения зданий», П2-2019 к ТКП 45-4.01-319-2018 «Проектирование систем внутренней канализации зданий», СН 4.01.02-2019 «Канализация. Наружные сети и сооружения», а также при оформлении рабочей документации использовать норматив-

ный документ «ГОСТ Р 21.620-2023 Система проектной документации для строительства (СПДС). Правила выполнения проектной документации внутренних систем и наружных сетей канализации».

Для определения основных принципов информационного моделирования, а также целевых требований к информационным моделям и процессам моделирования, соответствующих настоящему времени, в мировой практике стандартизации BIM вводится понятие модели зрелости технологии BIM.

На рисунке 2 приведена модель зрелости технологии BIM, отображающая продвижение от 2D CAD до BIM Уровня 3.

**Уровень 2.** Это целевой уровень зрелости технологии BIM, принятый к реализации в настоящее время во всех международных и зарубежных документах по стандартизации BIM. Основное отличие от предыдущих уровней и основная цель этого уровня – организация совместной скоординированной работы многодисциплинарных проектных групп на основе сводной модели, размещаемой в среде общих данных. Для обеспечения интероперабельности используются как нативные, так и открытые форматы, и схемы представления данных. Обмен данными осуществляется на уровне 3D-геометрии и атрибутивной информации. Данный уровень предполагает добавление следующих измерений: 4D (время) и 5D (стоимость) и частичное использование BIM на всех стадиях жизненного цикла объекта. На данном уровне могут выполняться работы по автоматизированному сбору данных по моделям и автоматизированным проверкам на коллизии.

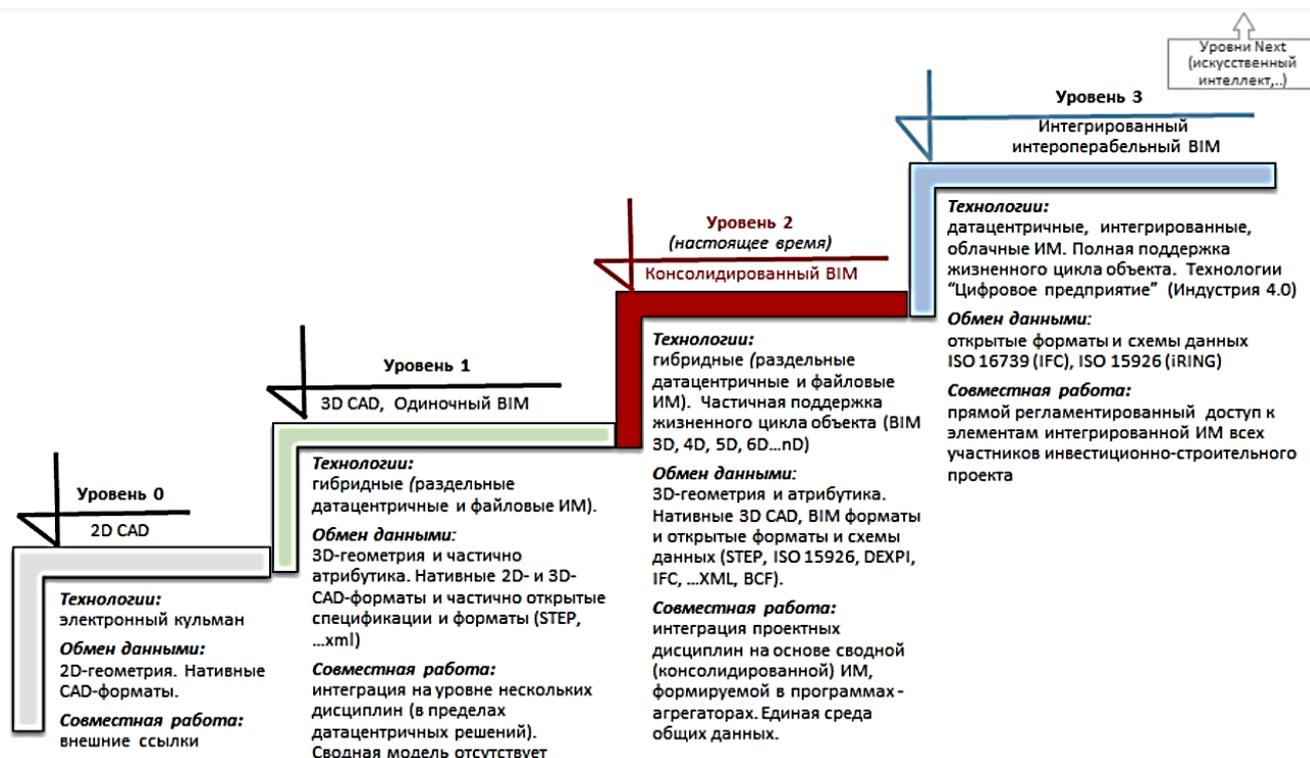


Рисунок 2 – Уровни зрелости технологии BIM

**Уровень 3.** Предполагает работу посредством web-сервисов всех проектных дисциплин и всех участников инвестиционно-строительного проекта к единой интегрированной датацентричной BIM-модели на основе открытых схем (онтологий) и форматов данных, семантик и классификаций. В настоящее время не существует документов по стандартизации этого уровня.

Уровень 2 зрелости технологии информационного моделирования включает следующие основные требования к BIM:

- разработка BIM-моделей по отдельным дисциплинам и организация обмена информацией между ними на основе сводных моделей, внешних ссылок или непосредственного обмена информацией;
- четкое определение информационных требований технического заказчика (EIR);
- оценка квалификации исполнителей проекта;
- предоставление исполнителями BIM-проекта плана реализации BIM-проекта (BEP);
- обеспечение единой среды общих данных (CDE);
- разработка BIM-моделей с использованием программного обеспечения, поддерживающего технологию информационного моделирования.

#### Анализ целей и определение задач применения BIM

Одним из наиболее важных этапов в процедуре планирования BIM-проекта является определение потенциальной ценности BIM для достижения поставленных целей проекта [9]. Для этого на начальном этапе следует проанализировать информационные требования заказчика и определить соответствующие им задачи применения BIM. Результаты анализа рекомендуется сводить в табличной форме.

Задачи применения BIM рекомендуется разделять на основные (первостепенные) и дополнительные (второстепенные). К основным, по состоянию современного уровня внедрения BIM в промышленных отраслях, относятся:

- производство модели;
- пространственная междисциплинарная координация и выявление коллизий (3D-координация); проверка и оценка технических решений;
- выпуск чертежей и спецификаций.

Каждую задачу применения BIM рекомендуется кратко описывать. Описание должно включать, в том числе, краткую аннотацию, результаты работ и способы их проверки, необходимые компетенции исполнителей, требуемое программное обеспечение и другие аспекты.

После описания используемых в проекте задач применения BIM рекомендуется разработать процессы (сценарии) реализации для каждой задачи применения BIM, а также разработать и согласовать процесс верхнего уровня, описывающий взаимосвязь BIM-сценариев.

Для разработки процессов информационного моделирования рекомендуется использовать методику, изложенную в ГОСТ Р 57310-2016 «Моделирование информационное в строительстве. Руководство по доставке информации. Методология и формат».

На рисунках 3–5 приведены примеры карт процессов (сценариев). Процесс (сценарий) «Разработка модели» является базовым для выполнения остальных сценариев. Результат его реализации – это информационная модель проектируемого объекта. В отличие от прочих сценариев «Разработка модели» является обязательным для выполнения в проекте по информационному моделированию.

#### Разработка структуры и содержания BIM-моделей и процедуры обмена информацией

После разработки карты BIM-процессов необходимо определить процедуры обмена информацией. Основная цель этого этапа – определить информационные потребности участников BIM-проекта для реализации задач применения BIM.

Основными носителями информации в BIM являются элементы информационных моделей, которые аккумулируют ее в процессе разработки проекта. Вследствие этого объем геометрической и атрибутивной информации, необходимой и достаточной для решения проектных задач, рекомендуется задавать через уровни проработки элементов моделей, а разработка требований к LOD является основной задачей планирования процедур обмена информацией между всеми участниками проекта. Особое значение эта процедура приобретает при наличии внешних проектных групп (субпроектировщиков), работу которых необходимо скоординировать генпроектировщику.

Для структурирования и группировки требований к уровням проработки на различных этапах проекта рекомендуется разрабатывать таблицы информационных обменов, например, в виде сводной спецификации LOD. Данная спецификация определяет, какая информация, кем и когда должна быть предоставлена в совместное пользование.

Сводная спецификация LOD для однотипных объектов, проектирование которых осуществляется без привлечения субпроектных организаций, может быть стандартизована и включена в BIM-стандарт организации.

Основные принципы обмена информацией:

– обмен информацией должен осуществляться на регулярной основе в объеме, достаточном для реализации всех задач применения BIM;

– обмен информацией должен осуществляться путем организации регламентированного доступа участников проекта к информационным моделям, размещаемым в среде общих данных;

– объем, состав и содержание геометрической и атрибутивной информации, которой обмениваются участники проекта, рекомендует определять путем формирования требований к LOD;

– передаваемая информация должна быть целостной и однозначно определена по смыслу для всех участников проекта;

– обмен информацией должен осуществляться в форматах, согласованных всеми участниками проекта.

Следует отметить, что карты BIM-процессов (сценариев) и сводные спецификации LOD делают процедуру планирования понятной всем участникам и будут способствовать ходу выполнения проекта в течение всего процесса реализации. Эти два инструмента определяют информацию, которая должна создаваться на всех этапах применения BIM, и участников проекта, ответственных за представление и получение информации.

#### Структура моделей

При организации структуры данных в составе BIM-моделей следует учитывать:

– структуру разделов проектной документации или комплектов марок чертежей рабочей документации;

– вид объекта строительства;

– число и состав проектных групп;

– особенности реализации конкретного программного обеспечения для коллективного доступа к данным BIM-моделей.

Для обеспечения многопользовательского доступа к BIM-моделям и создания комфортной среды для коллективной работы информационную модель необходимо разделять, например, по дисциплинам проекта. В зависимости от разрабатываемой части проекта модели рекомендуется разделять:

– технологические и инженерные разделы – на системы и технологические линии по их функциональному назначению, по зданиям (сооружениям);

– архитектурную часть – по уровням (этажам), секциям, зданиям (сооружениям);

– конструкторскую часть – по деформационным швам, захваткам бетонных и металлических конструкций, по зданиям (сооружениям).

Разделение модели также осуществляется с учетом структуры среды общих данных.

Планирование потребности в ресурсах в общем случае включает:

– определение потребности в человеческих ресурсах, включая определение ролей и функций участников процесса информационного моделирования, а также при необходимости повышение их квалификации;

– определение потребности в материальных ресурсах – аппаратном обеспечении;

определение потребности в нематериальных ресурсах – программном обеспечении, каталогах компонентов, прикладных базах данных и т. п.

Совместная работа участников проекта должна осуществляться в едином информационном пространстве – среде общих данных (СОД). В рамках проекта должны быть разработаны и внедрены процедуры контроля процесса информационного моделирования и качества информационных моделей.

#### Документ «План реализации BIM-проекта»

Результаты процесса планирования BIM-проекта должны быть зафиксированы в документе «План реализации BIM-проекта».

Цель этого документа — зафиксировать согласованные стратегии и процессы для всей команды проекта. Он должен служить основным протоколом процесса совместной работы на протяжении всего жизненного цикла проекта, и предполагается, что он будет развиваться с самого начала и до конца процесса информационного моделирования. Благодаря этому документу проектные группы и руководство проектом совместно соглашаются в том, как, когда, почему, на каком уровне и для обеспечения каких результатов проекта будет использоваться BIM.

В этом документе рассматриваются рабочие процессы проекта, создание моделей, участники проекта и совместное использование информации. Потребность во взаимодействии возрастает по мере реализации BIM-проекта, и этот документ является одной из частей представления всего проекта. Этот документ будет поддерживать связь между различными участниками проекта, которые будут реализовывать согласованную BIM-стратегию, в противном случае ее потенциальная эффективность будет потеряна.

В качестве основы структуры Плана реализации BIM-проекта рекомендуется использовать документ «The BIM Project Execution Planning Guide and Templates – Version 2.1, Penn State». Согласно этому документу, примерная структура разделов документа «План реализации BIM-проекта» включает следующие разделы:

Раздел 1. Краткое описание проекта: содержит общую информацию о назначении плана реализации проекта и другую общую информацию о документе.

Раздел 2. Сведения об объекте строительства, сроках реализации проекта, перечень исходных данных: содержит информацию об основных характеристиках объекта строительства, сроках реализации каждого этапа проекта, а также краткий перечень исходных данных.

Раздел 3. Ключевые контакты проекта: содержит контактную информацию о ключевых участниках, которые определены на текущем этапе реализации проекта.

Раздел 4. Цели и задачи применения BIM: содержит подробное описание целей и соответствующих им задач применения.

Раздел 5. Роли и функции основных участников: содержит описание основных ролей и функций участников BIM-проекта, а также требуемые человеческие ресурсы.

Раздел 6. Карты BIM-процессов: содержат карты BIM-процессов (сценариев) по задачам применения BIM.

Раздел 7. Процедуры обмена данными: включает описание процедур обмена данными и сводную спецификацию LOD.

Раздел 8. Требования к информационным моделям: включает требования к BIM-моделям, согласованные с информационными требованиями заказчика.

Раздел 9. Процедуры совместной работы: содержит описание процедур совместной работы в среде общих данных, форматы обмена данными и регламенты работы в системах управления инженерными данными.

Раздел 10. Процедуры контроля качества: содержит описание процедур контроля процесса информационного моделирования и качества BIM-моделей.

Раздел 11. Потребности в ресурсах: потребности в аппаратном и программном обеспечении, каталоги компонентов, шаблоны, базы данных и т. п.

Раздел 12. Структура и содержание информационных моделей: содержит описание структуры и состава информационных моделей, правила разделения моделей, систему именования, общую систему координат.

Раздел 13. Результаты процесса информационного моделирования: содержит требуемые результаты процесса информационного моделирования на каждом этапе проекта.

Раздел 14. Стратегия реализации: содержит информацию о договоре.

Раздел 15. Приложения.

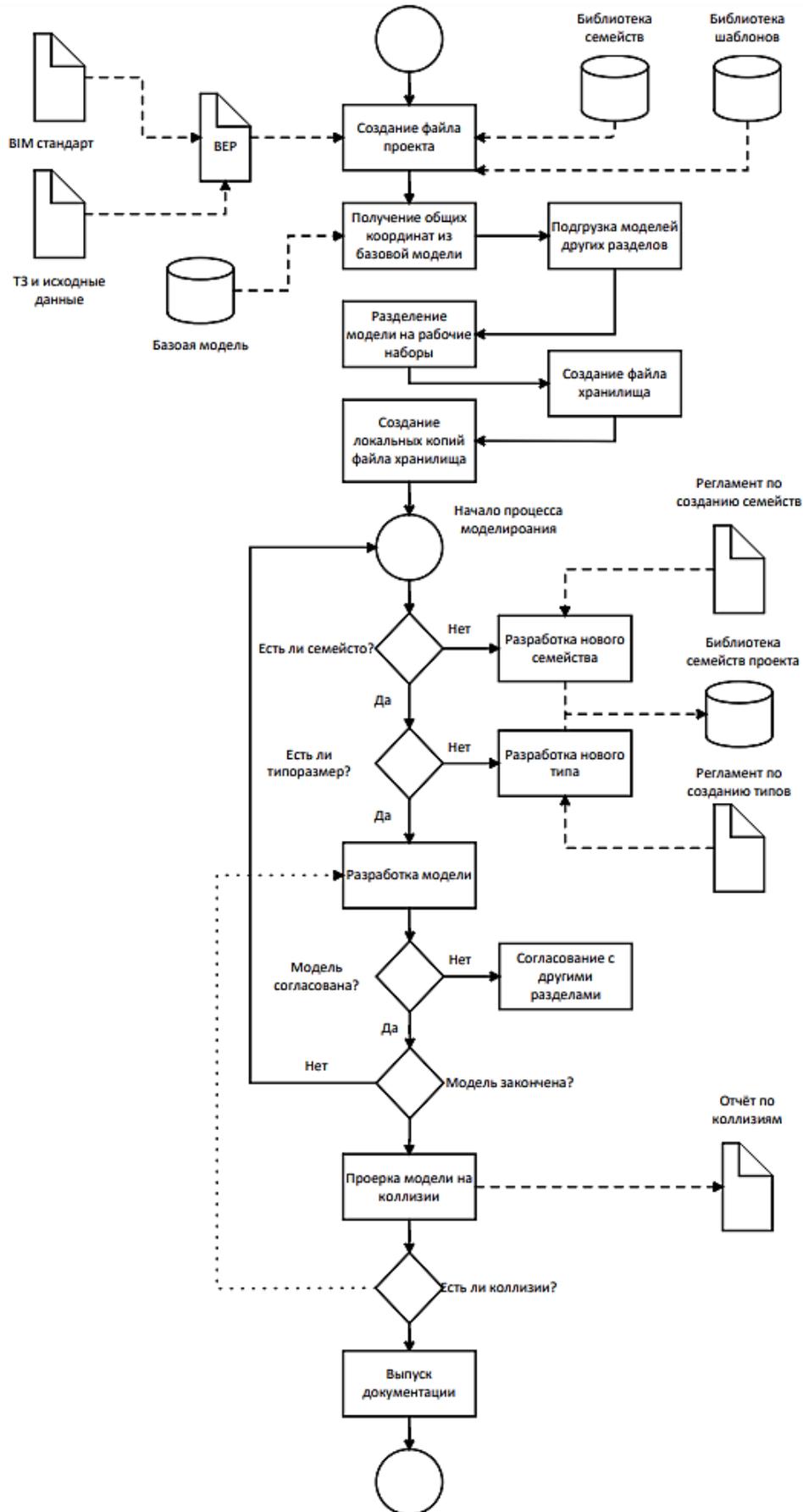


Рисунок 3 – Пример процесса (сценария) «Разработка модели»

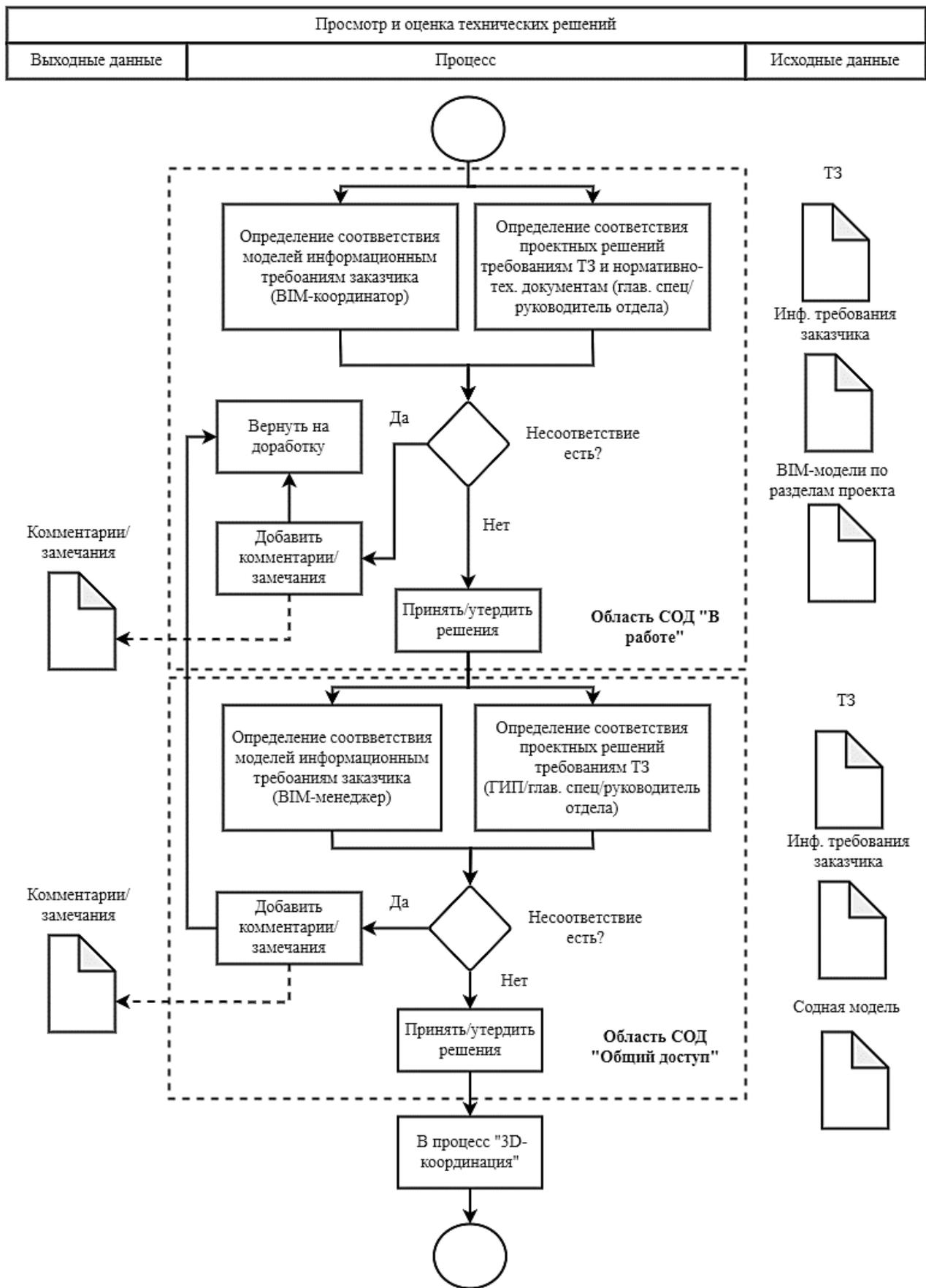


Рисунок 4 – Пример процесса (сценария) «Проверка и оценка технических решений»

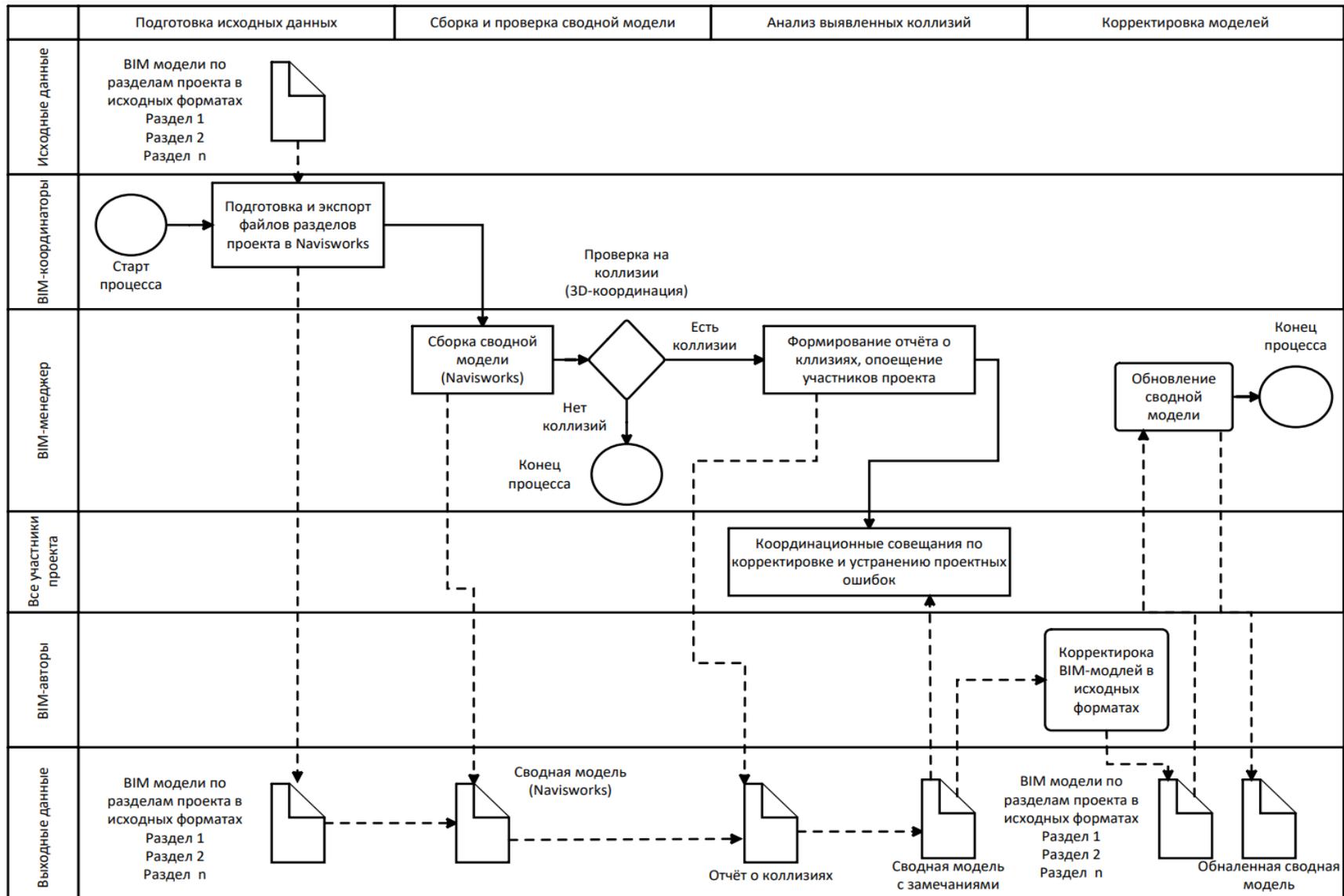


Рисунок 5 – Пример процесса (сценария) «Пространственная междисциплинарная координация и выявление коллизий (3D-координация)»

**Роли и функции участников BIM-проекта**

Применение в проектах технологии информационного моделирования (BIM) позволяет вести разработку проекта в трехмерном пространстве, благодаря чему открываются новые возможности, но и одновременно влечет за собой изменение традиционных проектных процессов, в том числе таких, как:

- перераспределение объемов работ по стадиям;
- процессы совместной работы над проектом, междисциплинарной координации и согласования проектных решений;
- процессы организации коммуникаций между участниками проекта;
- процессы проверки и оценки технических решений;
- процессы внесения изменений в проект;
- процессы контроля изменений;
- процессы контроля объемов и качества проектных работ;
- процессы подготовки технической документации;

- комплектация и передача результатов проекта (информационные модели и техническая документация в цифровых форматах);
- процессы работы с внешними организациями;
- коммерческо-договорная работа.

С переходом от традиционных проектных процессов появляются новые роли, в том числе такие, как BIM-менеджер и BIM-координатор. Также у традиционных участников проекта, проектировщиков, руководителей проекта, руководителей подразделений, IT-служб и у руководства организации появляются новые роли и соответствующие функции. Для успешной реализации BIM-проектов в организации необходимо предусмотреть роли, выполняющие стратегические, управленческие и производственные функции, которые могут выполняться на различных уровнях: уровне организации и уровне проекта. На рисунке 6 представлена примерная структура основных ролей в организации.

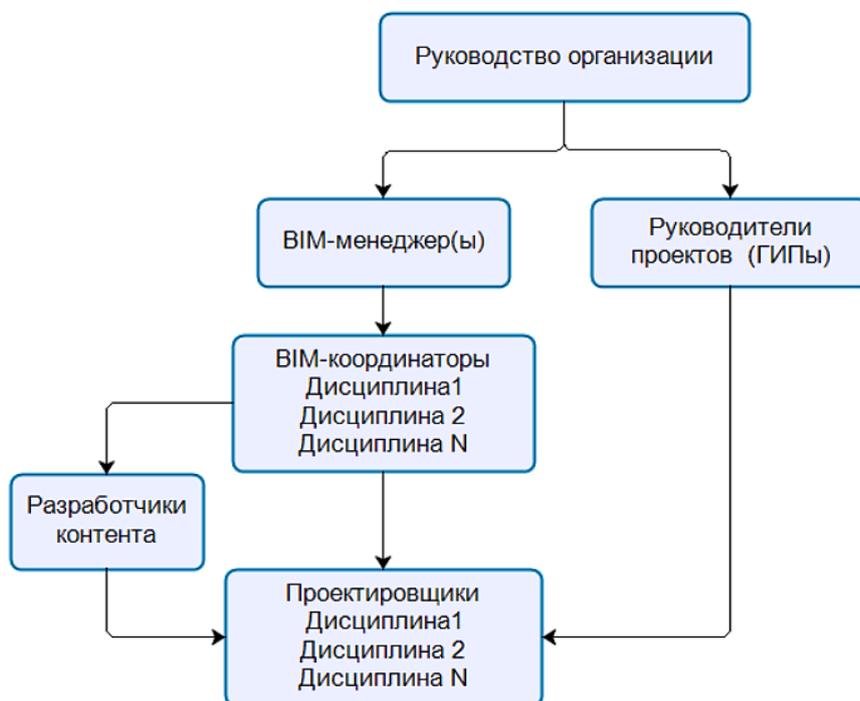


Рисунок 6 – Примерная структура основных ролей в организации

Руководство организации – группа лиц, поддерживающих BIM-стратегию организации и ответственных за своевременное финансирование BIM-бюджета.

Руководители проектов (ГИПы) – группа лиц, ответственных за управление проектами в соответствии с Планами реализации BIM-проектов.

BIM-менеджер(ы) – лицо или группа лиц, ответственных за внедрение технологии информационного моделирования на уровне организации и за техническую реализацию процессов информационного моделирования на уровне проекта.

BIM-координаторы – группа лиц, ответственных за реализацию процессов информационного моделирования на уровне определенной дисциплины проекта.

Разработчики контента – группа лиц, ответственных за разработку контента для информационного моделирования в соответствии с заданиями на разработку.

Проектировщики – проектные группы, ответственные за разработку дисциплинарных информационных моделей и технической документации в соответствии с Планами реализации BIM-проектов.

**Среда общих данных** определяет регламент совместной работы над BIM-проектом в соответствии со стандартом BS1192:2007+A2:2016. Основным фактором совместной работы участников проекта является способность к коммуникации, эффективному использованию и обмену актуальными данными без потерь и искажений.

Плохо подготовленная и скоординированная проектная информация является одной из причин увеличения сроков проектов, задержек, расходов и конфликтов. Процедура СОД предназначена для обеспечения надежного многократного обмена актуальной, проверенной информацией между участниками проекта для поддержки высокого качества проектов. СОД – это один из способов предоставить членам команды проекта возможность работать сообща, более эффективно и безошибочно (рисунок 7).

Обмен данными должен осуществляться через общую среду данных. Это единственный источник информации для проекта, используемый для сбора, разработки, управления, использования и распространения документации, информационных моделей и прочих графических и неграфических данных для всей команды проекта. Данные должны быть проверены; информация, не требуемая для обмена, должна быть удалена.



Рисунок 7 – Процедура СОД

### Заключение

В статье рассмотрены общие этапы и роли участников процесса проектирования при разработке методологии выполнения проекта в BIM для реализации строительного проекта по инженерным сетям водоснабжения и канализации. Карты базовых процессов (сценариев): разработка моделей; проверка и оценка технических решений; пространственная междисциплинарная координация и выявление коллизий (3D-координация) позволили определить информационные потребности участников BIM-проекта для реализации задач применения BIM.

В качестве основного протокола процесса совместной работы на протяжении всего жизненного цикла проекта предложено формировать документальное обеспечение «План реализации BIM-проекта», в котором будут определены роли и функции участников. Показано, что построенные блок-схемы представляют собой методологию разработки интегрированного информационно-строительного проекта с использованием BIM-технологий и включают последовательно этапы инициации, планирования, организации, выполнения, контроля и закрытия проекта строительства.

Тематическое исследование продемонстрировало тот факт, что разработанная методология может способствовать большей интеграции BIM в управление активами строительной компании.

### Список цитированных источников

1. Крохин, Д. Н. Как применение новейших технологий в архитектуре упрощает создание строительных проектов / Д. Н. Крохин // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 7. – С. 343–347.
2. Вайсман, С. М. Разработка организационно-технологических решений в строительстве с использованием технологий информационного моделирования (ТИМ) / С. М. Вайсман, А. Х. Байбури // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – № 4 (Т. 16). – С. 21–28.
3. Heaton, J. Design and development of BIM models to support operations and maintenance / James Heaton, Ajith Kumar Parlikada, Jennifer Schooling // Computers in Industry. – 2019. – № 111. – P. 172–186.
4. Рахматуллина, Е. С. BIM-моделирование как элемент современного строительства / Е. С. Рахматуллина // Российское предпринимательство. – 2017. – № 19 (Т. 18). – С. 2849–2866.
5. Лазаренко, О. В. Внедрение BIM-технологий в отрасли строительного комплекса Республики Беларусь / О. В. Лазаренко, А. Н. Ягубкин // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2020. – № 8. – С. 52–57.
6. Лушников, А. С. Проблемы и преимущества внедрения BIM-технологий в строительных компаниях / А. С. Лушников // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 6. – С. 252–256.
7. Шалобыта, Н. Н. Мировой и отечественный опыт нормирования в области информационного моделирования зданий и сооружений / Н. Н. Шалобыта, О. А. Акулова, Е. Н. Шалобыта // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2022. – № 1 – С. 53–61.
8. Мальцевич, И. В. Цифровизация строительной отрасли Республики Беларусь как важнейший фактор роста ее конкурентоспособности / И. В. Мальцевич // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2021. – № 3 (86). – С. 55–66.
9. Невзорова А.Б. Основные принципы информационного моделирования зданий: пособие/ А. Б. Невзорова, М. С. Афонченко. – Гомель, БелГУТ, 2017. – 107 с.
10. Савков, Н. А. Использование BIM-технологий в проектировании систем водоснабжения и канализации / Н. А. Савков // Водоснабжение, химия и прикладная экология: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 22 марта, 2022 г. – Гомель: БелГУТ, 2022. – С. 126–128.

11. Талапов В. В. Основы BIM. Введение в информационное моделирование зданий: монография / В. В. Талапов. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 392 с.
12. Невзорова, А. Б. Автоматизация технологических процессов систем водоснабжения и канализации : учеб.-метод. пособие / А. Б. Невзорова ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2022. – 151 с.
13. Особенности использования информационного моделирования в проектировании и строительстве инновационных транспортно-инфраструктурных комплексов UST / А. Э. Юницкий [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 2. – С. 97–102.
6. Lushnikov, A. S. Problemy i preimushchestva vnedreniya BIM-tekhnologij v stroitel'nyh kompaniyah / A. S. Lushnikov // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. – 2015. – № 6. – С. 252–256.
7. SHalobyta, N. N. Mirovoj i otechestvennyj opyt normirovaniya v oblasti informacionnogo modelirovaniya zdaniy i sooruzhenij / N. N. SHalobyta, O. A. Akulova, E. N. SHalobyta // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2022. – № 1 – С. 53–61.
8. Mal'cevich, I. V. Cifrovizaciya stroitel'noj otrasli Respubliki Belarus' kak vazhnejshij faktor rosta ee konkurentosposobnosti / I. V. Mal'cevich // Vestnik Gomeľskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P. O. Suhogo. – 2021. – № 3 (86). – С. 55–66.

#### References

1. Krohin, D. N. Kak primeneniye novejsih tekhnologij v arhitekture uproshchaet sozdaniye stroitel'nyh proektov / D. N. Krohin // Innovacii i investicii. – 2023. – № 7. – С. 343–347.
2. Vajsman, S. M. Razrabotka organizacionno-tekhnologicheskikh reshenij v stroitel'stve s ispol'zovaniem tekhnologij informacionnogo modelirovaniya (TIM) / S. M. Vajsman, A. H. Bajburin // Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. – 2016. – № 4 (Т. 16). – 2016. – С. 21–28.
3. Heaton, J. Design and development of BIM models to support operations and maintenance / James Heaton, Ajith Kumar Parlikada, Jennifer Schooling // Computers in Industry. – 2019. – № 111. – P. 172–186.
4. Rahmatullina, E. S. BIM-modelirovanie kak element sovremennogo stroitel'stva / E. S. Rahmatullina // Rossijskoe predprinimatel'stvo. – 2017. – № 19 (Т. 18). – С. 2849–2866.
5. Lazarenko, O. V. Vnedrenie BIM-tekhnologij v otrasli stroitel'nogo kompleksa Respubliki Belarus' / O. V. Lazarenko, A. N. YAgubkin // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2020. – № 8. – С. 52–57.
9. Nevzorova A.B. Osnovnye principy informacionnogo modelirovaniya zdaniy: posobie/ A. B. Nevzorova, M. S. Afonchenko. – Gomeľ, BelGUT, 2017. – 107 s.
10. Savkov, N. A. Ispol'zovanie BIM-tekhnologij v proektirovanii sistem vodosnabzheniya i kanalizacii / N. A. Savkov // Vodospobzhenie, himiya i prikladnaya ekologiya : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Gomeľ, 22 marta, 2022 g. – Gomeľ : BelGUT, 2022. – С. 126–128.
11. Talapov V. V. Osnovy BIM. Vvedenie v informacionnoe modelirovanie zdaniy: monografiya / V. V. Talapov. – M. : DМК Press, 2011. – 392 s.
12. Nevzorova, A. B. Avtomatizaciya tekhnologicheskikh processov sistem vodosnabzheniya i kanalizacii : ucheb.-metod. posobie / A. B. Nevzorova ; M-vo transp. i kommunikacij Resp. Belarus', Belorus. gos. un-t transp. – Gomeľ : BelGUT, 2022. – 151 s.
13. Osobennosti ispol'zovaniya informacionnogo modelirovaniya v proektirovanii i stroitel'stve innovacionnyh transportno-infrastrukturnykh kompleksov UST / A. E. YUnickij [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2023. – № 2. – С. 97–102.

*Материал поступил 06.02.2024, одобрен 09.03.2024, принят к публикации 11.03.2024*

## ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ДАВЛЕНИЯ НА СЦЕПЛЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ ПРОВОЛОЧНОЙ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ

Д. Н. Лазовский<sup>1</sup>, А. Д. Лазовский<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> К. т. н., ООО «Sotera», Новополоцк, Беларусь, e-mail: y.lazouski@psu.by

### Реферат

Конструкция платформенных стыков в перекрытиях многоэтажных зданий предусматривает передачу сжимающих усилий от вышерасположенных вертикальных несущих элементов на нижерасположенные через опорные части плит. При этом опорные части плит, где находится зона анкеровки нижней и верхней продольной предварительно напряженной арматуры, испытывают воздействие поперечного давления сжатия. Продольная предварительно напряженная арматура, воспринимающая опорный изгибающий момент, работает на растяжение с усилием, определяемым прочностью ее анкеровки в бетоне. В результате проведенного экспериментального исследования влияния поперечного давления при сжатии на прочность и деформативность анкеровки предварительно напряженной проволочной арматуры в бетоне предложены зависимости « $\tau_b - S_b$ », позволяющая установить усилие в арматуре, соответствующее прочности ее анкеровки.

**Ключевые слова:** сцепление арматуры с бетоном, предварительно напряженная проволочная арматура, платформенный стык, поперечное давление при сжатии, многопустотные железобетонные плиты безопалубочного формирования.

### INFLUENCE OF TRANSVERSE PRESSURE ON THE BOND BEHAVIOUR OF THE PRE-STRESSED WIRE IN HOLLOW CORE SLABS

D. N. Lazouski, A. D. Lazouski

### Abstract

The design of platform joints in the floors of multi-storey buildings provides for the transfer of compressive forces from the upper vertical load-bearing elements to the lower ones through the supporting parts of the hollow core slabs. In this case, the supporting parts of the hollow core slabs, where the anchorage zone of the lower and upper longitudinal prestressed reinforcement is located, is exposed to transverse compression pressure. Longitudinal prestressed wire, which absorbs the supporting bending moment, works in tension with a force determined by the strength of its anchorage in concrete. As a result of an experimental study of the influence of transverse pressure during compression on the strength and deformability of anchoring prestressed wire reinforcement in concrete, the « $\tau_b - S_b$ » relationship was proposed, which makes it possible to establish the force in the reinforcement corresponding to the strength of its anchorage.

**Keywords:** bond between concrete and prestressed wire, platform joint, transverse compression pressure, hollow core slab.

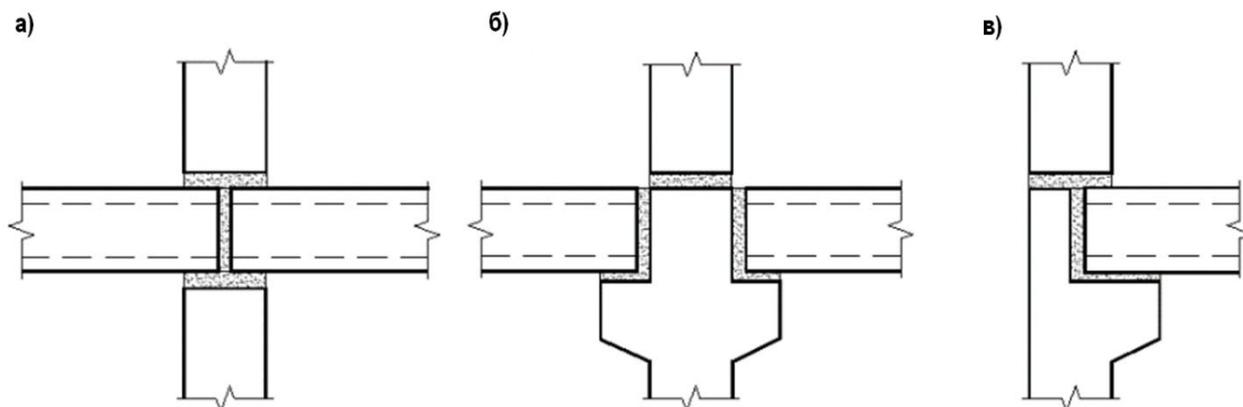
### Введение

Многопустотные плиты, как основные конструкции сборных перекрытий, доказали свою надежность за долгие годы эксплуатации с 30-х годов 20-го века [1, 2]. Данный вид изделий из сборного железобетона получил широкое распространение по всему миру ввиду технологичности, экономичности вследствие эффективного использования материалов в поперечном сечении, снижения расхода стали за счет применения высокопрочной предварительно напряженной арматуры и др.

Производство железобетонных многопустотных плит осуществляется на длинных стендах (до 120...150 м), оснащенных упорами для натяжения арматуры. Армирование производится исключительно про-

дольной, предварительно напряженной арматурой, выполненной, как правило, в виде канатов или высокопрочной проволоки и располагаемой у нижней грани плиты. Для восприятия отрицательного изгибающего момента при отпуске предварительно напряженной рабочей арматуры в верхней зоне предусматривается дополнительное продольное армирование предварительно напряженной арматурой.

Горизонтальные стыки в местах опирания дисков перекрытий из сборных многопустотных плит на несущие конструкции по способу передачи вертикальных сжимающих нагрузок подразделяются на платформенные, контактные и комбинированные (рисунок 1) [3, 4].



а) платформенный; б) контактный; в) комбинированный  
Рисунок 1 – Типы горизонтальных стыков

Сжимающее усилие в перечисленных стыковых соединениях передается: в платформенных – через опорные участки плит перекрытий; в контактных – непосредственно через слой раствора, уложенного в полость стыка, минуя плиты перекрытия, а в комбинированных – через опорные участки плит перекрытий и контактные площадки несущих конструкций. Основным, наиболее распространенным типом горизонтального узла опирания диска перекрытий здания из сборных железобетонных плит перекрытий на несущие конструкции, является платформенный стык [5, 6, 7, 8].

Конструкция платформенных стыков в перекрытиях многоэтажных зданий предусматривает передачу сжимающих усилий от вышерасположенных вертикальных несущих элементов на ниже расположенные через горизонтальные опорные участки плит перекрытий. При этом названные участки плит перекрытий в составе платформенных стыков здания оказываются непреднамеренно защемленными в них. В месте опирания плит перекрытий вследствие непреднамеренного защемления возникает отрицательный изгибающий момент. Конструкция плит перекрытия превращается в статически неопределимую систему с перераспределением усилий по длине конструкций из-за нелинейной работы железобетона и появления трещин.

Величина опорного отрицательного изгибающего момента при защемлении определяется в значительной степени работой предварительно напряженной арматуры в верхней зоне плит в местах платформенных стыков. Учитывая небольшую длину площадки опирания плит (80...150 мм) по сравнению с длиной зоны анкеровки арматуры (330...500 мм) величина опорного изгибающего момента определяется прочностью анкеровки верхней предварительно напряженной арматуры на ограниченной ее длине от торца плит до ближайшей к опоре трещины нормального отрыва по грани выше расположенной конструкции стены. При этом конструкция платформенного стыка в перекрытиях многоэтажного здания предусматривает передачу значительного сжимающего давления (до значения призмной прочности  $f_{ck}$ ) на опорные зоны плит, которое влияет на сцепление предварительно напряженной арматуры с бетоном.

Целью экспериментального исследования является выявление степени влияния поперечного давления на сцепление предварительно напряженной проволочной арматуры с бетоном на ограниченной по длине зоны ее анкеровки и верификация предлагаемой авторами методики учета влияния поперечного давления на сцепление с бетоном применительно к многослойным плитам безопалубочного формования в составе платформенных стыков конструкций многоэтажных зданий.

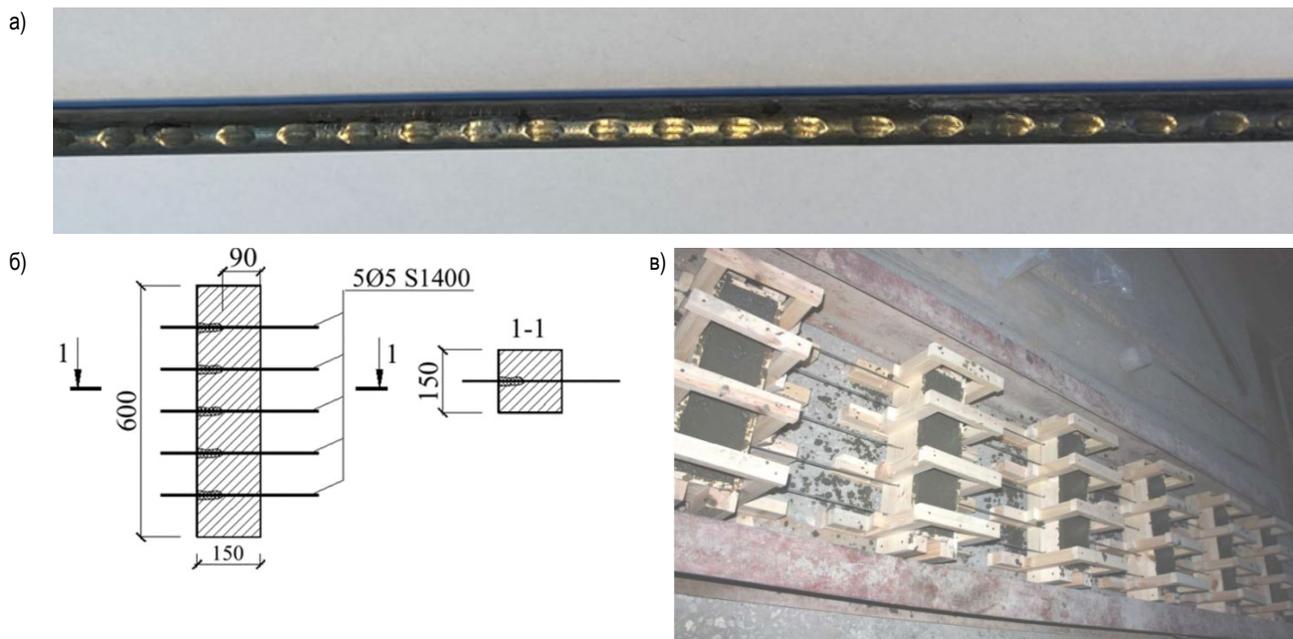
### Методика экспериментального исследования

Для получения экспериментальных данных о влиянии поперечного давления на сцепление предварительно напряженной проволочной арматуры с бетоном были проведены лабораторные испытания на выдергивание арматуры из бетона с созданием поперечного давления в зоне заделки арматуры. Были изготовлены и испытаны на выдергивание опытные образцы в виде отрезков высокопрочной проволоки класса S1400 диаметром 5 мм в состоянии поставки (без специальной обработки поверхности), (рисунок 2а), заделанных в бетонную призму размером 150×150×600 мм (рисунок 2б).

В процессе изготовления высокопрочная проволока S1400 предварительно растягивалась на упорах до уровня 450 МПа, как предусмотрено в типовой серии многослойных плит [9] для верхней продольной арматуры. Предварительное напряжение проволоки осуществлялось при помощи гидравлического домкрата с полым цилиндром и насосной станции с образцовым манометром. Фиксация проволоки по концам выполнялась при помощи цанговых зажимов.

С целью исключения эффекта обоймы в месте упора домкрата при выдергивании проволоки из бетона со стороны нагружаемой грани был предусмотрен изолированный от бетона участок высокопрочной проволоки. Изоляция участка проволочной арматуры создавалась с помощью пластилина слоем до 6 мм. Длина заделанного в бетон участка проволоки была принята 90 мм, аналогично ширине участка площадки опирания вышерасположенных вертикальных элементов, создающих поперечное давление зоны анкеровки верхней продольной арматуры в плитах. Общий вид опытных образцов-призм при бетонировании приведен на рисунке 2в.

Состав тяжелого мелкозернистого бетона принят аналогичным бетону, применяемому при изготовлении многослойных плит по стендовой технологии. Одновременно с бетонированием опытных образцов-призм изготавливались кубы размером 150×150×150 мм для контроля прочности бетона при сжатии и растяжении при раскалывании в день испытаний. Среднее значение кубиковой прочности и прочности на растяжение при раскалывании бетона всех опытных образцов к моменту времени испытания образцов-призм соответственно составили:  $f_{c,cube,m} = 33,1$  МПа и  $f_{ctm} = 1,85$  МПа. Кроме того, после освобождения опытных образцов-призм от отрезков проволочной арматуры проводили их испытание при сжатии и растяжении при раскалывании. Среднее значение призмной прочности бетона образцов составило  $f_{cm} = 22,63$  МПа, начальный модуль упругости бетона  $E_{cm} = 33,8$  ГПа.



а) – высокопрочная проволока S1400 диаметром 5 мм; б) – схема установки проволочной арматуры в опытных образцах-призмах; в) – общий вид опытных образцов-призм при бетонировании

Рисунок 2 – Образцы для испытаний

После достижения бетоном опытных образцов-призм требуемой отпускной прочности в соответствии с типовой серией [9] производили мгновенный отпуск предварительно напряженной проволочной арматуры путем перерезывания ее поперечного сечения с помощью механического алмазного инструмента аналогично плитам безопалубочного формирования при их нарезке на длинном стенде.

В процессе проведения экспериментального исследования вертикальное усилие прижатия  $P_1$  прикладывалось при помощи гидравлического пресса. Выдергивающее усилие  $P_2$  прикладывалось к концу проволоки с цанговым зажимом при помощи гидравлического домкрата с полым штоком и упором в бетон опытного образца-призмы (рисунок 3). При этом датчиками перемещения с ценой деления 0,001 мм измерялись перемещения втягивания свободного конца проволочной арматуры.



Рисунок 3 – Общий вид испытаний на выдергивание проволочной арматуры из бетона опытных образцов-призм

Варьируемым фактором экспериментального исследования являлось  $P_{tr}$ . Интервал варьирования усилия поперечного давления принят от 0 до 300 кН, что соответствует поперечному давлению от 0 до  $0,6 f_{cm}$ , где  $f_{cm}$  – среднее значение призмочной прочности бетона опытных образцов-призм. Для каждого значения усилия поперечного давления было проведено 5 испытаний на выдергивание из бетона отрезков проволочной арматуры (таблица 1). Всего было проведено 30 испытаний.

Таблица 1 – Параметры бетона опытных образцов-призм

№ п.п.	Шифр образцов-призм	$f_{c,cube,m}$ , МПа	$f_{ctm}$ , МПа	$f_{cm}$ , МПа	$E_{cm}$ , ГПа	$P_{tr}$ , кН
1	П-1	33,1	1,85	22,8	33,8	0
2	П-2			23,1		29,9
3	П-3			24,2		111,8
4	П-4			21,9		187,5
5	П-5			21,6		223,4
6	П-6			22,2		298

**Результаты экспериментального исследования**

Разрушение опытных образцов в виде отрезков высокопрочной проволоки, заделанных в бетонную призму, при их выдергивании из бетона происходило без образования трещин раскалывания, независимо от наличия или отсутствия поперечного давления. Следует отметить, что волосные трещины по периметру проволоки со стороны места приложения выдергивающего усилия визуально (при помощи переносного микроскопа) наблюдались на стадии отпуска предварительного напряжения.

По данным силоизмерителя и датчиков перемещений, показывающих соответственно величину выдергивающего усилия и смещение  $S_b$  проволочной арматуры относительно бетона со стороны свободного конца, построены опытные зависимости. При этом выдергивающее усилие приводилось путем деления на площадь контакта проволочной арматуры с бетоном к касательным напряжениям  $\tau_b$  и путем деления на площадь поперечного сечения проволочной арматуры к нормальным напряжениям  $\sigma_p$ .

Максимальные экспериментальные средние (из 5 испытаний) касательные  $\tau_{b(max),m}$  и нормальные  $\sigma_{pu,m}$  напряжения при различном поперечном давлении  $P_{tr}$  (отношение усилия поперечного прижатия  $P_{tr}$  к площади поперечного сечения бетонных образцов-призм) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Поперечное давление  $P_{tr}$ , касательные  $\tau_{b(max),m}$  и нормальные  $\sigma_{pu,m}$  напряжения при выдергивании арматуры из бетона, опытных образцов-призм

№ п.п.	Шифр образца-призмы	$P_{tr}$ , МПа	$\tau_{b(max),m}$ , МПа	$\sigma_{pu,m}$ , МПа
1	П-1	0	9,13	657
2	П-2	1,33	9,44	680
3	П-3	4,97	9,90	713
4	П-4	8,33	10,49	755
5	П-5	9,93	10,9	785
6	П-6	13,24	11,49	827

По опытным характеристикам сцепления в соответствии с рекомендациями [10] по результатам испытаний строили графики зависимости касательных напряжений  $\tau_b$  по контакту проволочной арматуры с бетоном от их взаимного смещения  $S_b$  (опытные данные касательных напряжений и смещения арматуры при одном и том же поперечном давлении принимались равными их средним значениям 5 испытаний) (рисунок 4).

Увеличение касательных напряжений  $\tau_b$  при выдергивании проволочной арматуры из бетона на нисходящей ветви графиков зависимости « $\tau_b - S_b$ » (пунктирная линия) объясняется инерционностью создания выдергивающего усилия с помощью гидравлического домкрата (после значительного смещения арматуры относительно бетона при снижающемся усилии выдергивания происходит падение давления в гидравлическом домкрате и последующее увеличение усилия выдергивания объясняется увеличенным коэффициентом трения покоя по сравнению с коэффициентом трения движения).

**Анализ результатов экспериментального исследования**

Для сопоставления с опытными зависимостями на рисунке 6 были построены графики зависимости « $\tau_b - S_b$ » в соответствии с [11] с учетом коэффициента  $\Omega_{p,tr}$ , учитывающего влияние поперечного давления  $P_{tr}$  при сжатии:

$$\tau_b = \tau_{b,max} \cdot (S_b / S_{b1})^{\alpha_b} \quad \text{при} \quad 0 \leq S_b \leq S_{b1};$$

$$\tau_b = \tau_{b,max} \quad \text{при} \quad S_{b1} \leq S_b \leq S_{b2}; \quad (1)$$

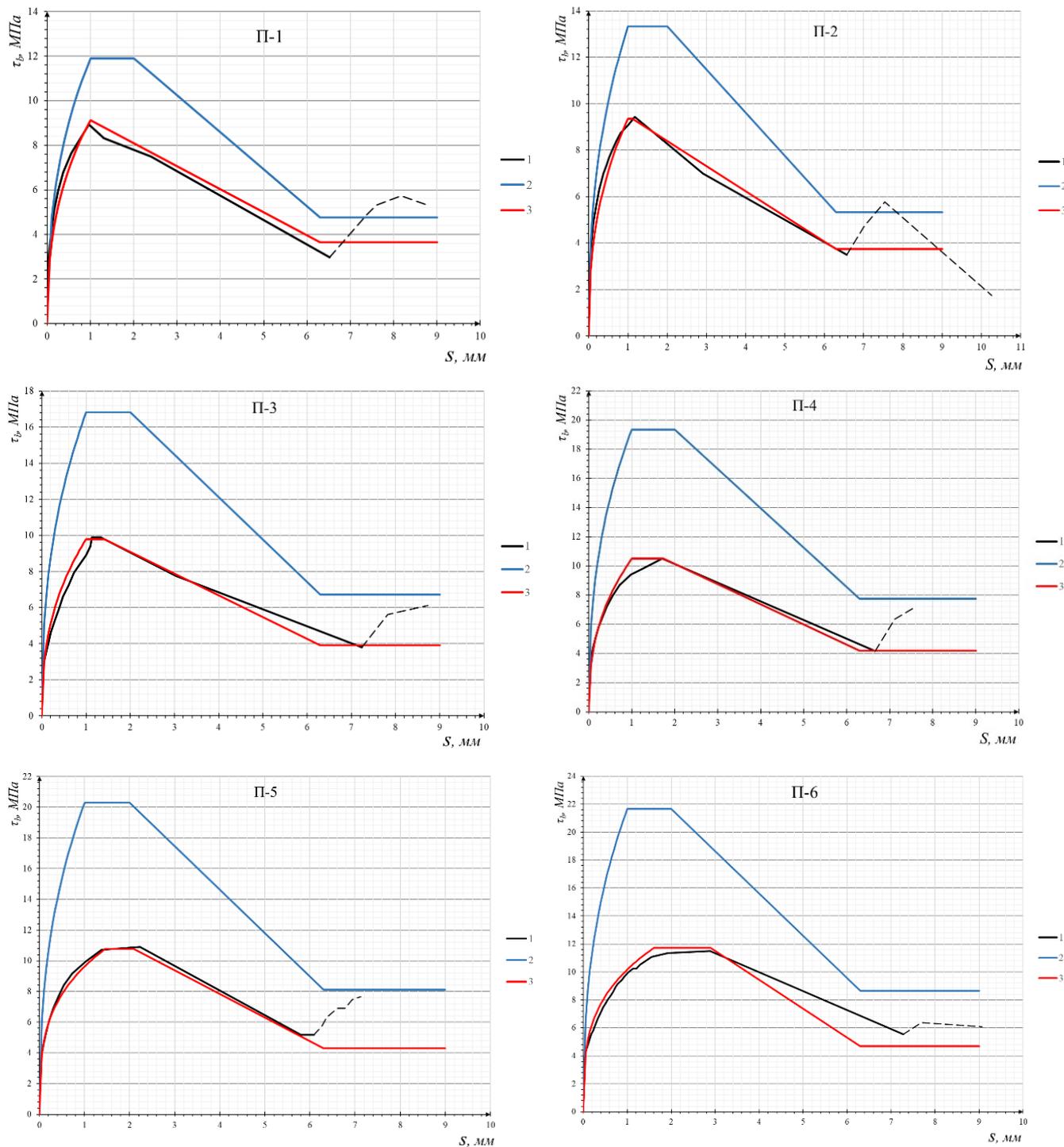
$$\tau_b = \tau_{b,max} - (\tau_{b,max} - \tau_{bf}) \cdot (S_b - S_{b2}) / (S_{b3} - S_{b2})$$

при  $S_{b3} \leq S_b$ ,

где для условий проведенных испытаний  $\tau_{b,max} = 2,5 \cdot \sqrt{f_{cm}}$  ;  
 $s_{b1} = 1 \text{ мм}$  ;  $s_{b2} = 2 \text{ мм}$  ;  $s_{b3} = c_{clear} = 6,3 \text{ мм}$  ;  
 $\alpha_b = 0,4$  ;  $\tau_{bf} = 0,4 \cdot \tau_{b,max}$  ,  

$$\Omega_{p,tr} = 1 - \tanh \left[ 0,2 \cdot \frac{p_{tr}}{0,1 \cdot f_{cm}} \right]. \quad (2)$$

Результаты испытаний опытных образцов в принятом диапазоне варьирования поперечного давления показывают увеличение максимального значения касательных напряжений  $\tau_{b(max)}$ , характеризующих прочность анкеровки предварительно напряженной проволочной арматуры в бетоне, до 12,6 %. При этом коэффициент, учитывающий влияние поперечного давления  $\Omega_{p,tr}$ , согласно зависимости (2), увеличивает расчетные касательные напряжения  $\tau_{b(max)}$  до 82 %.



1 – результаты испытаний; 2 – по [11]; 3 – по предлагаемой зависимости  
 Рисунок 4 – Графики зависимости касательных напряжений  $\tau_b$  от смещения  $S_b$  при различном поперечном давлении

Результаты испытаний показывают влияние величины поперечного давления на деформативность сцепления проволочной предварительно напряженной арматуры с бетоном на начальных этапах нагружения: отсутствие площадки более или менее постоянного сопротивления [10] на графике « $\tau_b - S_b$ » закона сцепления (1) ( $S_{b1} = S_{b2}$ ) при  $p_{tr} \leq 0.37f_{cm}$  и с ростом  $p_{tr}$  увеличение  $S_{b1}$  с 1 мм до 1,7 мм. При  $p_{tr} > 0.37f_{cm}$  с увеличением  $p_{tr}$  возрастает значение  $S_{b2}$  и длина площадки более или менее постоянного сопротивления сдвигу, значение  $S_{b1}$  практически не изменяется.

Согласно экспериментально-теоретическому исследованию [12], зависимость, учитывающая влияние поперечного давления  $p_{tr}$  на касательные напряжения сцепления  $\tau_b$  арматуры с бетоном, имеет вид:

$$\Omega_{p,tr} = 1 + 0,27e^{-13,8 \cdot \left(0,68 \frac{p_{tr}}{f_{cm}} - 0,46\right)^2} \quad (3)$$

Сопоставление результатов испытаний опытных образцов в виде выдергивания предварительно напряженной проволочной арматуры из бетонных призм при действии поперечного давления в исследуемом интервале с эмпирическими зависимостями (1) и (3) показывает их удовлетворительную сходимость с зависимостью (3), хотя обе зависимости получены для сцепления стержневой арматуры периодического профиля с ребрами с окружающим бетоном.

Зависимости (1) и (3) и результаты испытаний опытных образцов приведены на рисунке 5.

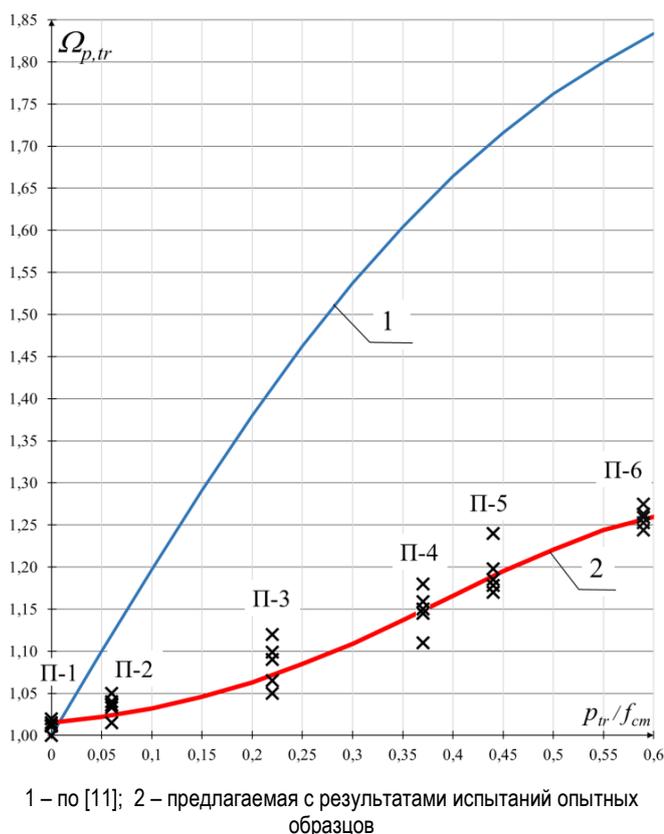


Рисунок 5 – Зависимости  $\Omega_{p,tr}$  от  $p_{tr}/f_{cm}$

В результате обработки экспериментальных данных 30 испытаний на выдергивание предварительно напряженной проволочной арматуры из бетона в исследуемом интервале поперечного давле-

ния при сжатии ( $p_{tr} \leq 0$ ) и принятых характеристиках бетона и арматуры получены следующие параметры диаграммы « $\tau_b - S_b$ », описываемой зависимостями (1):

$$\tau_{b,max} = 1,92 \cdot \sqrt{f_{cm}}; \alpha_b = 0,4; S_{b1} = S_{b2} = 1 \text{ мм}$$

при  $p_{tr} = 0$ ;

$$\tau_{b,max} = \Omega_{p,tr} \cdot 1,92 \cdot \sqrt{f_{cm}}; \alpha_b = 0,4; S_{b1} = 1 \text{ мм};$$

$$S_{b2} = 1 - 2 \cdot \left| p_{tr} / f_{cm} \right| \text{ при } 0 < \left| p_{tr} / f_{cm} \right| \leq 0,37;$$

$$\tau_{b,max} = \Omega_{p,tr} \cdot 1,7 \cdot \sqrt{f_{cm}}; \alpha_b = 0,3;$$

$$S_{b1} = 1 + \left| p_{tr} / f_{cm} \right|;$$

$$S_{b2} = 1,7 + 5,5 \cdot \left( \left| p_{tr} / f_{cm} \right| - 0,37 \right)$$

при  $0,37 < \left| p_{tr} / f_{cm} \right| \leq 0,59$ ;

$$S_{b3} = c_{clear} = 6,3 \text{ мм}; \tau_{bf} = 0,4 \cdot \tau_{b,max}.$$

Коэффициент  $\Omega_{p,tr}$ , учитывающий влияние поперечного давления  $p_{tr}$  на касательные напряжения сцепления  $\tau_b$  арматуры с бетоном согласно результатам экспериментальных данных следует принимать по зависимости (3).

Опытные и расчетные (по [11] и предлагаемые) зависимости касательных напряжений сцепления  $\tau_b$  при сдвиге  $S_b$  предварительно напряженной проволочной арматуры в бетоне при ее выдергивании с различным поперечным давлением сжатия  $p_{tr}$  представлены на рисунке 4.

### Заключение

В результате проведенного экспериментального исследования влияния поперечного давления при сжатии на прочность и деформативность анкеровки предварительно напряженной проволочной арматуры в бетоне предложены зависимости « $\tau_b - S_b$ », которые могут быть использованы в качестве закона сцепления проволочной предварительно напряженной арматуры с бетоном для условий эксперимента при расчете железобетонных многослойных плит безопалубочного формирования в составе платформенных стыков.

### Список цитируемых источников

1. Tan, K. H. Designing Hollow-Core Slabs for Continuity / K. H. Tan, L. X. Zheng, P. Paramasivam // PCI Journal. – 1996. – January–February. – P. 82–91.
2. Симонов, М. В. Сборный железобетонный настил «Симкар» / М. В. Симонов // Бюл. строительной техники. – 1949. – № 17.
3. Проектирование и расчет многоэтажных гражданских зданий и их элементов / П. Ф. Дроздов [и др.]. – М.: Стройиздат, 1986. – 351 с.
4. Маклакова, Т. Г. Конструирование крупнопанельных зданий / Т. Г. Маклакова. – М.: Стройиздат, 1975. – 159 с.
5. Пособие по проектированию жилых зданий. Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85) / под ред. Э. И. Федотова. – М.: Стройиздат, 1989. – Вып. 3. – 304 с.
6. Рекомендации по расчету и конструированию индустриальных конструкций первых нежилых этажей крупнопанельных жилых зданий. – М.: ЦНИИЭП жилища, 1990. – 90 с.
7. Указания по проектированию конструкций крупнопанельных жилых домов: СН-321-65 / под ред. Е. Н. Рудковского. – М.: Госстройиздат, 1966. – 161 с.

8. Инструкция по проектированию конструкций панельных жилых зданий : ВСН 32-77. – М. : Стройиздат, 1978. – 180 с.
9. Плиты железобетонные многопустотные предварительно напряженные безопалубочного формования на оборудовании «Вибропресс» (Россия) для перекрытий и покрытий жилых, общественных и производственных зданий : Серия Б1.041.1-5.10 / Ин-т НИПТИС им. С. С. Атаева.
10. Холмянский, М. М. Контакт арматуры с бетоном / М. М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1981. – 184 с.
11. Fib Model Code for Concrete Structures 2010. – Germany. – 402 p.
12. Лазовский, Д. Н. Влияние поперечного обжатия на прочность анкеровки арматуры / Д. Н. Лазовский, К. К. Голубев, Г. Н. Сераков // Бетон и железобетон. – 1998. – № 1. – С. 15–17.
5. Posobie po proektirovaniyu zhilyh zdaniy. Konstrukcii zhilyh zdaniy (k SNIp 2.08.01-85) / pod red. E. I. Fedotova. – M. : Strojizdat, 1989. – Vyp. 3. – 304 s.
6. Rekomendacii po raschetu i konstruirovaniyu industrial'nyh konstrukcij pervyh nezhilyh etazhej krupnpanel'nyh zhilyh zdaniy. – M. : CNIIEP zhilishcha, 1990. – 90 s.
7. Ukazaniya po proektirovaniyu konstrukcij krupnpanel'nyh zhilyh domov : SN-321-65 / pod red. E. N. Rudkovskogo. – M. : Gosstrojizdat, 1966. – 161 s.
8. Instrukciya po proektirovaniyu konstrukcij panel'nyh zhilyh zdaniy : VSN 32-77. – M. : Strojizdat, 1978. – 180 s.
9. Plity zhelezobetonnye mnogopustotnye predvaritel'no napryazhennye bezopalubochного formovaniya na oborudovanii «Vibropress» (Rossiya) dlya perekrytij i pokrytij zhilyh, obshchestvennyh i proizvodstvennyh zdaniy : Seriya B1.041.1-5.10 / In-t NIPTIS im. S. S. Ataeva.
10. Holmyanskij, M. M. Kontakt armatury s betonom / M. M. Holmyanskij. – M. : Strojizdat, 1981. – 184 s.
11. Fib Model Code for Concrete Structures 2010. – Germany. – 402 p.
12. Lazovskij, D. N. Vliyanie poperechnogo obzhatiya na prochnost' ankerovki armatury / D. N. Lazovskij, K. K. Golubev, G. N. Seryakov // Beton i zhelezobeton. – 1998. – № 1. – S. 15–17.

#### References

1. Tan, K. H. Designing Hollow-Core Slabs for Continuity / K. H. Tan, L. X. Zheng, P. Paramasivam // PCI Journal. – 1996. – January–February. – P. 82–91.
2. Simonov, M. V. Sbornyj zhelezobetonnyj nastil «Simkar» / M. V. Simonov // Byul. stroitel'noj tekhniki. – 1949. – № 17.
3. Proektirovanie i raschet mnogoetazhnyh grazhdanskih zdaniy i ih elementov / P. F. Drozdov [i dr.]. – M. : Strojizdat, 1986. – 351 s.
4. Maklakova, T. G. Konstruirovaniye krupnpanel'nyh zdaniy / T. G. Maklakova. – M. : Strojizdat, 1975. – 159 s.

*Материал поступил 26.03.2024, одобрен 27.03.2024, принят к публикации 27.03.2024*

УДК 624.012

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

**А. Е. Желткович<sup>1</sup>, В. В. Молош<sup>2</sup>, К. Г. Пархоц<sup>3</sup>, Н. Г. Совеико<sup>4</sup>, Хуан Цзыен<sup>5</sup>, Рен Юхан<sup>6</sup>, Цзинь Хаотянь<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> К. т. н., доцент, доцент кафедры прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gelpek@mail.ru

<sup>2</sup> К. т. н., доцент, доцент кафедры прикладной механики, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: m.vic@rambler.ru

<sup>3</sup> Инженер-программист, Беларусь, e-mail: konstantinparhoc@gmail.com

<sup>4</sup> Инженер-программист, Беларусь, e-mail: nick-2009@live.ru

<sup>5</sup> Студент магистратуры, УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: cn449766175@gmail.com

<sup>6</sup> Студент магистратуры, УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: reny23312@gmail.com

<sup>7</sup> Студент магистратуры, УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: haotian5052@gmail.com

### Реферат

В статье проиллюстрирована возможность определения прочности бетона, используя стандартный протокол фиксации и воспроизведения акустического сигнала, используемый в подавляющем большинстве обычных портативных устройств, например телефонов системы Android (и др.). Разработана сверточная нейросеть, способная воспринимать звуковые сигналы (от механических ударов по бетону молотком), предварительно трансформированные в изображения-спектрограммы. Эти спектрограммы сопоставляются с показаниями прочности, установленными любым из стандартных методов. В перспективе данный подход может стать наиболее надежным и простым методом контроля прочности в полевых условиях, для этого достаточно иметь обычный телефон и молоток. Более того, данный метод может быть подстроен под множество других задач, где физико-механические свойства материала тем или иным образом связаны с акустическими свойствами упругопластического тела. Описывается процесс разработки и обучения нейросети, выполнена статистическая оценка качества полученных результатов.

**Ключевые слова:** акустический сигнал, сверточная нейросеть, неразрушающий контроль, прочность бетона.

## APPLICATION OF NEURAL NETWORK ALGORITHMS IN THE DEVELOPMENT OF ACOUSTIC METHODS OF CONCRETE STRENGTH CONTROL

**A. Zheltkovich, V. Molosh, K. Parchotz, N. Soveiko, Huang Zien, Ren Yuhang, Jin Haotian**

### Abstract

The paper illustrates the possibility of determining the strength of concrete using the standard protocol of acoustic signal recording and reproduction used in the vast majority of conventional portable devices, such as Android phones (and others). We developed a convolutional neural network capable of perceiving sound signals (from mechanical impacts on concrete with a hammer) pre-transformed into image-spectrograms. These spectrograms are compared to strength value established by any of the standard methods. In the long run, this approach may be the most reliable and simple method of strength monitoring in the field, requiring only a simple phone and a hammer. Moreover, this method can be adapted to many other problems where the physical and mechanical properties of a material are in some way related to the acoustic properties of an elasto-plastic body. The process of development and training of the neural network is described, and statistical evaluation of the quality of the obtained results is performed.

**Keywords:** acoustic signal, convolutional neural network, nondestructive testing, concrete strength.

### 1 Введение

Вклад работы, представленной в данной статье, включает в себя: 1) набор соответствующих акустических данных, полученных с помощью динамиков от портативного устройства (Samsung Galaxy A8, с ОС Android), и значения прочности на сжатие полученные с использованием прибора «Оникс»; 2) новый подход, использующий стохастический алгоритм оптимизации, для сверточной нейросети, способной, по мнению авторов, надежно определять прочность бетона широкого спектра конструкций.

Методы неразрушающего контроля прочности (МНК) могут быть использованы в ситуациях, где компромисс между скоростью оценки и точностью находится в пользу скорости, а не первоклассной точности. В частности, разрабатываемая модель может быть использована в приложениях, где необходима быстрая оценка, а точность высшего уровня не является критичной, например, в операциях по ликвидации последствий стихийных бедствий, в процессе возведения зданий, на приусадебных территориях, в частном секторе, где любой человек (не специалист) на этапе строительства сможет контролировать прочность бетона конструкций в режиме онлайн, в процессе возведения здания. Другой важной областью применения МНК могут быть регионы, подверженные стихийными бедствиями, такими как

землетрясения, наводнения. После стихийного бедствия одной из самых срочных и дорогостоящих задач является оценка состояния зданий на предмет безопасности. Таким образом, применение МНК может исключить использование разрушающих испытаний для оценки прочности бетона и значительно сократить стоимость и продолжительность операций [1]. Ярким примером, демонстрирующим важность использования машинного обучения для улучшения процедур оценки конструкций, может служить оценка сооружений после стихийных бедствий. После стихийного бедствия, одной из самых срочных и дорогостоящих задач является обеспечение жильем выживших. Логистику и стоимость краткосрочных убежищ бывает сложно организовать, в то время как это может быть приоритетной задачей, особенно в суровых климатических условиях. Известны случаи, когда выжившие укрывались в зданиях, а затем трагически погибли, когда те, будучи критически поврежденными, рушились во время незначительных афтершоков [1].

Предположим, что процедура оценки, использующая разработанную модель для оценки бетонных конструкций, может быть стандартизирована. В этом случае она может стать быстрым и экономичным решением, которое позволит сократить потребность в краткосрочных убежищах и предотвратить гибель людей во время афтершоков.

## 2 Обзор литературы. Контроль прочности бетона с помощью НМК и искусственных нейронных сетей

В процессе исследования были собраны и систематизированы разнообразнейшие сведения об неразрушающих методах контроля прочности бетонов.

Существует целый комплекс НМК для оценки прочности бетона на объектах строительства. Однако «использование этих методов не всегда являются надежным, поскольку получаемые данные существенно зависят от условий окружающей среды и не свободны от человеческих ошибок» [1]. «В ряде случаев НМК используются совместно с разрушающими методами испытаний, поскольку на результаты большинства отдельных методов неразрушающего контроля могут влиять условия окружающей среды и процедуры испытаний» [2]. Поэтому для повышения точности оценки прочности бетона рекомендуется использовать комбинацию разрушающих и неразрушающих методов. «Однако процедуры использования разрушающих методов испытаний обычно дорогостоящие, требуют много времени и требуют применения тяжелого оборудования. Кроме того, эти методы разрушающих испытаний зависят от интерпретации данных опытным персоналом» [1]. В литературе ведется поиск процедур оценки, которые могли бы исключить или сократить использование разрушающих испытаний.

Существует множество неразрушающих методов для оценки прочности: зонд Виндзора, инфракрасная томография и радиографические испытания, испытание ультразвуковым импульсом [3, 4, 5, 6], метод выдергивания (где определялось усилие  $N$  выдергивания стального анкера, предварительно заделанного в бетон) [7, 8, 9, 10, 11, 12], склерометрический метод [13], где определяется число отражения (для склерометра Шмидта типа  $N$ ) или диаметр отпечатка (для склерометра –  $HPS$ ). Склерометра Шмидта типа  $N$ , также известен как тестовый молоток для бетона (Rebound Hammer Test). В работах [14, 15] описывается неразрушающий метод контроля прочности с использованием тестового молотка для бетона, где данные обрабатывались с помощью искусственных нейронных сетей.

В статьях [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29] обсуждается применение сразу множества нейросетевых алгоритмов для определения прочности бетона на сжатие на основе неразрушающих испытаний. Так, в [16] при оценке прочности бетона на сжатие были использованы для сравнения пять нейросетей: сеть с импульсом и алгоритмом градиента спуска (WPB-GDM), сеть с алгоритмом градиентного спуска и адаптивным шагом (WPB-GDX), сеть с алгоритмом сопряженного градиента (WPB-CGB), сеть Левенберга-Марквардта (LM), однонаправленная радиальная сеть (RFB).

В ходе исследования [16] были установлены низкие значения RMSE обучения и тестирования, а также разница между ошибками (DRMSE) в зависимости от количества эпох. Получены низкие значения относительной ошибки тестирования, низкие значения относительного среднеквадратичного отклонения ошибки и высокие значения коэффициента корреляции  $R$ . Показано, что средние значения прочности на сжатие бетона, заложенного в конструктивные элементы зданий, определенные с помощью искусственных нейронных сетей и разрушающих испытаний при практической натурной проверке, очень близки. В работе отмечается, что средние относительные ошибки (RE) являлись самыми низкими для прочности, определенной с помощью нейронной сети LM.

Анализируя накопленный опыт, отметим, что лишь несколько из перечисленных исследований [3, 4, 5, 20] посвящены использованию акустических сигналов (в частности ультразвука) в качестве источника данных неразрушающего контроля и нейросетевому способу обработки данных.

Методы машинного обучения (МО), такие как искусственные нейронные сети (ИНС), продемонстрировали потенциал для улучше-

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left( \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - i \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right), \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (1)$$

где  $N$  – количество отсчетов (компонент разложения), измеренных за период измерения;

$x_n$ ,  $n = 0, \dots, N-1$ , – измеренные значения сигнала (в дискретных временных точках с номерами ( $n = 0, \dots, N-1$ ), которые являются входными данными для прямого преобразования;

$X_k$ ,  $k = 0, \dots, N-1$  – выходные данные для прямого преобразования (поскольку амплитуды комплексные, то по ним можно вычислить одновременно и амплитуду, и фазу);

ния прогнозирования прочности бетона на основе данных неразрушающего контроля, особенно в последнее десятилетие [30, 31].

Преимущество моделей ИНС заключается в обнаружении нелинейных связей между входами и выходами без необходимости предполагать какие-либо функциональные зависимости между ними. Основным же недостатком является поиск оптимальных гиперпараметров (весовых коэффициентов) для достижения наилучшей точности без знания точного физического закона, так называемая проблема «чёрного ящика».

Важнейшими аспектами нейросетевых моделей прогнозирования являются их точность, скорость, экономичность, систематическая погрешность и применимость к различным типам бетона [1].

Вместе с тем авторы не нашли в литературе исследований по прогнозированию прочности бетона с помощью обычных акустических сигналов (также хорошо отражающих резонансные свойства бетона) с одновременной обработкой сигнала свёрточной нейронной сетью (СНС – наиболее мощный на сегодняшний день инструмент, в т. ч. способный обрабатывать визуальные данные). Возможно СНС не была задействована для акустических данных по причине того, что адаптирована преимущественно для работы с визуальными объектами.

Если трансформировать звук в изображение (спектрограмму) и использовать уже такой формат данных для обучения СНС, это, по мнению авторов данной статьи, может стать наиболее надежным и простым НМК в применении к различным полевым условиям.

## 3 Методология формирования базы данных испытаний прочности

Для обучения свёрточной нейросети была создана выборка из 100 различных звуковых файлов в процессе испытания прочности бетона путём непосредственного простукивания поверхности бойком склерометра «Оникс» и синхронной записи сигнала (аудио) на микрофон телефона. Был задействован стандартный протокол – Simple Protocol Player. Медиаплеер, который даёт возможность пользователям воспроизводить звуки, передаваемые модулем простого протокола PulseAudio и прослушивать потоковое аудио на платформах Android и Windows. При записи файлы сохранялись в формате Apple Lossless [m4a]. Затем файлы были переведены в [wav] формат. WAV (Waveform audio format), [wave] формат записи звука без сжатия. Так, в нашем случае три секунды стереозвуча, сделанные с CD-качеством (частота дискретизации 44,1 КГц), содержат 3 x 44100 [Гц] x 2 канала = 264600 отсчетов. На каждый отсчет может приходиться 8 или 16 бит. В нашем варианте было задействовано 16-битное кодирование отсчетов. Файлы в среднем имели 2–4 секундные длительности (чего, по нашему мнению, вполне достаточно с учётом задержки времени на включение и выключение звукозаписи после удара молотком о поверхность бетона).

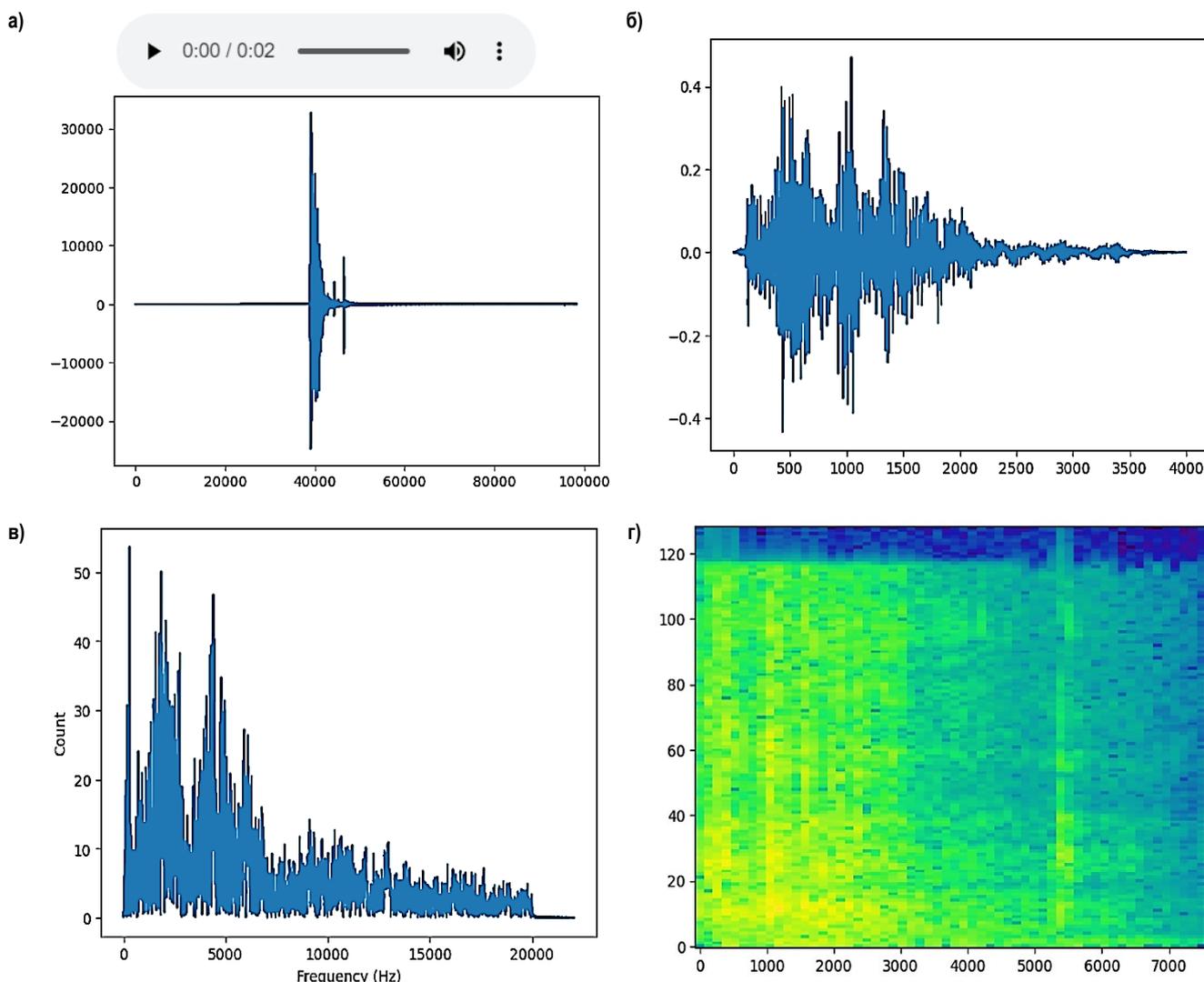
Полученные звуковые файлы имели достаточно длительные «пустые» области (рисунок 1а) слева и справа. В процессе подготовки эти области отфильтровывались. Нами была определена «рабочая» длительность файлов – 4000 отсчетов, как показано на рисунке 1б. Так, при пересчёте физической длительности сигнала, требующего для кодирования 4000 отсчетов (при частоте – 44100 Гц), занимает примерно 0.09 секунд. В действительности это больше, чем измеряемая в миллисекундах длительность удара молотком, представляющая интерес для анализа.

Для наглядной демонстрации звукового диапазона, в котором сосредоточена максимальная энергия звука, дискретную частоту представляют в физических (аналоговых) значениях частот через преобразование Фурье [32]. Частота сигнала через прямое преобразование определяется следующим образом (рисунок 1в):

$x = \frac{|X_k|}{N}$  – обычная (вещественная) амплитуда  $k$ -го синусоидального сигнала;

$\arg(X_k)$  – фаза  $k$ -го синусоидального сигнала (аргумент комплексного числа);

$k$  – индекс частоты. Частота  $k$ -го сигнала равна  $\frac{k}{T}$ , где  $T$  – период амплитуд синусоидальных сигналов, слагающих исходный сигнал.



а) дискретный 2-ух секундный саундтрек, записанный при помощи микрофона; б) исходный файл с удалением «пустых» зон; в) преобразование в аналоговый вид с использованием рядов Фурье; г) цветная спектрограмма саундтрека

**Рисунок 1** – Диаграммы преобразования акустических сигналов

После соответствующей обработки частотные файлы преобразовывались в спектрограммы (рисунок 1г), которые и служили входными параметрами СНС. Выходными данными служили значения, полученные при помощи склерометра «Оникс» (данные которого записывались в формате [.csv]).

Все данные загружались в облачное хранилище Google Drive для совместного использования с целью дозагрузки данных и дообучения нейросети.

#### 4 Архитектурные особенности и обучение нейросетевой модели

Подход, который использует вычислительные модели, имитирующие архитектурные, структурные или функциональные аспекты биологических нейронных сетей, таких как человеческий мозг, известны с середины XX века.

Искусственные нейронные сети (ИНС или НС) – алгоритмические математические модели, имитирующие поведенческие характеристики нервных сетей животных и выполняющие распределённую, параллельную обработку информации. Эти сети полагаются на особую систему обработки информации путем корректировки взаимосвязей между большим количеством внутренних узлов. НС, состоящая из нескольких слоёв связанных нейронов, называется глубокой [33].

Свёрточная нейронная сеть объединяет три подхода в обработке изображений. Это использование локального рецептивного поля для каждого нейрона свёрточного слоя, формирование свёрточных

слоев как набора карт, нейронные элементы которых имеют одинаковые синаптические связи и наличие карт слоев с поддискретизацией, что повышает устойчивость сети к искажениям [35, 36, 37, 38].

Одной из причин высокой производительности СНС, по мнению авторов [35], является использование одинаковых нейронов в каждой карте, что позволяет уменьшить количество настраиваемых синаптических связей сети.

При обучении нейросети использовалась среднеквадратическая (MSE – согласно норме, L2). Функция потерь (losses) используется для оценки разрыва между истинным результатом (целью) и предсказанием, формируемым нейронной сетью. Таким образом, процесс обучения нейронной сети становится задачей оптимизации, целью которой является минимизация потерь. Функция потерь определяется

$$E = \frac{1}{n} \sum (Y_{target} - Y_{predicted})^2, \quad (2)$$

где  $n$  – количество выборок,  $Y_{target}$  – исходные данные,

$Y_{predicted}$  – предсказанные величины прочности.

Основная задача данного исследования – проверка способности модели (нейросети), обученной на ограниченной выборке данных определять прочность бетона с приемлемой точностью. Бетон, используемый в зданиях в любой городской среде, имеет широкий

диапазон составов и разный возраст. Используя ИНС, авторами было решено уйти от классических метаэвристических алгоритмов, которые решают задачу оптимизации методом проб и ошибок [39] (метаэвристические методы, вообще говоря, не гарантируют, что будет найдено решение задачи оптимизации). По причине предполагаемых экспериментальных случайных ошибок и наличия "шума" в измерениях (мы имели дело с весьма широким разбросом амплитуд и частот, а также длительностью воспроизведения файлов), было решено задействовать СНС с применением стохастического алгоритма оптимизации [35]. Методы этого класса включают стохастическую аппроксимацию (SA), подход Роббинса и Монро, метод стохастического градиентного спуска и другие. В данном исследовании в качестве оптимизатора был использован метод стохастической оптимизации "Adam". Adam [40] – это градиентный алгоритм первого порядка для стохастических целевых функций, основанный на адаптивных оценках моментов нижнего порядка [41].

Целью параметрической оптимизации является нахождение минимального значения функции потерь  $E$ . На каждой итерации алгоритм обновляет весовые параметры  $\omega$ .

$$\omega_{n+1} = \omega_n - \frac{\alpha}{\sqrt{\tilde{v}_n} + \varepsilon} \cdot \tilde{m}_n, \quad (3)$$

где  $\alpha = 0,001$  – параметр скорости обучения,  $g_t^2$  – обозначает поэлементный квадрат  $g \odot g$ ,  $\beta_1 = 0.9$ ,  $\beta_2 = 0.999$  и  $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-7}$ . Все операции над векторами являются поэлементными. С  $\beta_1^t$  and  $\beta_2^t$  обозначаются  $\beta_1$  и  $\beta_2$  с точностью до  $t$  ( $t = 0$  при первой инициализации). 1-й моментный вектор при первой инициализации:  $m_0 = 0$ , 2-й моментный вектор при первой инициализации:  $v_0 = 0$ ,  $\omega_0$  – вектор начальных параметров, инициализируемый генератором случайных чисел. Веса обновляются до тех пор, пока текущее и предыдущее значения не сойдутся.

В нашем исследовании был применён алгоритм [41]:

$$1) \quad t \leftarrow t + 1;$$

2)  $g_t \leftarrow \nabla_w f_t(w_{t-1})$  – градиент стохастического движения к цели на шаге  $t$ , т. е. вектор частных производных от  $f_t$ , по отношению к  $(w)$ , оцененный на шаге  $t$ ;

3)  $m_t \leftarrow \beta_1 \cdot m_{t-1} + (1 - \beta_1)g_t$  – обновление смещенной оценки первого момента;

4)  $v_t \leftarrow \beta_2 \cdot v_{t-1} + (1 - \beta_2)g_t^2$  – обновление смещенной оценки момента второго ряда;

5)  $\tilde{m}_t \leftarrow m_t / (1 - \beta_1^t)$  – оценка момента первого порядка с поправкой на смещение;

6)  $\tilde{v}_t \leftarrow v_t / (1 - \beta_2^t)$  – оценка момента второго порядка с поправкой на смещение;

7)  $\omega_t = \omega_{t-1} - \alpha \cdot \tilde{m}_t / (\sqrt{\tilde{v}_t} + \varepsilon)$  – обновление весовых параметров, где  $f(w)$  – зашумленная объективная функция: стохастическая скалярная функция, дифференцируемая по параметрам  $\omega$ .

Таким образом, мы обучили свёрточную нейросеть, которая может прогнозировать прочность бетона на основе данных акустических сигналов, получаемых стандартными микрофонами портативных гаджетов для широкого диапазона типов бетона. Схема разработанной в ходе исследования СНС представлена на рисунке 2.

Следующим шагом являлось обучение нейросети. Все этапы создания НС, обучения и проверки реализованы на программном языке Python в рамках среды Tensorflow [42]. Количество эпох устанавливалось равным 30. В процессе регуляризации случайным образом отобранные 70 % исходных данных назначались в качестве тренировочной выборки (training dataset) и 30 % данных было оставлено для проверки (validation) качества работы модели. Поскольку разработанная нейронная сеть представляет собой свёрточную сеть с большим количеством слоев, нами принято решение уменьшить количество эпох до 30 и обучать СНС в режиме удаленного доступа в среде Google Colab. Для этого был использован серверный ускоритель Python 3 на базе Google Compute Engine. Таким образом, время прохождения 30 эпох составило около 170 секунд (что на компьютере без дискретной видеокарты могло занять от получаса и более). Функция минимизации ошибок при обучении представлена на рисунке 4а.

Все данные, подаваемые на вход и выход свёрточной нейронной сети, были нормализованы с помощью пакетной нормализации (batch-normalization). Batch-normalization – метод, который позволяет повысить производительность и стабилизировать работу искусственных нейронных сетей [43, 44]. Суть данного метода заключается в том, что некоторым образом нейронной сети на вход подаются данные, предварительно обработанные и имеющие нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию [44].

### 5 Результаты определения прочности бетона

На рисунке 3 представлены результаты, полученные по Ониксу» и определённые при помощи нейросети.

### 6 Оценка достоверности модели

Оценку достоверности значений прочности бетона, предсказанных с применением нейронной сети  $f_c$ , выполняли сравнением с полученными неразрушающим методом контроля для готовых железобетонных конструкций тестовыми значениями прочности  $f_e$ . Сравнение было выполнено как для фактических значений прочности, так и для отношений  $f_c/f_e$ . Для оценки отношений  $f_c/f_e$  использовали минимальное значение  $[(f_c/f_e)_{\min}]$ , среднее значение  $[(f_c/f_e)_{\text{avg}}]$ , максимальное значение  $[(f_c/f_e)_{\max}]$  и коэффициент вариации  $[CV(f_c/f_e)]$ . Оценку фактических значений выполняли, анализируя величину средней абсолютной ошибки (MAE), квадратный корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE), коэффициента корреляции ( $r$ ), коэффициента детерминации ( $R^2$ ), а также использовали процедуру, приведенную в приложении Д ТКП EN 1990 [45] для оценки поправочного коэффициента  $b$  среднего отклонения  $f_e$  и  $f_c$ , абсолютного значения средней ошибки модели  $\Delta$  (по вектору ошибок  $\delta$ ) и коэффициент вариации  $V_\delta$  вектора ошибок  $\delta$  (таблица 1).

Величины средней абсолютной ошибки (MAE), квадратного корня из среднеквадратичной ошибки (RMSE) и коэффициента детерминации ( $R^2$ ) определяли по выражениям:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (f_c^{(i)} - f_e^{(i)})^2}, \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |f_c^{(i)} - f_e^{(i)}|, \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (f_c^{(i)} - f_e^{(i)})^2}{\sum_{i=1}^m \left( f_e^{(i)} - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_e^{(i)} \right)^2}. \quad (6)$$

Распределение значений прочности бетона, предсказанных с применением нейронной сети  $f_c$  и полученных неразрушающим методом контроля  $f_e$ , приведено на рисунке 4б, а величина оценочных статистических параметров – в таблице 1.

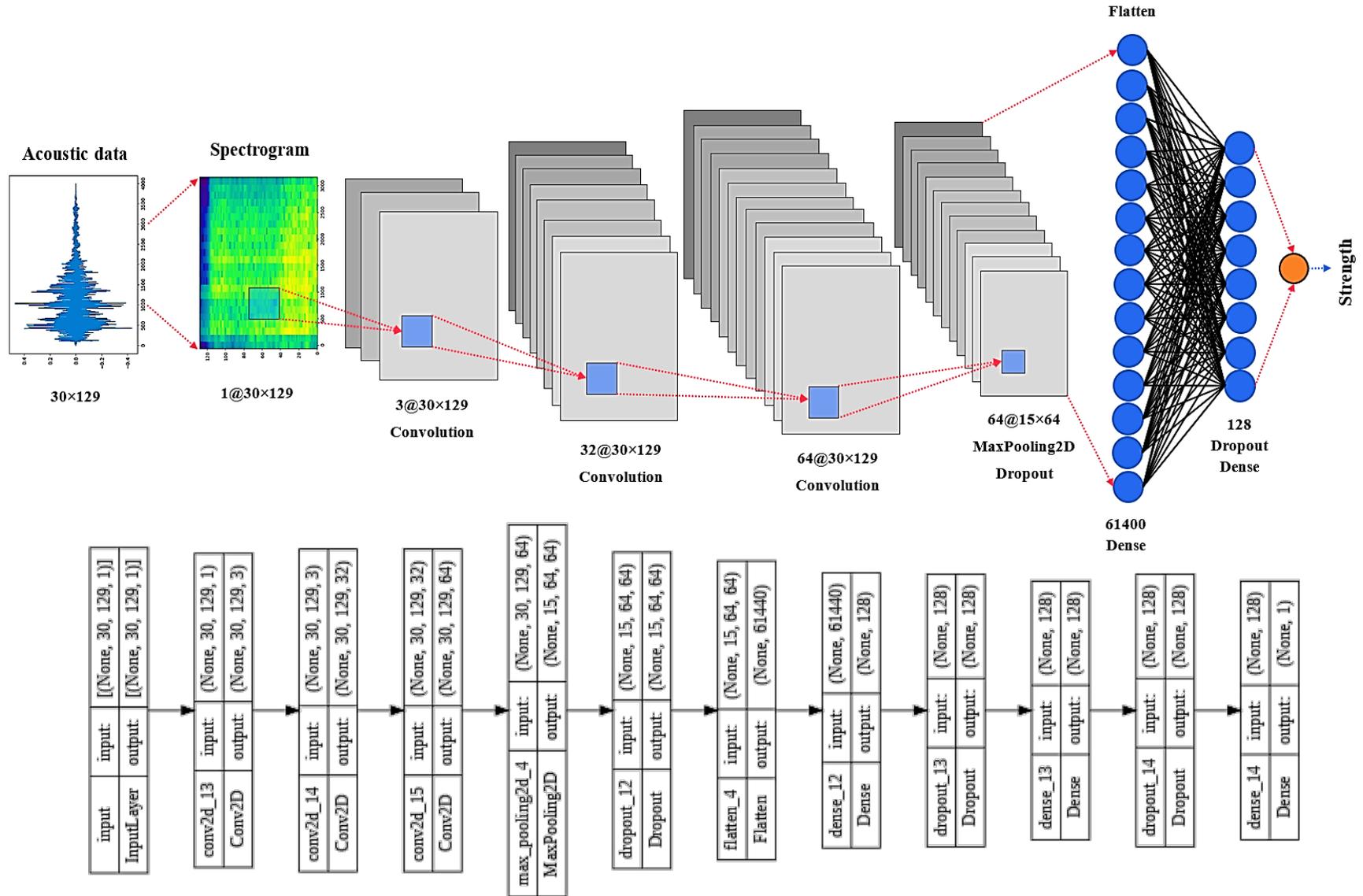
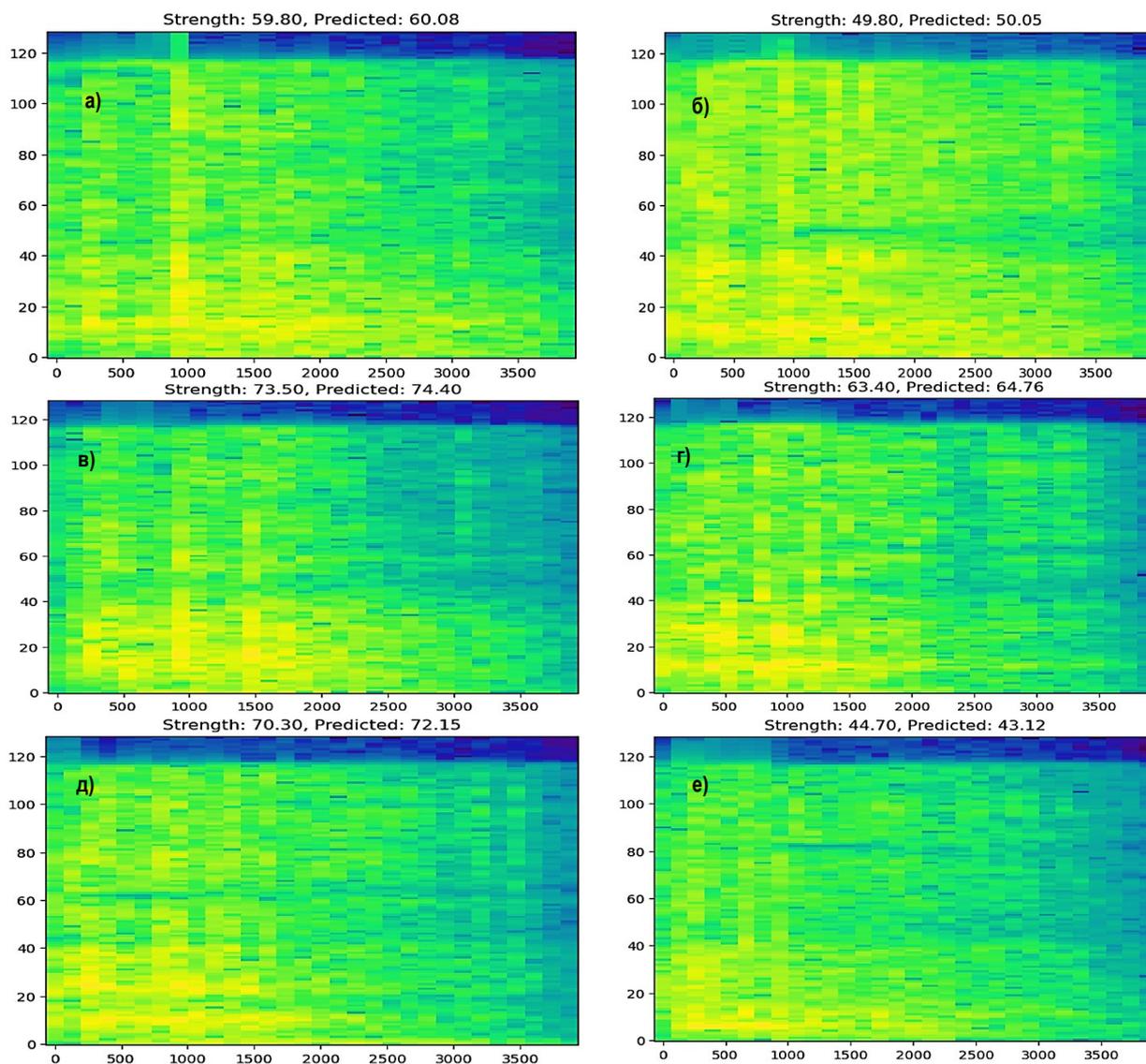
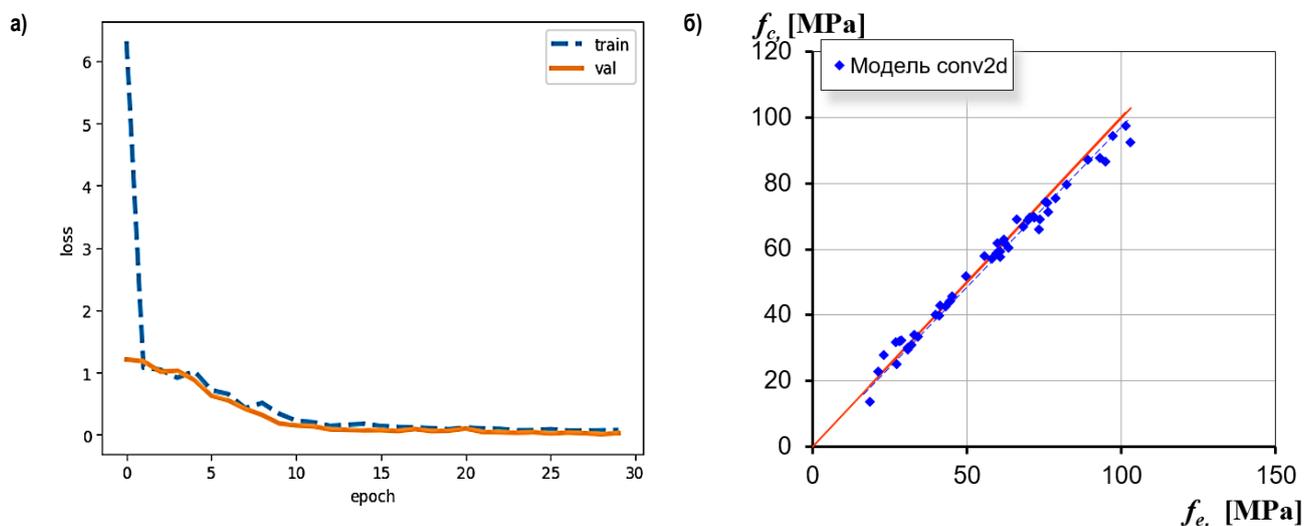


Рисунок 2 – Принципиальная схема CNN



а) действительная – 59,8 МПа, предсказанная – 60,08 МПа; б) действительная – 49,8 МПа, предсказанная – 50,05 МПа;  
 в) действительная – 73,5 МПа, предсказанная – 74,4 МПа; г) действительная – 63,4 МПа, предсказанная – 64,76 МПа;  
 д) действительная – 70,3 МПа, предсказанная – 72,15 МПа; е) действительная – 44,7 МПа, предсказанная – 43,12 МПа  
**Рисунок 3** – Прочности по «Ониксу» и определённые при помощи нейросети при анализе спектрограмм звуковых файлов



**Рисунок 4** – а) функция минимизации ошибок при обучении СНС, б) распределение значений прочности бетона предсказанных с применением СНС –  $f_c$  и полученных неразрушающим методом контроля –  $f_e$

Из рисунка 4б видно, что полученные с применением нейронной сети (модель *conv2d*) значения прочности бетона  $f_c$  имеют хорошее совпадение с тестовыми значениями  $f_e$  во всём диапазоне тестовых величин прочности. Данные, которые лежат вдоль тестовой прямой, а их глобальное среднее значение отклоняется в пределах 1–2 % в сторону запаса прочности.

Таблица 1 – Статистические параметры сравнения  $f_c$  и  $f_e$ 

$(f_c/f_e)_{\min}$	$(f_c/f_e)_{\text{mid}}$	$(f_c/f_e)_{\max}$	$(f_c/f_e)_R$	$CV(f_c/f_e)$	$MAE$
0,733	0,992	1,212	0,479	0,074	2,424
$RMSE$	$r$	$R^2$	$b$	$\Delta$	$V_\delta$
3,248	0,994	0,955	1,027	0,015	0,08

Это подтверждают и данные таблицы 1. Параметры  $(f_c/f_e)_{\min}$ ,  $(f_c/f_e)_{\text{mid}}$  и  $(f_c/f_e)_{\max}$  свидетельствуют о том, что максимальное превышение  $f_c$  над  $f_e$  составляет в пределах 21 %, а занижение – в пределах 27 %. Величина  $(f_c/f_e)_{\text{mid}}$ , равная 0,992, численно подтверждает занижение на 1 % величины глобального среднего значения прочности бетона, предсказанной нейронной сетью. Величина поправочного коэффициента  $b$  среднего отклонения  $f_e$  и  $f_c$  показывает отклонение среднего значения предсказанных значений прочности до 3 %. Отличие отклонения в сравнении с величиной  $(f_c/f_e)_{\text{mid}}$  вызвано тем, что величина поправочного коэффициента  $b$  является практически обратной к  $(f_c/f_e)_{\text{mid}}$ .

Максимальный размах отношений  $f_c/f_e$  составляет 0,479, а коэффициент вариации – 0,074 или 7,4 %. Из источника [46] известно, что при значении коэффициента вариации меньше 10 % рассеивание данных в математической статистике принято считать относительно незначительным, а если значение коэффициента вариации не превышает 33 %, то совокупность считается однородной.

Среднее значение прочности бетона, полученное неразрушающим методом контроля, составило для тестовой выборки 57,478 МПа. Величины средней абсолютной ошибки  $MAE = 2,424$  и квадратного корня из среднеквадратичной ошибки  $RMSE = 3,248$  составляют 4,2 % и 5,7 % соответственно. Что также подтверждает достаточно высокую точность предсказания величины прочности бетона.

## 7 Выводы

Статистический анализ достоверности значений прочности бетона, предсказанных с применением разработанной СНС –  $f_c$  (модель *conv2d*), и тестовых значений прочности  $f_e$ , полученных неразрушающим методом контроля для готовых железобетонных конструкций, показал достаточно высокую предсказательную способность модели с высоким уровнем корреляции (коэффициент корреляции  $r = 0,994$ , коэффициент детерминации  $R^2 = 0,955$ ) и небольшой ошибкой модели (величина средней ошибки модели  $\Delta = 0,015$  и коэффициента вариации вектора ошибок  $\delta - V_\delta = 0,08$ ).

## 8 Заключение и рекомендации дальнейшего развития исследований

1. В настоящий момент прямые эксперименты являются практически безальтернативным по точности средством определения прочности бетона на осевое сжатие, вместе с тем такие методы не всегда применимы по целому ряду причин. Альтернативные методы, к которым относят неразрушающий контроль прочности, нашли широкое применение в строительстве. Они дешёвы, проверены практикой и достаточно точны, тем не менее, указанный спектр методов не является общедоступным любому человеку. В статье впервые предложен эффективный способ определения прочности на осевое сжатие, имея под рукой только стандартный портативный гаджет с микрофоном (например, мобильный телефон системы Android), и молоток, что станет интуитивно понятно даже неспециалисту, занимающемуся стройкой на личной территории.

2. В случае наличия в распоряжении специального прибора неразрушающего контроля, точность определения прочности бетона может быть весьма высока, если прибор соответствующим образом проверен, тарирован и сертифицирован. Имея же доступ к соответствующей программе (браузеру в Интернете с интуитивным интер-

фейсом), который может быть легко предоставлен пользователю через телефон, любой человек (неспециалист) на этапе строительства может контролировать прочность бетона конструкций в режиме онлайн. Свёрточная нейросеть воспринимая акустические данные от динамик телефона при простукивании молотком определённой области бетона, устанавливает связь между издаваемым звуковым сигналом и прочностью бетона. При этом, если увеличивать объём данных (дообучать нейросеть), то данный метод по точности определения прочности может превзойти точность традиционных (также базирующихся на статистике) неразрушающих методов контроля. Более того, мы полагаем, что данный метод может быть подстроен под множество других задач, где физико-механические свойства материала тем или иным образом связаны с акустическими свойствами упругопластического тела.

3. В дальнейшем планируется дообучить и усовершенствовать нейросеть и применить при оценке прочности бетона на любых объектах.

## Список цитированных источников

1. Selcuka, S. A metaheuristic-guided machine learning approach for concrete strength prediction with high mix design variability using ultrasonic pulse velocity data / S. Selcuka, P. Tang // *Developments in the Built Environment*. – October 2023. – Vol. 15, 100220. – P. 1–14.
2. Breyse, D. Non-destructive evaluation of concrete strength: an historical review and a new perspective by combining NDT methods / D. Breyse // *Construction and Building Materials*. – 2012. – Vol. 33. – P. 139–163.
3. Kewalramani, Manish A. Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks / M. A. Kewalramani, R. Gupta // *Automation in Construction*. – May 2006. – Vol. 15, iss. 3. – P. 374–379.
4. Trtnik, G. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks / G. Trtnik, F. Kavcic, G. Turk // *Ultrasonics*. – January 2009. – Vol. 49, iss. 1. – P. 53–60.
5. Hola, J. Nondestructive identification of delaminations in concrete floor toppings with acoustic methods / J. Hola, L. Sadowski, K. Schabowicz // *Automation in Construction*. – November 2011. – Vol. 20, iss. 7. – P. 799–807.
6. Davis, A. G. The nondestructive impulse response test in North America: 1985–2001 / A. G. Davis // *NDT & E International*. – June 2003. – Vol. 36, iss. 4. – P. 185–193.
7. BS 1881: Part 207-1992. Testing of Concrete. Recommendations for the Assessment of Concrete Strength by Near-to-Surface Tests. British Standard Institution, 2 Park Street, W1A 2BS London, UK, 1992.
8. DIN ISO 8046:1982. German Standard. Hardened Concrete – Determination of Pullout Strength (Deutsche Norm: Festbeton Bestimmung der Ausziehfestigkeit). German Institute for Standardisation, Berlin, Germany, 1982.
9. DS 423.31:1984 Danish Standard. Testing of Concrete. Hardened Concrete. Pull-out Strength (Dansk standard. Betonproving. Haerdnet beton. Udtraeksproving). Danish Standards Institute, Hellerup, Denmark, 1984.
10. ISO/DIS 8046. Hardened Concrete – Determination of Pullout Strength. International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland, 1982.
11. SS 13 72 38. Swedish Standard. Testing of Concrete. Hardened Concrete. Pull-out Strength (Betonproving-hardnad beton-udtragsprov). Swedish Standards Institute, Stockholm, Sweden, 1983.
12. ASTM C 900-87. Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
13. Improving Non-Destructive Test Results Using Artificial Neural Networks / Yi-Fan Shih [et al.] // *International Journal of Machine Learning and Computing*. – December 2015. – Vol. 5, No. 6. – P. 480–483.
14. Qasrawi, H. Y. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted / H. Y. Qasrawi // *Cement and Concrete Research*. – 2000. – Vol. 30, No. 5. – P. 739–746.

15. Using ANNs to improve prediction accuracy for rebound hammers / W. L. Huang [et al.] // *Taiwan Highway Engineering*. – 2001. – Vol. 37, no. 2. – P. 2–18.
16. Hoùà, J. Application of artificial neural networks to determine concrete compressive strength based on non-destructive tests / J. Hoùà, K. Schabowicz // *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2005. – Vol. XI, No. 1. – P. 23–32.
17. Waszczyszyn, Z. Neural Networks in the Analysis and Design of Structures / Z. Waszczyszyn // *CISM Courses and Lectures*. – Springer, Wien-New York, 1999. – No 404. – 307 p.
18. Hajela, P. Neural Networks in Structural Analysis and Design: an Overview / P. Hajela, L. Berke // *Computing Systems in Engineering*. – 1992. – Vol 3, iss. 1–4. – P. 525–538.
19. Kaveh, A. Prediction of Strength for Concrete Specimens Using Artificial Neural Networks / A. Kaveh, A. Khalegi // *Advances in Engineering Computational Technology* / ed. B. H. V. Topping. – Edinburgh : Civil Comp Press, 1998. – P. 165–171.
20. Quantitative Nondestructive Evaluation with Ultrasonic Method Using Neural Networks and Computational Mechanics / A. Oishi [et al.] // *Computational Mechanics*. – 1995. – Vol 15, No 6. – P. 521–533.
21. Williams, T. P. Neural Network for Predicting Concrete Strength / T. P. Williams, A. Khajuria, P. Balaguru // *Proc. of the 8th National Conference on Computing in Civil Engineering and Geographic Information Symposium, Dallas, June 7–9, 1992* / ed. B. J. Goodno, J. R. Wright. – ASCE, NY, 1992. – P. 1082–1088.
22. Kasperkiewicz, J. HPC Strength Prediction Using Artificial Neural Network / J. Kasperkiewicz, J. Racz, A. Dubrawski // *Journal of Computing in Civil Engineering*. – 1995. – Vol 9, iss. 4. – P. 279–283.
23. Schabowicz, K. Non-destructive Identification of Compressive Strength of Concrete by Means of Neural Networks / K. Schabowicz // PhD thesis, Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology, Wrocław, 2003.
24. Hoùà, J. Attempt at Neural Identification of the Strength of High-Grade Concrete on the Basis of Nondestructive Tests / J. Hoùà, K. Schabowicz // *Proc. of 4th International Conference on Developments in Building Technology*. – Bratislava, 2001. – P. 214–219.
25. Hoùà, J. Neural Identification of the Strength of Concrete on the Basis of Non-destructive Tests / J. Hoùà, K. Schabowicz // *Proc. of the 8th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius, 19–22 May 2004. Selected papers* / ed. E. K. Zavadskas, P. Vainiūnas, F. M. Mazzolani. – Vilnius : Technika, 2004. – P. 51–54.
26. Schabowicz, K. Artificial Neural Networks as Applied to Identification of the HPC Strength Using NDT / K. Schabowicz, J. Hoùà // *Proc. of 5th International Conference in Cancun*. – Mexico 2002. – P. 300–317.
27. Hoùà, J. Practical Verification of Nondestructive Neural Network Concrete Strength Assessment / J. Hoùà, K. Schabowicz // *Abstracts of Proc. of the 8th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques, 19–22 May 2004*. – Vilnius : Technika, 2004. – P. 48–49.
28. Lee, S.-Ch. Prediction of concrete strength using artificial neural networks / Seung-Chang Lee // *Engineering Structures*. – June 2003. – Vol. 25, Iss. 7. – P. 849–857.
29. Hòla, J. New technique of nondestructive assessment of concrete strength using artificial intelligence / J. Hòla, K. Schabowicz // *NDT & E International*. – June 2005. – Vol. 38, iss. 4. – P. 251–259.
30. Combining NDT techniques for improved evaluation of concrete properties / Z. M. Sbartai [et al.] // *Cement Concr. Compos*. – 2012. – No. 34 (6). – P. 725–733.
31. Yeh, I. C. Optimization of concrete mix proportioning using a flattened simplex – centroid mixture design and neural networks / I. C. Yeh // *Eng. Comput*. – 2009. – No. 25 (2). – P. 179–190.
32. Cooley, James W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series / James W. Cooley, John W. Tukey // *Math. Comput*. – 1965. – No. 19. – P. 297–301.
33. Zadeh, Lotfi A. Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing / Lotfi A. Zadeh // *Communications of the ACM*. – March 1994. – Vol. 37. No. 3. – P. 77–84.
34. Галушкин, А. И. Синтез многослойных систем распознавания образов / А. И. Галушкин. – М. : Энергия, 1974. – 368 с.
35. Головки, В. А. Нейросетевые технологии обработки данных: учеб. пособие / В. А. Головки, В. В. Краснопрошин. – Минск : БГУ, 2017. – 263 с.
36. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition / Y. Le Cun [et al.] // *Neural computation*. – 1989. – № 1 (4). – P. 541–551.
37. Object recognition with gradient-based learning / Y. Le Cun [et al.] // *In shape, contour and grouping in computer vision*. – B.; Heidelberg, 1999. – P. 319–345.
38. Gradient-based learning applied to document recognition / Y. Le Cun [et al.] // *Proc. of the IEEE*. – 1998. – № 86 (11). – P. 2278–2324.
39. Чунаев, П. В. Анализ и разработка алгоритмов: учеб.-метод. пособие / П. В. Чунаев, К. О. Боченина. – СПб. : Университет ИТМО, 2020. – 33 с.
40. Adam: A Method for Stochastic Optimization [Electronic resource]. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>. – Date of access: 14.12.2023.
41. Градиентный алгоритм первого порядка для стохастических целевых функций, основанный на адаптивных оценках моментов нижнего порядка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://medium.com/analytics-vidhya/a-complete-guide-to-adam-and-rmsprop-optimizer-75f4502d83be>. – Дата доступа: 14.12.2023.
42. Python programming language and Tensorflow framework [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.tensorflow.org/about/bib>. – Date of access: 22.10.2023.
43. Нормализация данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Batch-normalization#cite\\_note-2](https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Batch-normalization#cite_note-2). – Дата доступа: 15.11.2023.
44. Пакетная нормализация: Ускорение обучения глубоких сетей за счет уменьшения смещения внутренних ковариат, 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1502.03167>. – Дата доступа: 15.11.2023.
45. Основы проектирования строительных конструкций = Основы проектирования будауничых канструкцый : ТКП EN 1990-2011. – Введ. 15.11.2012. – Минск : CEN/TC 250 «Конструкционные Еврокоды» : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2011. – 70 с.
46. Коэффициент вариации (Variation coefficient) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wiki.loginom.ru/articles/variation-coefficient.html>. – Дата доступа: 28.02.2024.

## References

1. Selcuka, S. A metaheuristic-guided machine learning approach for concrete strength prediction with high mix design variability using ultrasonic pulse velocity data / S. Selcuka, P. Tang // *Developments in the Built Environment*. – October 2023. – Vol. 15, 100220. – P. 1–14.
2. Breyse, D. Non-destructive evaluation of concrete strength: an historical review and a new perspective by combining NDT methods / D. Breyse // *Construction and Building Materials*. – 2012. – Vol. 33. – P. 139–163.
3. Kewalramani, Manish A. Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks / M. A. Kewalramani, R. Gupta // *Automation in Construction*. – May 2006. – Vol. 15, iss. 3. – P. 374–379.
4. Trtnik, G. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks / G. Trtnik, F. Kavcic, G. Turk // *Ultrasonics*. – January 2009. – Vol. 49, iss. 1. – P. 53–60.
5. Hòla, J. Nondestructive identification of delaminations in concrete floor toppings with acoustic methods / J. Hòla, L. Sadowski, K. Schabowicz // *Automation in Construction*. – November 2011. – Vol. 20, iss. 7. – P. 799–807.
6. Davis, A. G. The nondestructive impulse response test in North America: 1985–2001 / A. G. Davis // *NDT & E International*. – June 2003. – Vol. 36, iss. 4. – P. 185–193.
7. BS 1881: Part 207-1992. Testing of Concrete. Recommendations for the Assessment of Concrete Strength by Near-to-Surface Tests. British Standard Institution, 2 Park Street, W1A 2BS London, UK, 1992.

8. DIN ISO 8046:1982. German Standard. Hardened Concrete – Determination of Pullout Strength (Deutsche Norm: Festbeton Bestimmung der Ausziehfestigkeit). German Institute for Standardisation, Berlin, Germany, 1982.
9. DS 423.31:1984 Danish Standard. Testing of Concrete. Hardened Concrete. Pull-out Strength (Dansk standard. Betonprovning. Haerdnet beton. Udtraeksprovning). Danish Standards Institute, Hellerup, Denmark, 1984.
10. ISO/DIS 8046. Hardened Concrete – Determination of Pullout Strength. International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland, 1982.
11. SS 13 72 38. Swedish Standard. Testing of Concrete. Hardened Concrete. Pull-out Strength (Betonprovning-hardnad beton-udtragsprov). Swedish Standards Institute, Stockholm, Sweden, 1983.
12. ASTM C 900-87. Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
13. Improving Non-Destructive Test Results Using Artificial Neural Networks / Yi-Fan Shih [et al.] // International Journal of Machine Learning and Computing. – December 2015. – Vol. 5, No. 6. – P. 480–483.
14. Qasrawi, H. Y. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted / H. Y. Qasrawi // Cement and Concrete Research. – 2000. – Vol. 30, No. 5. – P. 739–746.
15. Using ANNs to improve prediction accuracy for rebound hammers / W. L. Huang [et al.] // Taiwan Highway Engineering. – 2001. – Vol. 37, no. 2. – P. 2–18.
16. Hoúa, J. Application of artificial neural networks to determine concrete compressive strength based on non-destructive tests / J. Hoúa, K. Schabowicz // Journal of Civil Engineering and Management. – 2005. – Vol. XI, No 1. – P. 23–32.
17. Waszczyszyn, Z. Neural Networks in the Analysis and Design of Structures / Z. Waszczyszyn // CISM Courses and Lectures. – Springer, Wien-New York, 1999. – No 404. – 307 p.
18. Hajela, P. Neural Networks in Structural Analysis and Design: an Overview / P. Hajela, L. Berke // Computing Systems in Engineering. – 1992. – Vol 3, iss. 1–4. – P. 525–538.
19. Kaveh, A. Prediction of Strength for Concrete Specimens Using Artificial Neural Networks / A. Kaveh, A. Khalegi // Advances in Engineering Computational Technology / ed. B. H. V. Topping. – Edinburgh : Civil Comp Press, 1998. – P. 165–171.
20. Quantitative Nondestructive Evaluation with Ultrasonic Method Using Neural Networks and Computational Mechanics / A. Oishi [et al.] // Computational Mechanics. – 1995. – Vol 15, No 6. – P. 521–533.
21. Williams, T. P. Neural Network for Predicting Concrete Strength / T. P. Williams, A. Khajuria, P. Balaguru // Proc. of the 8th National Conference on Computing in Civil Engineering and Geographic Information Symposium, Dallas, June 7–9, 1992 / ed. B. J. Goodno, J. R. Wright. – ASCE, NY, 1992. – P. 1082–1088.
22. Kasperkiewicz, J. HPC Strength Prediction Using Artificial Neural Network / J. Kasperkiewicz, J. Racz, A. Dubrawski // Journal of Computing in Civil Engineering. – 1995. – Vol 9, iss. 4. – P. 279–283.
23. Schabowicz, K. Non-destructive Identification of Compressive Strength of Concrete by Means of Neural Networks / K. Schabowicz // PhD thesis, Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology, Wrocław, 2003.
24. Hoúa, J. Attempt at Neural Identification of the Strength of High-Grade Concrete on the Basis of Nondestructive Tests / J. Hoúa, K. Schabowicz // Proc. of 4th International Conference on Developments in Building Technology. – Bratislava, 2001. – P. 214–219.
25. Hoúa, J. Neural Identification of the Strength of Concrete on the Basis of Non-destructive Tests / J. Hoúa, K. Schabowicz // Proc. of the 8th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius, 19–22 May 2004. Selected papers / ed. E. K. Zavadskas, P. Vainiūnas, F. M. Mazzolani. – Vilnius : Technika, 2004. – P. 51–54.
26. Schabowicz, K. Artificial Neural Networks as Applied to Identification of the HPC Strength Using NDT / K. Schabowicz, J. Hoúa // Proc. of 5th International Conference in Cancun. – Mexico 2002. – P. 300–317.
27. Hoúa, J. Practical Verification of Nondestructive Neural Network Concrete Strength Assessment / J. Hoúa, K. Schabowicz // Abstracts of Proc. of the 8th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques, 19–22 May 2004. – Vilnius : Technika, 2004. – P. 48–49.
28. Lee, S.-Ch. Prediction of concrete strength using artificial neural networks / Seung-Chang Lee // Engineering Structures. – June 2003. – Vol. 25, Iss. 7. – P. 849–857.
29. Hoúa, J. New technique of nondestructive assessment of concrete strength using artificial intelligence / J. Hoúa, K. Schabowicz // NDT & E International. – June 2005. – Vol. 38, iss. 4. – P. 251–259.
30. Combining NDT techniques for improved evaluation of concrete properties / Z. M. Sbartai [et al.] // Cement Concr. Compos. – 2012. – No. 34 (6). – P. 725–733.
31. Yeh, I. C. Optimization of concrete mix proportioning using a flattened simplex – centroid mixture design and neural networks / I. C. Yeh // Eng. Comput. – 2009. – No. 25 (2). – P. 179–190.
32. Cooley, James W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series / James W. Cooley, John W. Tukey // Math. Comput. – 1965. – No. 19. – P. 297–301.
33. Zadeh, Lotfi A. Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing / Lotfi A. Zadeh // Communications of the ACM. – March 1994. – Vol. 37, No. 3. – P. 77–84.
34. Galushkin, A. I. Sintez mnogoslownykh sistem raspoznavaniya obrazov / A. I. Galushkin. – M. : Energiya, 1974. – 368 s.
35. Golovko, V. A. Nejrosetevye tekhnologii obrabotki dannyh: ucheb. posobie / V. A. Golovko, V. V. Krasnoproshin. – Minsk : BGU, 2017. – 263 s.
36. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition / Y. Le Cun [et al.] // Neural computation. – 1989. – № 1 (4). – P. 541–551.
37. Object recognition with gradient-based learning / Y. Le Cun [et al.] // In shape, contour and grouping in computer vision. – B.; Heidelberg, 1999. – P. 319–345.
38. Gradient-based learning applied to document recognition / Y. Le Cun [et al.] // Proc. of the IEEE. – 1998. – № 86 (11). – P. 2278–2324.
39. CHunaev, P. V. Analiz i razrabotka algoritmov: ucheb.-metod. posobie / P. V. CHunaev, K. O. Bochenina. – Spb. : Universitet ITMO, 2020. – 33 s.
40. Adam: A Method for Stochastic Optimization [Electronic resource]. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>. – Date of access: 14.12.2023.
41. Gradientnyj algoritm pervogo poryadka dlya stohasticheskikh celevykh funkciy, osnovannyj na adaptivnykh ocenkah momentov nizhnego poryadka [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://medium.com/analytics-vidhya/a-complete-guide-to-adam-and-rmsprop-optimizer-75f4502d83be>. – Data dostupa: 14.12.2023.
42. Python programming language and Tensorflow framework [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.tensorflow.org/about/bib>. – Date of access: 22.10.2023.
43. Normalizaciya dannyh [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Batch-normalization#cite\\_note-2](https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Batch-normalization#cite_note-2). – Data dostupa: 15.11.2023.
44. Paketnaya normalizaciya: Uskorenie obucheniya glubokih setej za schet umen'sheniya smeshcheniya vnutrennih kovariat, 2016 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://arxiv.org/abs/1502.03167>. – Data dostupa: 15.11.2023.
45. Osnovy proektirovaniya stroitel'nykh konstrukcij = Asnovy praektavannyya budaunichykh kanstrukcij : TKP EN 1990-2011. – Vved. 15.11.2012. – Minsk : CEN/TS 250 «Konstrukcionnye Evrokody» : Ministerstvo arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus', 2011. – 70 s.
46. Koefficient variacii (Variation coefficient) [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://wiki.loginom.ru/articles/variation-coefficient.html>. – Data dostupa: 28.02.2024.

*Материал поступил 03.03.2024, одобрен 26.03.2024, принят к публикации 26.03.2024*

УДК 621.225.7

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОСИСТЕМЫ С ОБЪЕМНОЙ АДАПТАЦИЕЙ К НАГРУЗКЕ

**Е. В. Хазеев<sup>1</sup>, Д. Л. Стасенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Магистр технических наук, ассистент кафедры технология машиностроения УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Гомель, Беларусь, e-mail: hazeev@tut.by

<sup>2</sup> К. т. н., доцент, заведующий кафедрой технология машиностроения УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Гомель, Беларусь, e-mail: stasenko@gstu.by

### Реферат

В ходе проведенной работы была разработана гидросистема с объемной адаптацией к нагрузке, обеспечивающая повышение энергоэффективности до 20 %. Сформирована ее математическая модель, позволившая получить расчетные значения параметров работы мобильной машины, определяющие ее энергоэффективность. Практическая значимость полученных результатов определяется возможностью их использования в качестве методологической базы для проектирования новых гидросистем с объемной адаптацией к нагрузке с улучшенной энергоэффективностью.

**Ключевые слова:** гидросистема, адаптация к нагрузке, максимальный (промежуточный, минимальный) уровень давления, энергоэффективность.

### IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE HYDRAULIC SYSTEM WITH VOLUMETRIC ADAPTATION TO THE LOAD

Y. V. Khazeyeu, D. L. Stasenko

### Abstract

In the course of the work carried out, a hydraulic system with volumetric adaptation to the load was obtained, providing an increase in energy efficiency up to 20 %. Its mathematical model was formed, which made it possible to obtain the calculated values of the parameters of the mobile machine, determining its energy efficiency. The practical significance of the results obtained is determined by the possibility of their use as a methodological basis for the design of new hydraulic systems with volumetric adaptation to load with improved energy efficiency.

**Keywords:** hydraulic system, load sensing, maximum (intermediate, minimum) pressure level, energy efficiency.

### Введение

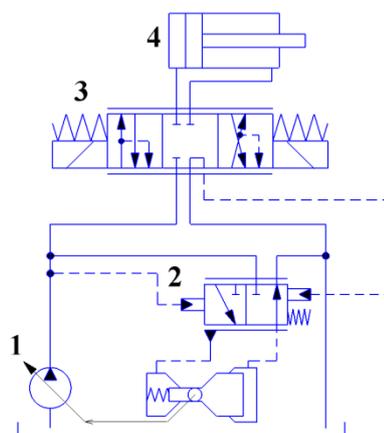
При работе основных гидравлических двигателей мобильных машин наиболее часто применяются два типа гидросистем. Системы с дроссельным регулированием и системы с объемным регулированием.

В гидросистемах с дроссельным регулированием при работе основных потребителей на низких величинах расхода возникают высокие потери мощности в системе, что неблагоприятно сказывается на энергоэффективности мобильной машины [1]. Данная проблема решается путем внедрения в мобильную машину гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке. Данный тип гидросистем в настоящее время являются наиболее эффективным при использовании в мобильных машинах. В гидросистемах с объемной адаптацией к нагрузке насос подает требуемую величину рабочей жидкости на двигателя в заданный момент времени, тем самым подстраиваясь под внешнюю нагрузку, возникающую на потребителе. Величина давления адаптируется к наибольшей величине нагрузки на потребителя, а потери на регуляторе имеют минимальные значения. Данная особенность позволяет гидросистеме с объемной адаптацией к нагрузке обеспечивать улучшенные характеристики работы мобильной машины по сравнению с другими типами гидросистем.

Целью работы является повышение энергоэффективности гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке и формирование ее математической модели средствами узлового метода моделирования.

### Основная часть

Рассмотрим базовую гидросистему с объемной адаптацией к нагрузке с регулятором давления золотникового типа, которая представлена на рисунке 1, и сформируем ее математическую модель [1].



1 – насос; 2 – регулятор; 3 – распределитель; 4 – цилиндр

**Рисунок 1** – Принципиальная схема базовой гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке

Принцип работы данной гидросистемы заключается в следующем: при смещении золотника распределителя 3 регулируется величина расхода рабочей жидкости, независимо от величины давления нагрузки в системе. При этом за счет непрерывной адаптации к нагрузке величины давления на регуляторе 2, которое установлено выше, чем давление на самом нагруженном элементе системы цилиндра 4, достигается улучшенная величина энергоэффективности по сравнению с гидросистемами с клапанной адаптацией к нагрузке.

На основе математических описаний гидроэлементов [2] составим систему уравнений основных узлов базовой гидросистемы.

Узел регулируемого насоса:

$$M_r = q_n \cdot f(q) \cdot (p_{j1} - p_{i1}) + a \cdot \frac{\omega_s}{u_g} + a_p \cdot |p_{j1} - p_{i1}| + a; \quad (1)$$

$$Q_{i1, j1} = q_n \cdot f(q) \cdot \frac{\omega_s}{u_g} \pm k_{ym} \cdot p_{i1, j1}, \quad (2)$$

где  $q_n$  – максимальный рабочий объем насоса, см<sup>3</sup>;  $f(q)$  – параметр регулирования ( $-1 \leq f(q) \leq 1$ );  $\omega_s$  – угловая скорость вала двигателя, рад/сек;  $a_\omega$  – коэффициент гидромеханических потерь, зависящих от угловой скорости;  $a_p$  – коэффициент гидромеханических потерь, зависящих от давления;  $a$  – постоянная гидромеханических потерь;  $u_\partial$  – передаточное число редуктора;  $k_{ym}$  – коэффициент объемных потерь насоса;  $Q_{i1}, p_{i1}$  – принимается со знаком «+».

$$\frac{dv_p}{dt} = m^{-1} \cdot [p_{i1} \cdot F_i - p_{j1} \cdot F_j - h \cdot v_p - (R_f^0 + k_i \cdot p_{i1} + k_j \cdot p_{j1}) \cdot \text{sign} v_p - R_c], \quad (3)$$

где  $u_p$  – скорость поршня, м/сек;  $m$  – приведенная к штоку масса подвижных частей гидроцилиндра, кг;  $h$  – коэффициент вязкого трения;  $R_f^0$  – сила трения в манжетных уплотнениях, Н;  $R_c$  – усилие на

штоке, Н;  $L_u$  – ход поршня, м.  $F_i$  – рабочая площадь поршня в полости 1, примыкающей к узлу  $i$ , м<sup>2</sup>;  $F_j$  – рабочая площадь поршня в полости 2, примыкающей к узлу  $j$ , м<sup>2</sup>.

$$\frac{dQ_{rs}}{dt} = B \cdot \left[ \mu \cdot f_{rs}(z) \cdot \text{sign}(p_r - p_s) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_r - p_s|} - Q_{rs} \right], \quad (4)$$

где  $f_{rs}(z)$  – площадь проходного сечения канала распределителя, м<sup>2</sup>;  $\mu$  – коэффициент расхода;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Из описанных выше выражений получаем систему уравнений для узла регулируемого насоса:

$$N_H = \begin{cases} M_r = q_n \cdot f(q) \cdot (p_{j1} - p_{i1}) + a \cdot \frac{\omega_s}{u_\partial} + a_p \cdot |p_{j1} - p_{i1}| + a \\ Q_{i1, j1} = q_n \cdot f(q) \cdot \frac{\omega_s}{u_\partial} \pm k_{ym} \cdot p_{i1, j1} \\ \frac{dv_k}{dt} = m^{-1} \cdot [p_{i2} \cdot F_{i2} - p_{j2} \cdot F_{j2} - h \cdot v_k - (R_{mp}^0 + k_{i2} \cdot p_{i2} + k_{j2} \cdot p_{j2}) \cdot \text{sign} v_k - R_u] \\ \frac{dQ_{rs}}{dt} = B \cdot \left[ \mu \cdot f_{rs}(z) \cdot \text{sign}(p_r - p_s) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_r - p_s|} - Q_{rs} \right] \end{cases} \quad (5)$$

Аналогичным образом составляем системы уравнений для остальных узлов гидросистемы в соответствии с [2], в результате получаем следующие системы уравнений:

Узел гидравлических линий:

$$N_{эл} = \begin{cases} \frac{dp_i}{dt} = \frac{Q_i - Q_j}{k_{ynp.mp}} \\ p_j = p_i - \lambda \cdot \frac{8 \cdot \rho \cdot L_{mp}}{\pi^2 \cdot d_{mp}^5} \cdot \left| \frac{Q_i + Q_j}{2} \right| \cdot \frac{Q_i + Q_j}{2} \\ k_{ynp.mp} = \frac{\pi \cdot d_{mp}^2 \cdot L_{mp}}{4 \cdot E_{np}} \\ E_{np} = \frac{E_{ж}}{1 + \frac{d_{mp}}{\delta_{mp}} \cdot \frac{E_{ж}}{E_{ст}}} \\ \lambda = \begin{cases} 75 / Re, n_{pu}, Re \leq 2300 \\ 0,3164 \cdot Re^{-0,25}, n_{pu}, Re > 2300 \end{cases} \\ Re = \frac{2 \cdot |Q_i + Q_j|}{\pi \cdot d_{mp} \cdot v_{ж}} \end{cases} \quad (6)$$

Узел распределителя:

$$N_p = \frac{dQ_{rs}}{dt} = B \cdot \left[ \mu \cdot f_{rs}(z) \cdot \text{sign}(p_r - p_s) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_r - p_s|} - Q_{rs} \right]. \quad (7)$$

Узел потребителя: 
$$N_n = \frac{dv_k}{dt} = m^{-1} \cdot \left[ p_{i6} \cdot F_{i6} - p_{j6} \cdot F_{j6} - h \cdot v_k - (R_{mp}^0 + k_{i6} \cdot p_{i6} + k_{j6} \cdot p_{j6}) \cdot \text{sign} v_k - R_u \right]. \quad (8)$$

Таким образом, для базовой гидросистемы порядок системы уравнений определяется следующим образом: пусть гидросхема системы содержит узел регулируемого насоса  $N_n$ , узел распределителя  $N_{op}$ , узел потребителя  $N_n$ , узел гидравлических линий  $N_{лн}$ , обозначив через  $n_i$  число ходов золотника  $i$ -го распределителя, получаем следующий порядок уравнений:

$$N = N_n + N_p + N_n + 11 \cdot N_{лн} + \sum_{i=1}^{N_{зр1}} n_i + \sum_{i=1}^{N_{зр2}} n_i, \quad (9)$$

Недостатком данной гидросистемы является то что, для работы системы с адаптацией к нагрузке между напорной линией и линией управления регулируемым насосом с чувствительным к нагрузке управляющим регулятором необходимо обеспечить перепад давления в пределах  $\Delta p = 2...2,5$  МПа. При этом из-за данного перепада давления в системе возникают потери энергии в связи с тем, что данную величину давления при работе системы необходимо поддерживать постоянно как при больших нагрузках  $p = 20...30$  МПа в системе, так и при малых  $p = 3...8$  МПа. Таким образом, при максимальных нагрузках в системе данной потерей энергии можно пренебречь, однако, как правило, в период эксплуатации мобильные машины работают на средних и малых нагрузках. При таких режимах эксплуатации потери энергии существенно влияют на энергоэффективность мобильной машины и приводят к снижению ее общего КПД.

Кроме того, в базовой гидросистеме возникают высокие потери при одновременном использовании в гидроприводе двух и более потребителей, на которых возникают разные величины внешней

нагрузки. Поскольку величина давления в системе всегда поддерживается на постоянном значении, то есть значение перепада давления, которое выше максимального давления нагрузки, создаваемого в системе с более низким давлением нагрузки, необходимо регулировать.

Одним из решений устранения данного недостатка и улучшения эффективности работы всей системы может быть внедрение в систему дополнительной напорной линии с заданным уровнем давления, например линией промежуточного давления (ПЛ), которая расположена между напорной линией высокого давления (НЛ) и сливной линией низкого давления (СЛ), рисунок 2 [3].

В предлагаемой гидросистеме установлен аккумулятор в линии промежуточного давления (ПЛ), который восстанавливает потери затрачиваемой энергии, а для поддержания постоянной величины перепада давления в системе установлен регулятор насоса, выполненный в виде двух пропорциональных клапанов, рисунок 2.

Два вспомогательных распределителя, установленные на входе и выходе основного пропорционального распределителя, регулируют величину давления между линиями (НЛ), (ПЛ) и (СЛ), рисунок 2.

Таким образом, величина возникающих потерь может быть уменьшена за счет адаптации разницы давлений, возникающих на поршне гидроцилиндра и фактической внешней нагрузки на цилиндре.

Для улучшения энергоэффективности гидросистемы линию промежуточного давления (ПЛ) необходимо подключить к всасывающей линии насоса, что приведет к снижению энергопотребления системы при эксплуатации насоса, при этом в напорную линию подключения от аккумулятора к насосу установлен клапан давления для контроля подачи рабочей жидкости, рисунок 2.

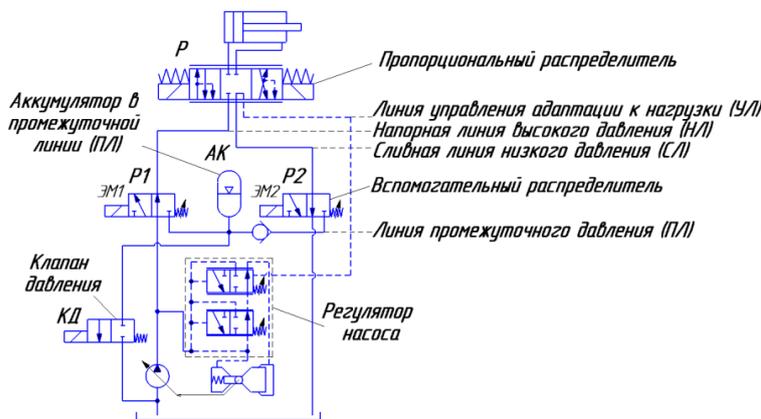


Рисунок 2 – Принципиальная схема улучшенной гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке

Работу улучшенной гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке можно изобразить в виде четырех различных состояний, рисунок 3.

1. На рисунке 3а показана работа системы на высоких скоростях перемещения цилиндра, при которой по напорной линии НР рабочая жидкость от насоса проходит через вспомогательный распределитель Р1, и основной пропорциональный распределитель Р поступает в поршневую полость цилиндра. В результате чего цилиндр начинает работать. При этом из штоковой полости потребителя рабочая жидкость сливается в бак через линию слива СЛ, проходя через основной Р и вспомогательный Р2 распределители. Промежуточная линия ПЛ в данном режиме не задействуется.

2. На рисунке 3б показана работа системы на низких скоростях перемещения цилиндра, срабатывает электромагнит ЭМ1 вспомогательного распределителя Р1, в результате чего рабочая жидкость от аккумулятора АК подается по промежуточной линии ПЛ в напорную линию НЛ, при этом подача рабочей жидкости от насоса прекращается, а аккумулятор АК разряжается. Слив из штоковой полости потребителя рабочей жидкости в данном случае организован аналогично первому режиму работы системы.

3. На рисунке 3в показан третий режим работы системы, который реализован для зарядки аккумулятора АК, установленного в промежуточную линию ПЛ. При этом от насоса в напорную линию НЛ рабочая жидкость, проходя через вспомогательный Р1 и основной Р распределители, поступает в поршневую полость цилиндра. В свою очередь, из штоковой полости цилиндра от основного распределителя Р поток подается в вспомогательный распределитель Р2, который переключается электромагнитом ЭМ 2, и рабочая жидкость поступает в промежуточную линию ПЛ, следовательно, происходит зарядка аккумулятора АК. В данном режиме работы системы линия слива СЛ остается незадействованной.

4. На рисунке 3г показана работа системы на очень низких скоростях перемещения цилиндра, срабатывают одновременно электромагниты ЭМ1, ЭМ2 вспомогательных распределителей Р1, Р2 и гидросистема работает от установленного в промежуточную линию ПЛ аккумулятора АК, который одновременно разряжается и заряжается, не задействуя основной источник питания, установленный в напорную линию НЛ и линию слива СЛ [4].

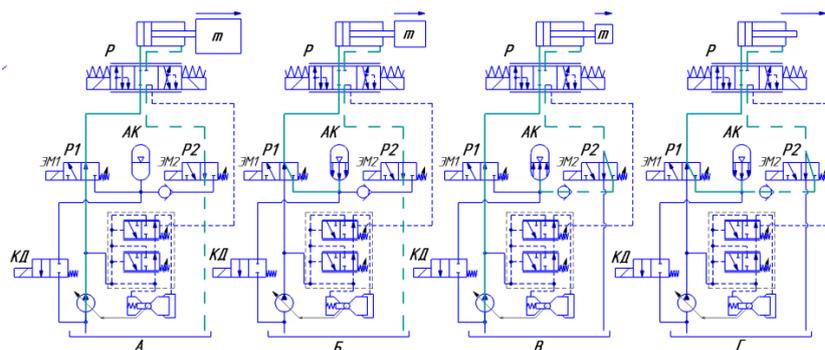


Рисунок 3 – Состояния работы улучшенной гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке

На основе математических описаний гидроэлементов [2] составим систему уравнений основных узлов улучшенной гидросистемы.

Узел вспомогательного блока:

$$\frac{dv_v}{dt} = m^{-1} \cdot [p_{j3} \cdot F_{i3} - p_{j3} \cdot F_{j3} - h \cdot v_v - R_{mp} \cdot \text{sign} v_v - c \cdot (z_k + z_0)]; \quad (10)$$

$$\frac{dQ_{i3,j3}}{dt} = B \cdot \left[ \left( f_t + \pi \cdot d_v \cdot z_k \cdot \sin \frac{\theta}{2} \right) \cdot \mu \cdot \text{sign} (p_{i3} - p_{j3}) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_{i3} - p_{j3}| - Q_{i3,j3}} \right]; \quad (11)$$

где  $u_k$  – скорость запорно-регулирующего элемента, м/сек;  $m$  – масса подвижной части клапана, кг;  $F_{i3,j4}, F_{j3,j4}$  – рабочие площади запорно-регулирующего элемента клапана со стороны напорной и сливной линий,  $m^2$ ;  $h$  – коэффициент вязкого трения;  $c$  – жесткость пружины, кг/сек $^2$ ;  $z_0$  – величина предварительного сжатия пружины;  $L_{кл}$  – ход

запорно-регулирующего элемента, м;  $f_{dp}$  – площадь проходного сечения дросселя, подсоединенного параллельно клапану,  $m^2$ ;  $d_{щ}$  – средний диаметр дросселирующей щели клапана, м;  $\theta$  – угол конусности клапана, град;  $\mu$  – коэффициент расхода;  $B$  – параметр, учитывающий инерционность столба жидкости.

$$\frac{dv_v}{dt} = m^{-1} \cdot [F \cdot (p_i - p_j) - h \cdot v_v - c \cdot (z_k + z_0) - (R_{mp}^0 + k_i \cdot p_i) \cdot \text{sign} v_v]; \quad (12)$$

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{Q_i - F \cdot v_v}{k_{ynpi}}; \quad (13)$$

$$E_{np} = \frac{E_{ж}}{1 + \frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_{ж}}{E_{cm}}}; \quad (16)$$

$$p_j = p_0 \cdot \left( \frac{L_a}{L_a - z_k} \right)^n - p_a; \quad (14)$$

где  $m$  – масса подвижной части аккумулятора;  $F$  – рабочая площадь подвижной части;  $k_i$  – коэффициент пропорциональности между силой трения и давлением рабочей полости;  $D$  – диаметр поршня;  $V$  – общий объем аккумулятора;  $\delta$  – толщина стенки аккумулятора;  $p_0$  – давление зарядки;  $p_a$  – атмосферное давление.

$$k_{ynpi} = \frac{\Delta V_i + z_k \cdot F}{E_{np}}; \quad (15)$$

Из описанных выше выражений получаем систему уравнений для узла вспомогательного блока:

$$N_{\text{вб}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_v}{dt} = m^{-1} \cdot [p_{i3} \cdot F_{i3} - p_{j3} \cdot F_{j3} - h \cdot v_v - R_{mp} \cdot \text{sign} v_v - c \cdot (z_k + z_0)] \\ \frac{dQ_{i3,j3}}{dt} = B \cdot \left[ \left( f_t + \pi \cdot d_v \cdot z_k \cdot \sin \frac{\theta}{2} \right) \cdot \mu \cdot \text{sign} (p_{i3} - p_{j3}) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_{i3} - p_{j3}| - Q_{i3,j3}} \right] \\ \frac{dv_v}{dt} = m^{-1} \cdot [F \cdot (p_i - p_j) - h \cdot v_v - c \cdot (z_k + z_0) - (R_{mp}^0 + k_i \cdot p_i) \cdot \text{sign} v_v] \\ \frac{dp_i}{dt} = \frac{Q_i - F \cdot v_v}{k_{ynpi}} \\ p_j = p_0 \cdot \left( \frac{L_a}{L_a - z_k} \right)^n - p_a \\ k_{ynpi} = \frac{\Delta V_i + z_k \cdot F}{E_{np}} \\ E_{np} = \frac{E_{ж}}{1 + \frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_{ж}}{E_{cm}}} \\ \frac{dQ_{rs}}{dt} = B \cdot \left[ \mu \cdot f_{rs}(z) \cdot \text{sign}(p_r - p_s) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_r - p_s| - Q_{rs}} \right] \\ \frac{dQ_{rs}}{dt} = B \cdot \left[ \mu \cdot f_{rs}(z) \cdot \text{sign}(p_r - p_s) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_r - p_s| - Q_{rs}} \right] \end{array} \right. \quad (17)$$

В систему уравнений узла регулируемого насоса (5) добавляется выражение (4), а системы уравнений для улова гидрوليний, распределителя и потребителя улучшенной гидросистемы формируются в соответствии с выражениями (6), (7), (8) соответственно.

Таким образом, для улучшенной гидросистемы порядок системы уравнений определяется следующим образом: пусть гидросхема

$$N = N_H + N_p + N_n + 16 \cdot N_{2л} + N_{вб} + \sum_{i=1}^{N_{зр1}} n_i + \sum_{i=1}^{N_{зр2}} n_i + \sum_{i=1}^{N_{зр3}} n_i + \sum_{i=1}^{N_{зр4}} n_i \quad (18)$$

**Теоретический расчет математических моделей**

Для проведения теоретического расчета математических моделей и получения результатов воспользуемся программой «MathCad». В качестве примера выполнен расчет узла регулируемого насоса. Первоначально заданы рабочие параметры гидросистемы, принятые при проведении расчетов (таблица 1), [5].

**Таблица 1 – Значения основных параметров гидросистемы**

Наименование параметра	Значение параметра			Наименование параметра	Значение параметра
$q_n$ , см <sup>3</sup>	20			$m$ , кг	0,025
$p_{i1}$ , МПа	5	10	18	$D_{ц}$ , мм	15
$p_{j1}$ , МПа	7	12	20	$F_i$ , мм <sup>2</sup>	25,2
$\omega_{д}$ , рад/сек	1,4			$F_j$ , мм <sup>2</sup>	77,05
$u_{д}$	1,1			$h$	1,2
$a_{\omega}$	0,8			$u_p$ , м/сек	6,3
$a_p$	0,8			$R_{f_i}^0$ , Н	8,7
$f(q)$	0,1			$k_i$	1,024
$a$	0,9			$k_j$	0,6
$k_{ym}$	0,9			$R_c$ , Н	12,6
$B$	0,003			$\mu$	0,913
$\zeta$	1,2			$f_{rs}(z)$ , мм <sup>2</sup>	62,8
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	870			$D_y$ , мм	10

улучшенной гидросистемы содержит узел регулируемого насоса  $N_n$ , узел распределителя  $N_{ор}$ , узел потребителя  $N_n$ , узел гидравлических линий  $N_{лн}$ , узел вспомогательного блока  $N_{вб}$ , обозначив через  $n_i$  число ходов золотника  $i$ -го распределителя, получаем следующий порядок уравнений:

где  $q_n$  – максимальный рабочий объем насоса;  $p_{i1}$  – давление на входе в насос;  $p_{j1}$  – давление на выходе из насоса;  $\omega_{д}$  – угловая скорость вала двигателя;  $u_{д}$  – передаточное число редуктора;  $a_{\omega}$  – коэффициент гидромеханических потерь, зависящий от угловой скорости;  $a_p$  – коэффициент гидромеханических потерь, зависящий от давления;  $f(q)$  – параметр регулирования,  $-1 \leq f(q) \leq 1$ ;  $a$  – постоянная гидромеханических потерь;  $k_{ym}$  – коэффициент объемных потерь насоса;  $m$  – приведенная к штоку масса подвижных частей цилиндра;  $D_{ц}$  – диаметр цилиндра;  $F_i, F_j$  – рабочая площадь поршня в полостях  $i, j$ ;  $h$  – коэффициент вязкого трения;  $u_p$  – скорость поршня;  $R_{f_i}^0$  – сила трения в манжетных уплотнениях;  $k_i, k_j$  – коэффициент пропорциональности между давлениями в полостях  $i, j$  и силой трения в манжетных условиях;  $R_c$  – усилие на штоке, Н;  $B$  – параметр учитывающий инерционность столба жидкости;  $\mu$  – коэффициент расхода;  $\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $f_{rs}(z)$  – площадь проходного сечения канала распределителя;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости;  $D_y$  – условный проход.

Для принятых начальных параметров работы рассмотренной гидросистемы в результате расчета математической модели узла регулируемого насоса получаем следующие значения:

$$N_{H1} = \begin{cases} M_r = 66,45 \\ Q_{j1} = 83,24 \\ Q_{j1} = 73,23 \\ \frac{dv_k}{dt} = 4,03 \\ Q_{регулятора} = 95,85 \end{cases} ; \quad N_{H2} = \begin{cases} M_r = 40,08 \\ Q_{j1} = 49,33 \\ Q_{j1} = 34,91 \\ \frac{dv_k}{dt} = 2,65 \\ Q_{регулятора} = 65,69 \end{cases} ; \quad N_{H3} = \begin{cases} M_r = 17,87 \\ Q_{j1} = 10,26 \\ Q_{j1} = 4,01 \\ \frac{dv_k}{dt} = 0,678 \\ Q_{регулятора} = 7,81 \end{cases}$$

где  $N_{H1}, N_{H2}, N_{H3}$  – значения основных параметров узла регулируемого насоса в зависимости от величины давления в системе;  $M_r$  – крутящий момент, Н·м;  $Q_{j1}$  – расход на входе в насос, л/мин;  $Q_{j1}$  – расход на выходе из насоса, л/мин;  $\frac{dv_k}{dt}$  – ускорение цилиндра, м/с<sup>2</sup>;

$Q_{регулятора}$  – расход на выходе из регулятора, л/мин.

Для принятых начальных параметров работы улучшенной гидросистемы в результате расчета математической модели узла регулируемого насоса получаем следующие значения:

$$N_{H1} = \begin{cases} M_r = 61,45 \\ Q_{j1} = 72,12 \\ Q_{j1} = 64,35 \\ \frac{dv_k}{dt} = 3,7 \\ Q_{регулятора} = 78,7 \end{cases} ; \quad N_{H2} = \begin{cases} M_r = 32,67 \\ Q_{j1} = 41,57 \\ Q_{j1} = 27,31 \\ \frac{dv_k}{dt} = 2,15 \\ Q_{регулятора} = 52,87 \end{cases} ; \quad N_{H3} = \begin{cases} M_r = 12,42 \\ Q_{j1} = 6,78 \\ Q_{j1} = 3,61 \\ \frac{dv_k}{dt} = 0,258 \\ Q_{регулятора} = 5,32 \end{cases}$$

В ходе проведения теоретического расчета математических моделей для типовой гидросистемы (9) величина мощности при различных величинах давления составила

$$N_{тгс1} = 120,69 \text{ кВт} ; N_{тгс2} = 78,41 \text{ кВт} ; N_{тгс3} = 26,92 \text{ кВт}$$

Для улучшенной гидросистемы (18) величина мощности при различных величинах давления составила

$$N_{угс1} = 95,89 \text{ кВт} ; N_{угс2} = 63,57 \text{ кВт} ; N_{угс3} = 22,15 \text{ кВт}$$

При сравнении математических моделей типовой гидросистемы выражение (9) и улучшенной гидросистемы, выражение (18) видно, что математическая модель улучшенной гидросистемы с объемной адаптацией к нагрузке за счет внедрения дополнительных гидроэлементов имеет иную форму в сравнении с типовой гидросистемой. За счет данной особенности улучшенная гидросистема обеспечивает повышение энергоэффективности около 20 %, за счет внедрения в систему вспомогательного блока с напорными и сливными линиями с заданным уровнем давления и с установленным аккумулятором.

### Заключение

В ходе выполненной работы было выявлено, что предложенная улучшенная гидросистема с объемной адаптацией к нагрузке обеспечивает повышение энергоэффективности до 20 % по сравнению с типовой системой за счет установки в линию промежуточного давления вспомогательного блока с аккумулятором, который восстанавливает потери затрачиваемой энергии. Сформированные математические модели типовой и улучшенной гидросистем позволили получить расчетные значения параметров работы мобильной машины, определяющие ее энергоэффективность, в результате чего был сформирован вывод об энергоэффективности работы гидросистемы.

### Список цитированных источников

6. Стасенко, Д. Л. Сравнительный анализ гидросистем с адаптацией к нагрузке мобильных машин / Д. Л. Стасенко, А. А. Гинзбург, Е. В. Хазеев // Зимняя сессия : VI Междунар. науч. конф., Боровец, Болгария, 8–11 дек. 2021 г. / Науч. техн. союз машиностроения «Индустрия 4.0». – Боровец, 2021. – С. 189–192.
7. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / И. И. Бажин [и др.] ; под общ. ред. С. А. Ермакова. – М. : Машиностроение, 1988. – 312 с.
8. Гинзбург, А. А. Направления повышения энергетической эффективности и надежности гидравлических LS-систем / А. А. Гинзбург, Е. В. Хазеев // Механизмы развития научно-технического потенциала : тезисы доп. I Междунар. науч.-практ. интернет-конф., 11–12 ноября 2021 г. – Днепр : ФЛП Марениченко В. В., 2021. – С. 101–103.
9. Гинзбург, А. А. Сравнение однопоточных гидросистем с объемной и клапанной адаптацией к нагрузке по уровню потерь мощности / А. А. Гинзбург, Д. Л. Стасенко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 3 (44). – С. 67–74.
10. Хазеев, Е. В. Сравнительный анализ теоретического и прикладного моделирования гидравлических систем с объемной адаптацией к нагрузке / Е. В. Хазеев, Д. Л. Стасенко // Актуальные вопросы машиноведения : сборник научных трудов. – Минск, 2022. – Т. 11. – С. 22–27.

### References

1. Stasenka, D. L. Sravnitel'nyj analiz gidrosistem s adaptaciej k nagruzke mobil'nyh mashin / D. L. Stasenka, A. A. Ginzburg, E. V. Hazeev // Zimnyaya sessiya : VI Mezhdunar. nauch. konf., Borevec, Bolgariya, 8–11 dek. 2021 g. / Nauch. tekhn. soyuz mashinostroeniya «Industriya 4.0». – Borevec, 2021. – S. 189–192.
2. Avtomatizirovannoe proektirovanie mashinostroitel'nogo gidroprivoda / I. I. Bazhin [i dr.] ; pod obshch. red. S. A. Ermakova. – M. : Mashinostroenie, 1988. – 312 s.
3. Ginzburg, A. A. Napravleniya povysheniya energeticheskoy effektivnosti i nadezhnosti gidravlicheskih LS-sistem / A. A. Ginzburg, E. V. Hazeev // Mekhanizmy razvitiya nauchno-tekhnicheskogo potenciala : tezisy dop. I Mezhdunar. nauch.-prakt. internet-konf., 11–12 noyabrya 2021 g. – Dnepr : FLP Marenichenko V. V., 2021. – S. 101–103.
4. Ginzburg, A. A. Sravnenie odnopotochnyh gidrosistem s ob'emnoj i klapanno adaptaciej k nagruzke po urovnyu poter' moshchnosti / A. A. Ginzburg, D. L. Stasenka // Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov. – 2018. – № 3 (44). – S. 67–74.
5. Hazeev, E. V. Sravnitel'nyj analiz teoreticheskogo i prikladnogo modelirovaniya gidravlicheskih sistem s ob'emnoj adaptaciej k nagruzke / E. V. Hazeev, D. L. Stasenka // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya : sbornik nauchnyh trudov. – Minsk, 2022. – T. 11. – S. 22–27.

*Материал поступил 21.08.2023, одобрен 28.11.2023, принят к публикации 28.11.2023*

## ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АБРАЗИВНО-ОТРЕЗНОГО СТАНКА С КАЧАЮЩЕЙСЯ ШПИНДЕЛЬНОЙ БАБКОЙ

**Н. А. Старовойтов<sup>1</sup>, С. В. Рогов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> К. т. н. доцент кафедры «Технология машиностроения» УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Гомель, Беларусь, e-mail: starnik49@mail.ru

<sup>2</sup> Старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Гомель, Беларусь

### Реферат

Приведены результаты экспериментальных исследований амплитудно-фазово-частотных характеристик (АФЧХ) абразивно-отрезного станка с качающейся шпиндельной бабкой и с регулируемым главным приводом для поддержания постоянной скорости резания при износе абразивно-отрезного круга.

При исследовании гидромеханической системы станка установлено, что из частотного спектра колебаний шпинделя с абразивно-отрезным кругом можно выделить четыре критические частоты: 22, 58, 78 и 126 Гц.

Критическая частота 22 Гц обусловлена первой собственной частотой нижней опоры гидроцилиндра подачи. Критическая частота 58 Гц обусловлена первой собственной частотой колебаний шпинделя с абразивно-отрезным кругом относительно корпуса шпиндельной бабки. Критическая частота 78 Гц обусловлена первой собственной частотой колебаний гидроцилиндра. Критическая частота 126 Гц обусловлена первой собственной частотой колебаний корпуса качалки.

**Ключевые слова:** амплитудно-фазово-частотные характеристики, критические частоты, абразивно-отрезной круг.

### STUDY OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF ABRASIVE-CUTTING MACHINE WITH OSCILLATING SPINDLE HEADSTOCK

**N. A. Starovoirov, S. V. Rogov**

### Abstract

The results of experimental studies of amplitude-phase-frequency characteristics of an abrasive-cutting machine with an oscillating spindle headstock and with an adjustable main drive for maintaining a constant cutting speed during abrasive-cutting wheel wear are presented.

At research of the hydromechanical system of the machine tool it is established that from the frequency spectrum of vibrations of the spindle with abrasive-cutting wheel it is possible to allocate four critical frequencies: 22, 58, 78 and 126 Hz.

The critical frequency of 22 Hz is caused by the first natural frequency of the lower support of the hydraulic feed cylinder. The critical frequency of 58 Hz is caused by the first natural frequency of oscillation of the spindle with cut-off wheel relative to the spindle headstock housing. The critical frequency of 78 Hz is caused by the first natural frequency of oscillation of the hydraulic cylinder. The critical frequency 126 Hz is caused by the first natural frequency of oscillations of the rocker housing.

**Keywords:** amplitude-phase-frequency characteristics, critical frequencies, abrasive cutting wheel.

### Введение

Одним из основных источников повышения эффективности абразивно-отрезных станков с качающейся шпиндельной бабкой и с регулируемым главным приводом для поддержания постоянной скорости резания при износе абразивно-отрезного круга является уменьшение затрат на абразивно-отрезные круги, которые достигают до 70 % в стоимости одного реза [1].

При поддержании постоянной скорости резания при износе абразивно-отрезного круга диаметром 0,4 м со скоростью 50 или 80 м/с, частота вращения круга плавно увеличивается от 40 до 225 с<sup>-1</sup>, что приводит к интенсивному возрастанию амплитуды вынужденных гармонических колебаний круга из-за дисбаланса. Необходимо отметить, что в связи с быстрым износом абразивно-отрезные круги не принято балансировать.

Применение регулируемого главного привода для поддержания постоянной скорости резания при износе круга приводит к уменьшению износа круга и затрат на инструмент 25–30 % [2].

Плавное изменение частоты вращения шпинделя в широком диапазоне частот может приводить к совпадению частоты вынужденных гармонических колебаний круга с собственной частотой одного из элементов контуров гидромеханической системы. Это в свою очередь вызывает дополнительный рост амплитуды колебаний круга и повышению его износа.

Обе эти причины в абразивно-отрезных станках с качающейся шпиндельной бабкой и регулируемым главным приводом для поддержания постоянной скорости резания при износе круга часто приводят к низкой виброустойчивости и, как следствие, повышенному износу абразивно-отрезного круга вместо ожидаемого его уменьшения.

В связи с изложенным, уменьшение износа абразивно-отрезных кругов за счёт повышения виброустойчивости гидромеханической системы абразивно-отрезных станков с качающейся шпиндельной бабкой и с регулируемым главным приводом для поддержания постоянной скорости резания при износе абразивно-отрезного круга является весьма актуальной задачей.

Целью работы является исследование АФЧХ абразивно-отрезных станков для повышения виброустойчивости гидромеханической системы абразивно-отрезных станков с качающейся шпиндельной бабкой и регулируемым главным приводом для поддержания постоянной скорости резания при износе круга.

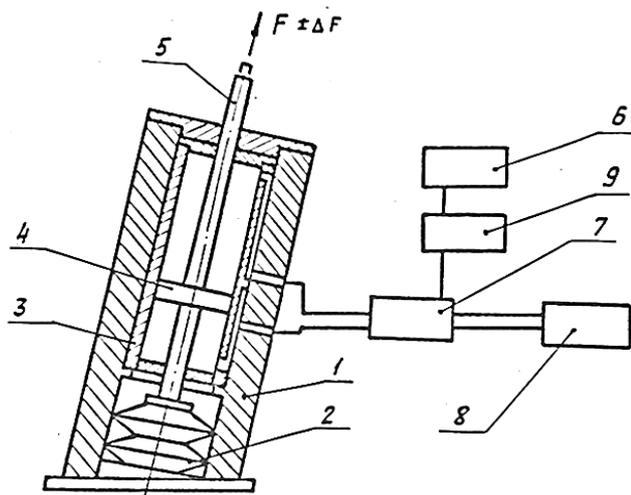
### Постановка задачи, методика исследования

Экспериментальные исследования АФЧХ проводились на абразивно-отрезном станке-стенде мод.8В242. На станке-стенде для управления электроавтоматикой станка использовалось цифровое программируемое устройство ЛИР581, частотный преобразователь ЭКТ-63/380-У4 для поддержания постоянной скорости резания 80 м/с с передаточным отношением между шкивами шпинделя и электродвигателя равным 1:1 [2].

При исследовании гидромеханической системы абразивно-отрезного станка маятниковой схемой резания на холостом ходу выявлено, что на некоторых частотах вращения круга происходит увеличение амплитуды колебаний шпинделя. Чтобы определить более точно частоты, на которых увеличение амплитуды колебаний, производилось снятие АФЧХ частотными методами с помощью вибратора оригинальной конструкции.

Вибратор изготовлен на базе гидроусилителя с пропорциональным управлением модели УЭГ.Г-20 (рисунок 1). Постоянная составляющая силы  $F$  создавалась за счёт сжатия тарельчатых пружин 2, при этом в пределах перемещения штока гидроцилиндра 5, в результате приложения переменной составляющей  $\Delta F$ , постоянная составляющая оставалась неизменной.

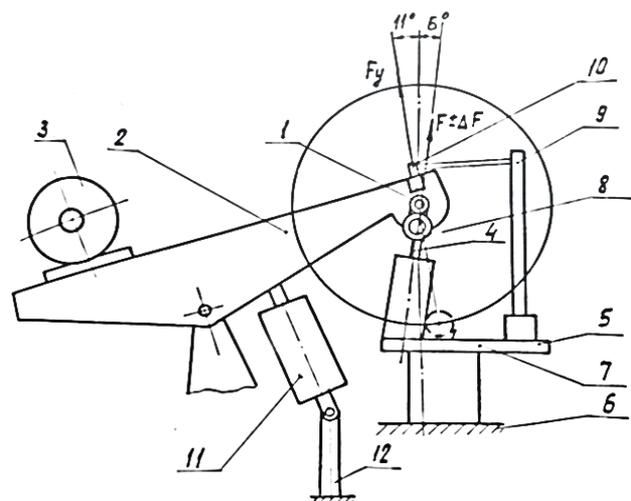
Сигнал заданной частоты поступал с генератора 6 на усилитель электрогидравлический 7, размещённый непосредственно на корпусе гидроцилиндра 1, где он преобразовывался в пропорциональный ему поток масла, поступающий с оригинальной гидростанции 8 большой производительности, равной  $Q = 0,005 \text{ М}^3$ .



- 1 – корпус; 2 – тарельчатые пружины; 3 – цилиндр;
- 4 – поршень; 5 – шток; 6 – генератор ГЗ-110;
- 7 – усилитель электрогидравлический УЭГ.Г-20; 8 – гидростанция;
- 9 – усилитель небаланса УН-М

Рисунок 1 – Вибратор электрогидравлический

Датчик силы 8, (рисунок 2), выполнен на основе тензорезисторов 2ПКБ-20-100, изготовлен в виде кольца из пружинной стали и тщательно тарировался в пределах плюс/минус  $250 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  с тем же усилением, с которым производилась запись осциллограмм силы.



- 1 – шейка шпинделя; 2 – корпус качалки; 3 – электродвигатель;
- 4 – электрогидравлический вибратор; 5 – опора; 6 – станина;
- 7 – стол; 8 – датчик силы; 9 – стойка;
- 10 – бесконтактный датчик колебаний; 11 – гидроцилиндр подачи;
- 12 – нижняя опора гидроцилиндра

Рисунок 2 – Схема установки электрогидравлического вибратора

Корпус бабки 2 устанавливался так, что кромка круга диаметром 0,4 м проходила через ось заготовки, что соответствовало расстоянию 0,05 м поршня гидроцилиндра от его верхней крышки.

Схема взаимодействия аппаратов и подключения приборов электроизмерительного комплекса приведена на рисунке 3.

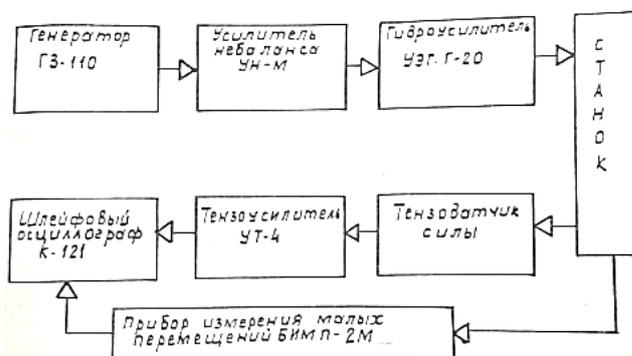


Рисунок 3 – Схема взаимодействия аппаратов и подключения приборов электроизмерительного комплекса

Частотная передаточная функция  $W_{\text{эус}}$  эквивалентной упругой системы является комплексным выражением, модуль которого равен отношению амплитуды  $\Delta a$  по нормали к поверхности резания и амплитуде  $\Delta F$ , направление которой совпадает с направлением силы резания, а аргумент – сдвигу фаз  $\varphi$  между силой  $\Delta F$  и амплитудой колебаниями  $\Delta a$ .

$$W_{\text{эус}} = \frac{a(i\omega)}{F(i\omega)} \quad (1)$$

В связи с этим вибратор 4 устанавливается на стол 7 так, чтобы ось его совпадала с направлением  $17^\circ$  силы резания  $F_y$ . Бесконтактный датчик амплитуды колебаний 10 устанавливался на жёсткой стойке 9, которая крепилась на столе 7, на том же платике, что и вибратор 4.

Ось датчика устанавливалась перпендикулярно поверхности резания, что совпадает в абразивно-отрезных станках с осью Z.

Датчик силы 8 крепился на штоке вибратора 4 и взаимодействовал с шейкой шпинделя 1 в месте крепления абразивно-отрезного круга. На резьбовой конец шпинделя 1 наворачивалась гайка с лыской и устанавливалась так, что лыска была перпендикулярна оси датчика 10, а шпиндель 1 стопорился от вращения вокруг оси. С целью исключения резонансных явлений замерялась собственная частота стойки 9 для крепления бесконтактного датчика колебаний 10, а шпиндель 1 стопорился от вращения вокруг своей оси.

С целью исключения резонансных явлений замерялась собственная частота колебаний стойки 9. Для этого к ней прилагался импульс силы и записывалась осциллограмма её колебаний. Измерения показывают, что частота колебаний стойки 9 на порядок выше частот, возбуждаемых вибратором 4.

Для сокращения количества измерений и ориентировочного определения критических частот производилась предварительная непрерывная запись осциллограмм через каждые 2 Гц. Затем в области критических частот производилась запись осциллограмм с максимальным увеличением амплитуды осциллограммы для более точного её определения.

Осциллограммы снимались с помощью программы Power Graph Professional с применением сетевых фильтров DL-100EA1 для подавления высокочастотных составляющих тока и напряжения. Оцифровка графиков производилась с помощью программы GraphDigit. Переменная составляющая силы  $\Delta F$  выбиралась минимальной и была равна 40–60 Н.

Статическая характеристика определялась путём при составляющей  $\Delta F = 0$ . Данные заносились в таблицу и по ним построен график статической характеристики гидромеханической упругой системы, рисунок 4. Коэффициент статической характеристики равен  $K_{\text{yc}} = 0,265 \cdot 10^{-6} \text{ м/н}$ , суммарная жёсткость упругой системы равна  $J = 3,77 \cdot 10^{-6} \text{ н/м}$ .

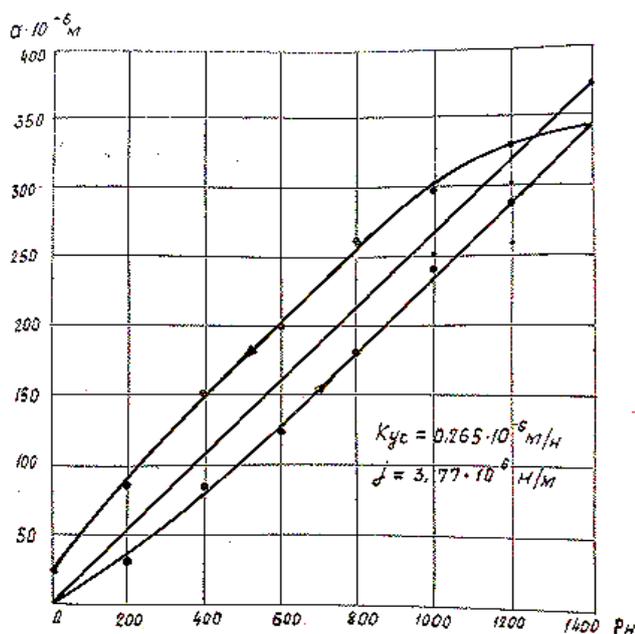


Рисунок 4 – Статическая характеристика гидромеханической упругой системы абразивно-отрезного станка с качающейся шпиндельной бабкой

Величина отношения  $A_{yc}(f) = F \frac{\Delta a}{\Delta F}$  амплитуды вибро-

перемещения  $\Delta a$  к переменной силы  $\Delta F$  и величина между ними фазы  $\Delta \varphi$  заносились в таблицу, и по ним строился график логарифмической АФЧХ замкнутой гидромеханической системы абразивно-отрезного станка, рисунок 5. Логарифмическая АФЧХ строилась в соответствии с правилами и рекомендациями, изложенными в источнике [3]. Анализ АФЧХ показывает, что гидромеханическая система станка имеет четыре критических частоты 22, 58, 78 и 126 Гц.

Критическая частота 22 Гц обусловлена первой собственной частотой нижней опоры гидроцилиндра подачи, является определяющей для контура, хотя и лежит вне диапазона исследуемых частот 40–160 Гц. При её ужесточении до  $1,5 \cdot 10^8$  н/м, что уменьшило амплитуду колебаний 1,4 раза.

Критическая частота 126 Гц обусловлена первой собственной частотой корпуса качалки. Увеличенная амплитуда колебаний на этой частоте вызвана на его изгибными колебаниями относительно точки крепления штока гидроцилиндра, что подтверждается при замере амплитуды колебаний в точке 1 и 8 (рисунок 2).

Критическая частота 78 Гц обусловлена собственной частотой гидроцилиндра и её виброскорость, равная  $v = 0,00005$  м/с, не вызывает значительного усиления виброскорости шпинделя, что подтверждается при замерах в точках крепления гидроцилиндра. Отставание по фазе изменения давления в штоковой полости гидроцилиндра относительно изменения виброскорости минимальное и практически равно нулю, что соответствует максимальному демпфированию гидроприводом. Определённая приближенно-расчетным путём собственной частоты гидропривода по формуле, приведённой в источнике [3], при расположении поршня на расстоянии 0,05 м от верхней крышки гидроцилиндра равна 73 Гц, что удовлетворительно согласуется с результатами, полученными при снятии АФЧХ.

Расчитанные приближенно по той же формуле собственные частоты гидроцилиндра при верхнем и нижнем расположении поршня – соответственно равны 65 и 120 Гц – и являются пределами изменения собственных частот гидроцилиндра.

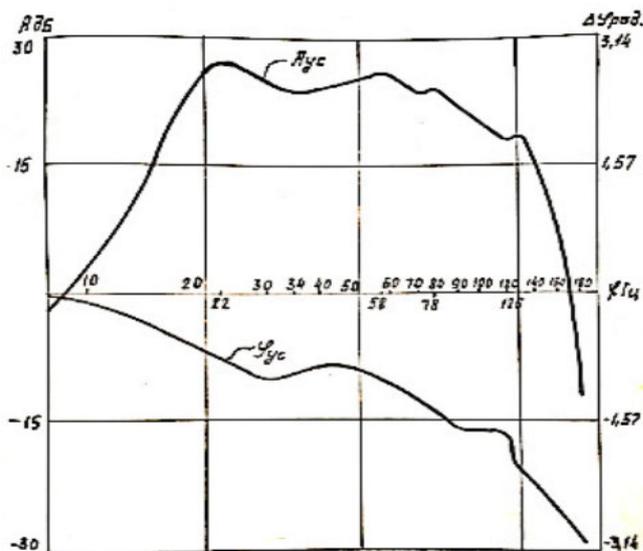


Рисунок 5 – Амплитудно-частотная-фазовая логарифмическая характеристика замкнутой гидромеханической системы абразивно-отрезного станка с качающейся шпиндельной бабкой

Критическая частота 58 Гц обусловлена первой собственной частотой колебаний шпинделя относительно корпуса шпиндельной бабки, что подтверждается замерами (рисунок 6).

Таким образом, критические частоты 58 и 126 Гц, также изменяющиеся в широком диапазоне 65–120 Гц собственные частоты гидроцилиндра, лежат в диапазоне исследуемых частот 40–160 с<sup>-1</sup> вращения шпинделя и электродвигателя. При использовании регулируемого главного привода для поддержания постоянной скорости резания, частота вращения шпинделя и электродвигателя меняется в пределах исследуемых частот и может совпадать с критическими частотами упругой гидромеханической системы. Это вызывает резонансные явления, что приводит к увеличению виброскорости круга, что увеличивает его износ.

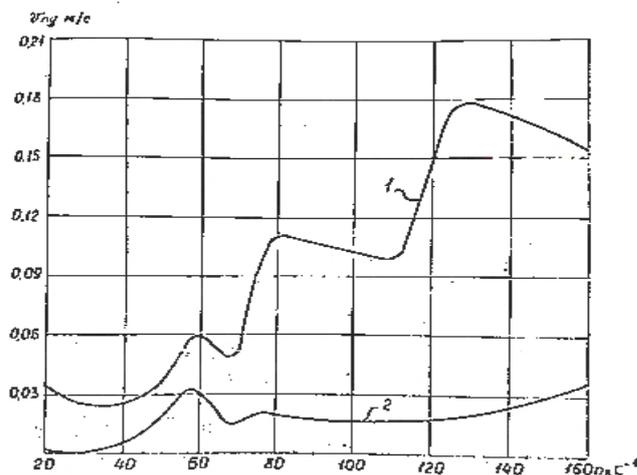
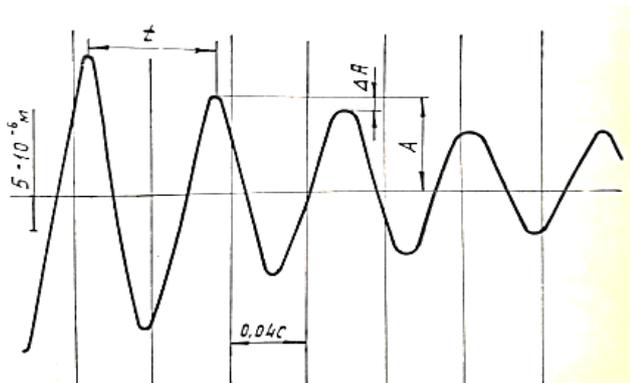


Рисунок 6 – Зависимость амплитуды виброскорости шпинделя  $V_{vy}$  относительно стола (1) и относительно корпуса качалки (2) от частоты  $n_k$  его вращения

Для определения инерционной постоянной времени, постоянной времени демпфирования и логарифмического декремента колебаний упругой гидромеханической системы, через стальную струну прикладывалась статическая нагрузка 90–100 Н, затем проволока перерезалась. Происходящий процесс в гидромеханической системе осциллографировался (рисунок 7).



**Рисунок 7** – Переходной процесс в упругой гидромеханической системе абразивно-отрезного станка с качающейся шпиндельной бабкой при ступенчатой нагрузке силой 90 Н

Инерционная постоянная времени  $T_1$ , постоянная времени демпфирования  $T_2$  и логарифмический декремент колебаний  $\lambda$  определялись по формулам, приведённым в источнике [4].

$$T_1 = \frac{t}{2\pi} = 1,06 \cdot 10^{-2} \text{ с}, \quad (2)$$

где  $t$  – время периода колебаний,

$$T_2 = \frac{\Delta A}{2\pi} \cdot T_1 = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad (3)$$

где  $\Delta A$  – переменная амплитуды колебаний,

$$\lambda = \ln \frac{A}{A - \Delta A} = 0,202. \quad (4)$$

Собственная частота системы, определённая способом ступенчатого воздействия на упругую системы, равна 15 Гц и обусловлена первой собственной частотой нижней опоры гидроцилиндра. Она незначительно меньше частоты, которая определена методом гармонического воздействия, что можно объяснить отсутствием приложения постоянной силы при исследовании упругой системы данным способом и погрешность измерений.

### Заключение

На основании проведённых экспериментальных исследований гидромеханической системы станка можно сделать следующие выводы:

1. Гидромеханическая система станка с качающейся шпиндельной бабкой имеет четыре критические частоты 22, 58, 78 и 126 Гц, обусловленные соответственно первой собственной частотой нижней опоры гидроцилиндра, шпинделя, корпуса шпиндельной бабки. При этом собственная частота гидроцилиндра 78 Гц может меняться в широких пределах от 65 до 120 Гц в зависимости от положения поршня.

2. Увеличение частоты вращения круга при его износе от 40 до 160 с<sup>-1</sup> приводит к совпадению частоты вынужденных колебаний круга с собственной частотой одного из элементов контура гидромеханической системы, резко увеличивает амплитуду колебаний, что является основной причиной низкой виброустойчивости гидромеханической системы абразивно-отрезных станков с качающейся шпиндельной бабкой и регулируемым главным приводом.

3. Кинематическим источником возбуждения колебаний является дисбаланс шпинделя со шкивом и абразивно-отрезным кругом, также ротора со шкивом.

4. Для уменьшения амплитуды колебаний круга ужесточена нижняя опора гидроцилиндра до  $1,5 \cdot 10^8$  н/м, что увеличило её критическую частоту до 37 Гц снизило амплитуду колебаний 1,4 раза.

5. Снижение амплитуды колебаний на частотах 37 Гц, что привело к снижению износа круга в среднем на 7 %.

6. При поддержании постоянной скорости резания «вырезаны» критические частоты вращения круга, равные 37, 58, и 126 Гц во избежание резонансных явлений.

### Список цитированных источников

1. Старовойтов, Н. А. Анализ путей повышения эффективности абразивно-отрезных станков с качающейся шпиндельной бабкой / Н. А. Старовойтов, С. В. Рогов // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22–23 нояб. 2018. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 37–40.
2. Старовойтов, Н. А. Экспериментальные исследования эффективности поддержания постоянной скорости резания на абразивно-отрезных станках с качающейся шпиндельной бабкой / Н. А. Старовойтов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2019. – № 3 (64). – С. 84–92.
3. Белов, В. С. Повышение точности и виброустойчивости протяжных станков / В. С. Белов, Г. М. Иванов. – М. : НИИМАШ, 1978. – 180 с.
4. Кудинов, В. А. Динамические частотные характеристики процесса шлифования / В. А. Кудинов, В. М. Гришин // Станки и инструмент. – 1972. – № 1. – С. 7–9.
5. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1967. – 300 с.

### References

1. Starovojtov, N. A. Analiz putej povysheniya effektivnosti abrazivno-otreznyh stankov s kachayushcheysya shpindel'noj babkoy / N. A. Starovojtov, S. V. Rogov // Sovremennye problemy mashinovedeniya : materialy XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Gome'l', 22–23 noyab. 2018. – Gome'l' : GGTU im. P. O. Suhogo, 2018. – S. 37–40.
2. Starovojtov, N. A. Eksperimental'nye issledovaniya effektivnosti podderzhaniya postoyannoy skorosti rezaniya na abrazivno-otreznyh stankah s kachayushcheysya shpindel'noj babkoy / N. A. Starovojtov // Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta. – 2019. – № 3 (64). – S. 84–92.
3. Belov, V. S. Povysheenie tochnosti i vibroustojchivosti protyazhnyh stankov / V. S. Belov, G. M. Ivanov. – M. : NIIMASH, 1978. – 180 s.
4. Kudinov, V. A. Dinamicheskie chastotnye harakteristiki processa shlifovaniya / V. A. Kudinov, V. M. Grishin // Stanki i instrument. – 1972. – № 1. – S. 7–9.
5. Kudinov, V. A. Dinamika stankov / V. A. Kudinov. – M. : Mashinostroenie, 1967. – 300 s.

*Материал поступил 22.02.2024, одобрен 14.03.2024, принят к публикации 18.03.2024*

## РАСЧЕТ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПЛАНЕТАРНЫХ ШАРИКОВЫХ И РОЛИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ

**А. В. Капитонов**

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

### Реферат

В статье рассмотрены вопросы, связанные с оценкой напряжений и упругих деформаций в планетарных шариковых и роликовых передачах. На основе методов определения контактных напряжений и деформаций соприкасающихся тел разработана методика и предложены математические зависимости расчета контактных напряжений и перемещений деталей зацепления этих передач от действия нормальных сил. Представлены значения наибольших контактных напряжений и деформаций звеньев планетарной шариковой и роликовой передачи, полученные расчетом по разработанной методике и характеризующие нагрузочную способность и точность передачи. Разработаны компьютерные модели, позволяющие рассчитать контактные и изгибные напряжения и деформации и дать оценку напряженно-деформированного состояния исследуемой роликовой передачи с учетом действующих одновременно на детали зацепления внешних нормальных сил.

**Ключевые слова:** планетарные шариковые и роликовые передачи, напряжения, деформации, компьютерное моделирование.

## CALCULATION AND COMPUTER MODELING OF STRESSES AND DEFORMATIONS OF PLANETARY BALL AND ROLLER GEARS

**A. V. Kapitonov**

### Abstract

The article discusses issues related to the assessment of stresses and elastic deformations in planetary ball and roller gears. On the basis of methods for determining contact stresses and deformations of contacting bodies, a methodology has been developed and mathematical dependences of calculating contact stresses and displacements of the gearing parts of these gears on the action of normal forces have been proposed. The values of the greatest contact stresses and deformations of the links of the planetary ball and roller gears, obtained by calculation according to the developed methodology and characterizing the load capacity and transmission accuracy, are presented. Computer models have been developed to calculate contact and bending stresses and deformations and to assess the stress-strain state of the studied roller transmission, taking into account the external normal forces acting simultaneously on the engagement parts.

**Keywords:** planetary ball and roller gears, stresses, deformations, computer modeling.

### Введение

Объектами исследования являются малогабаритные планетарные шариковые радиально-плунжерные и роликовые передачи торцового типа [1–3]. Их преимущества в сравнении с зубчатыми и червячными передачами заключаются в невысокой стоимости, небольших массогабаритных характеристиках, соосном расположении валов, больших передаточных отношениях, модульном принципе сборки, позволяющем создавать конструкции многоступенчатых механизмов с передаточными отношениями более 10000. Многие конструкции этих передач доведены до практической реализации. Они используются в приводах машин, механизмов и технологического оборудования, например, в приводе станка монтажа автомобильных шин, в механизме подъема кабины лифта, в лебедке для ручного подъема крышки шахтной печи, для размыкания контактов железнодорожной электролинии, в механизмах для усиления крутящих моментов, в приводах высокоточных технологических приспособлений. Учитывая малогабаритные конструкции и высокие кинематические и силовые характеристики, планетарные шариковые и роликовые передачи могут эффективно использоваться в мехатронных устройствах автоматизированного производства.

Звенья этих передач могут испытывать большие контактные напряжения, что является одной из важных проблем при создании их конструкций, при использовании в силовых приводах подъемных механизмов и лебедок. Большие упругие контактные деформации приводят к снижению точности этих передач, увеличению кинематической погрешности. Известны конструкции планетарных передач с телами качения шариками и роликами [4–8], подтвержденные патентами, с меньшим влиянием контактных напряжений, более высокой нагрузочной способностью и кинематической точностью. Приведены методики расчета на прочность этих передач и редукторов по контактным напряжениям [1, 2]. Однако для планетарных шариковых и

роликовых механизмов не представлены математические зависимости и методики, позволяющие рассчитать контактные напряжения и деформации (перемещения) в звеньях, не проведена оценка контактных напряжений на нагрузочную способность и контактных деформаций на кинематическую точность передачи.

### Методика расчета контактных напряжений и деформаций звеньев планетарных шариковых и роликовых передач

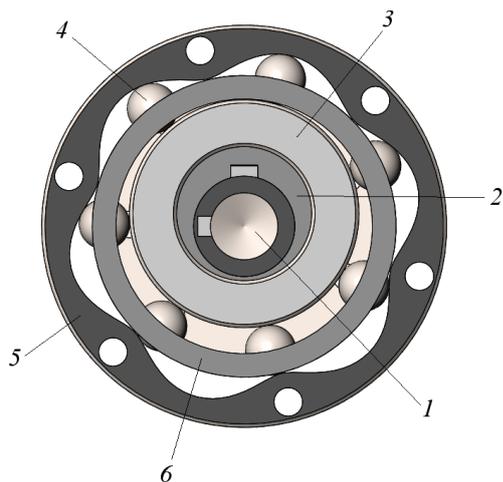
Применим методы расчета контактных напряжений и деформаций соприкасающихся тел [9–11] к расчету исследуемых передач.

Условие прочности деталей зацепления по контактным напряжениям

$$\sigma_i \leq [\sigma_H], \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – расчетное контактное напряжение  $i$ -й контактной пары соприкасающихся деталей;  $[\sigma_H]$  – допускаемое контактное напряжение.

Наибольшие напряжения возникают в шариковых передачах (рисунок 1), так как контактирующими элементами являются сателлиты-шарики 4 с небольшими поверхностями контакта, взаимодействующие с ведущей 3 и неподвижной 5 беговыми дорожками, а также с рабочими поверхностями водила-сепаратора 6. При вращении ведущего вала 1, эксцентрика 2 и подшипника 3, цилиндрическая наружная поверхность которого представляет ведущую беговую дорожку, сателлиты-шарики 4 катятся по поверхности подшипника 3 и по внутренней поверхности многопериодной дорожки колеса 5, увлекая за собой водило-сепаратор 6 через отверстия в сепараторе. При перемещении сателлитов под нагрузкой наибольшие силы возникают по нормали к поверхностям контакта. Эти силы направлены на сателлит и на детали зацепления. В [1, 2] представлены зависимости для расчета сил, действующих в шариковой радиально-плунжерной передаче.



1 – ведущий вал; 2 – эксцентрик; 3 – подшипник (ведущая дорожка); 4 – сателлит-шарик; 5 – колесо с неподвижной многопериодной дорожкой; 6 – водило-сепаратор

**Рисунок 1** – Схема зацепления планетарной шариковой передачи

**Контакт сателлита-шарика с ведущим кольцом.** В ведущем звене планетарной шариковой передачи наружная поверхность подшипника (ведущая дорожка) 3, установленного на эксцентрик 2, соединенный с ведущим валом 1, является однопериодной беговой дорожкой и имеет форму окружности, смещенной относительно оси вращения ведущего вала 1 на заданный эксцентриситет. Напряжение контактирующих элементов сателлита-шарика 4 и подшипника 3 можно определить по формуле соприкасающихся сферических тел [9–11] с учетом поправочных коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  [2, 12]:

$$\sigma_{1ш} = 0,338 \sqrt[3]{\frac{F_1 E^2 (R_1 + R_2)^2 K_1 K_3}{R_1^2 R_2^2 K_2}}, \quad (2)$$

где  $F_1$  – нормальная сила, приложенная к ведущему кольцу;  $E$  – модуль упругости, принятый одинаковым для материала сателлита-шарика и ведущего кольца;  $R_1$  – радиус ведущего кольца;  $R_2$  – радиус сателлита-шарика;  $K_1$  – коэффициент нагрузки сателлита;  $K_2$  – коэффициент неравномерности распределения нагрузки между сателлитами из-за погрешностей изготовления деталей зацепления;  $K_3$  – динамический коэффициент, связанный с погрешностями изготовления и кинематической погрешностью передачи.

Поправочные коэффициенты учитываются во всех последующих формулах расчета контактных напряжений и деформаций планетарных шариковых и роликовых передач.

Радиус поверхности контакта сателлита-шарика с ведущим кольцом

$$r_{1ш} = 1,109 \sqrt[3]{\frac{F_1 R_1 R_2 K_1 K_3}{E (R_1 + R_2) K_2}}. \quad (3)$$

В результате деформации двух контактирующих поверхностей происходит суммарное перемещение оси сателлита к оси симметрии эксцентрика

$$h_{1ш} = 1,23 \sqrt[3]{\frac{F_1^2 (R_1 + R_2) K_1 K_3}{E^2 R_1 R_2 K_2}}. \quad (4)$$

**Контакт сателлита-шарика с неподвижной многопериодной дорожкой.** В неподвижном звене многопериодная дорожка колеса 5 (рисунок 1) является эквидистантой к кривой, описываемой уравнением смещенной окружности [1–3]. Напряжение контактирующих поверхностей, учитывая большой радиус кривизны многопериодной дорожки колеса 5 в месте контакта с сателлитом-шариком 4, можно определить по формуле соприкасающихся сферического тела и плоскости

$$\sigma_{2ш} = 0,338 \sqrt[3]{\frac{F_2 E^2 K_1 K_3}{R_2^2 K_2}}, \quad (5)$$

где  $F_2$  – нормальная сила, приложенная к поверхности многопериодной дорожки.

Радиус поверхности контакта сателлита-шарика и многопериодной дорожки

$$r_{2ш} = 1,109 \sqrt[3]{\frac{F_2 R_2 K_1 K_3}{E K_2}}. \quad (6)$$

Перемещение оси сателлита по нормали к многопериодной дорожке в результате суммарной деформации контактирующих поверхностей

$$h_{2ш} = 1,23 \sqrt[3]{\frac{F_2^2 K_1 K_3}{E^2 R_2 K_2}}. \quad (7)$$

**Контакт сателлита-шарика с отверстием водила-сепаратора.** В ведомом звене напряжение контактирующих поверхностей можно определить по формуле соприкасающихся шара и шаровой сферы

$$\sigma_{3ш} = 0,338 \sqrt[3]{\frac{F_3 E^2 (R_1 - R_2)^2 K_1 K_3}{R_1^2 R_2^2 K_2}}, \quad (8)$$

где  $F_3$  – нормальная сила, приложенная к поверхности отверстия водила-сепаратора;  $R_1$  – радиус отверстия водила-сепаратора.

Радиус поверхности контакта сателлита-шарика с отверстием водила-сепаратора

$$r_{3ш} = 1,109 \sqrt[3]{\frac{F_3 R_1 R_2 K_1 K_3}{E (R_1 - R_2) K_2}}. \quad (9)$$

Перемещение оси сателлита по нормали к водило-сепаратору в результате деформации контактирующих поверхностей

$$h_{3ш} = 1,23 \sqrt[3]{\frac{F_3^2 (R_1 - R_2) K_1 K_3}{E^2 R_1 R_2 K_2}}. \quad (10)$$

Схему зацепления, представленную на рисунке 1, можно применить и для расчета других типов планетарных передач с промежуточными телами качения – роликами.

**Контакт сателлита-ролика с ведущим кольцом.** Ведущая беговая дорожка представляет, также, как и для шариковой передачи, наружную поверхность ведущего кольца, эксцентрично установленного относительно оси ведущего вала. Напряжение контактирующих элементов сателлита-ролика и ведущего кольца можно определить по формуле пересекающихся цилиндров

$$\sigma_{1р} = \alpha \sqrt[3]{\frac{F_1^2 E^2 K_1 K_3}{R_2^2 K_2}}, \quad (11)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от коэффициентов уравнения эллипса касания;  $R_2$  – радиус цилиндра сателлита-ролика.

**Контакт сателлита-ролика с многопериодной дорожкой или водило-сепаратором.** В роликовой передаче многопериодная дорожка также, как и в шариковой, в точках контакта имеет большие радиусы кривизны (практически плоскую поверхность), а водило-сепаратор имеет прямолинейные пазы, поверхности которых взаимодействуют с сателлитами-роликами, поэтому напряжение этих контактирующих элементов можно определить по формуле соприкасающихся цилиндра и плоскости

$$\sigma_{23р} = 0,418 \sqrt[3]{\frac{F_{23} E K_1 K_3}{l R K_2}}, \quad (12)$$

где  $F_{23}$  – нормальная сила, приложенная к поверхностям многопериодной дорожки или паза водила-сепаратора;  $l$  – длина сателлита-ролика.

Половина ширины контакта сопрягаемых поверхностей

$$b_{23р} = 1,52 \sqrt[3]{\frac{F_{23} R K_1 K_3}{l E K_2}}. \quad (13)$$

Поверхность контакта сателлита-ролика с сопрягаемым цилиндром или плоскостью представляет собой узкий эллипс и в пределе превращается в узкий прямоугольник. Перемещения (деформации) в

роликовом зацеплении определялись по зависимости [9] с учетом равномерного давления, распределенного по прямоугольнику

$$h_p^{cp} = m \frac{F_i(1 - \nu^2)}{E\sqrt{S}}, \quad (14)$$

где  $h_p^{cp}$  – средне перемещение в одном направлении;  $m$  – числовой коэффициент, зависящий от отношения полуосей  $a$  и  $b$  эллиптической границы поверхности контакта ( $a/b$ ) [9];  $F_i$  – сила, приложенная нормально к поверхностям контакта деталей зацепления;  $E$  – модуль упругости;  $\nu$  – коэффициент поперечной деформации;  $S$  – площадь нагруженной области.

**Таблица** – Контактные напряжения и деформации деталей зацепления в шариковой и роликовой передаче

Звено передачи	Расчетная нормальная сила $F$ , Н	Напряжения расчетные $\sigma$ , МПа	Параметр контакта $r, b$ , мм	Перемещение 1, $h$ , мм	Перемещение 2, $h$ , мм
Сателлит-шарик с ведущей дорожкой	2546,5	3690,0	0,3185	0,0250	–
Сателлит-шарик с неподвижной дорожкой	2962,0	3301,5	0,3552	0,0253	–
Сателлит-шарик с сепаратором	1288,6	2125,7	0,2923	0,0133	–
Сателлит-ролик с ведущей дорожкой	2546,5	711,8	0,0483	0,0015	0,0046
Сателлит-ролик с неподвижной дорожкой	1481,0	687,8	0,0925	0,0019	0,0065
Сателлит-ролик с сепаратором	644,3	526,4	0,0704	0,0011	0,0037

В роликовой передаче сателлит-ролик находится в контакте с двумя поверхностями многопериодных дорожек и сепараторов, которые расположены зеркально относительно плоскости симметрии, проведенной перпендикулярно оси ролика. Поэтому на поверхность контакта сателлита-ролика действует сила в несколько раз меньше, чем на сателлит-шарик. В столбце «Перемещение 1» таблицы приведены значения, которые получены по зависимостям (2)...(14) и определяют нагруженность одного сателлита с учетом коэффициентов  $K_1 = 0,234$ ,  $K_2 = 0,8$  и  $K_3 = 1,01...1,09$  [2, 12]. При этом коэффициент  $K_1$  учитывает распределение нагрузки на все сателлиты передачи с неодинаковой их нагруженностью в зацеплении, которая зависит от углов подъема в местах контакта и, соответственно, с расположением сателлита на беговой дорожке. Наибольшие нагрузки передают сателлиты, находящиеся в середине подъема на среднем радиусе. Таким образом, в столбце «Перемещение 1» приведены значения с учетом контакта всех сателлитов передачи, но с неравномерным распределением нагрузки на каждый сателлит. В столбце «Перемещение 2» показаны значения перемещений с учетом действия всей нагрузки только на один сателлит в каждый момент времени для роликовой передачи. Этот случай возможен при больших погрешностях изготовления, когда при вращении происходит вхождение в зацепление только одного сателлита. В столбце «Перемещение 2» значения получены без учета коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ . Для шариковой передачи нагрузка на один сателлит может создавать большие упругие контактные напряжения, превышающие допустимые. Поэтому при заданных в таблице силах расчеты напряжений и перемещений в сопрягаемых деталях шариковой передачи при нагрузке на один шарик не проводились.

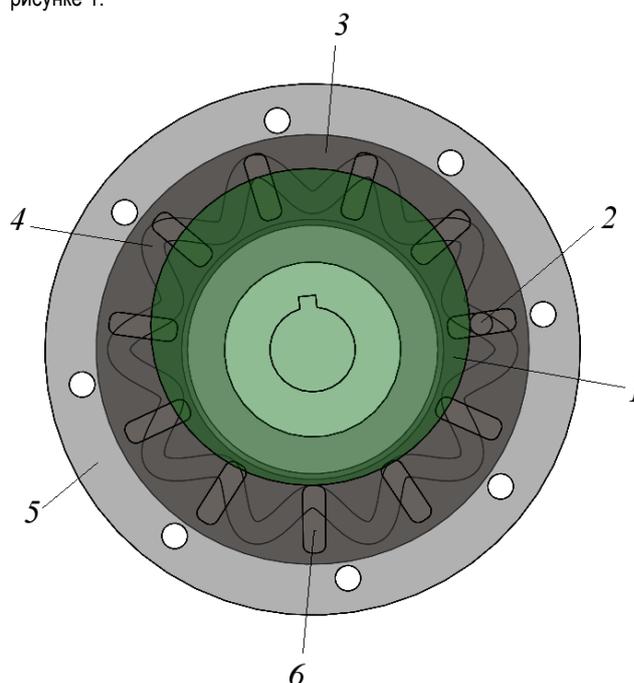
Как видно из таблицы, наибольшие контактные напряжения возникают в шариковой передаче. Они не превышают допустимого значения 3920 МПа, рассчитанного для заданных условий в соответствии с математическими зависимостями [2, 12], но являются предельными. При этом нагрузочная способность для шариковых передач ограничивается силовыми и габаритными параметрами. Для роликовых передач рассчитанные значения напряжений и перемещений меньше, чем для шариковых и нагрузочная способность выше. Однако в таблице показаны значения, полученные при контакте только двух сопрягаемых поверхностей, находящихся в зацеплении, и отдельно для каждого звена. При работе передачи на ее звенья действуют все рассматриваемые нормальные силы одновременно. В этом случае в роликовых передачах, кроме контактных напряжений, возникают напряжения при изгибе роликов, что приводит к увеличению их упругих перемещений, значения которых могут превышать значения контактных перемещений не только роликовых, но и шариковых передач. Эти суммарные упругие перемещения соизмеримы с погрешностями изготовления.

Используя математические зависимости (2)...(14), рассчитаны контактные напряжения и деформации (перемещения) звеньев планетарных шариковой и роликовой передач, для которых были приняты исходные данные: передаваемая мощность – 1500 Вт; угловая скорость ведущего вала – 157 с<sup>-1</sup>; передаточное отношение – 7; КПД – 0,8; диаметры сателлита-шарика – 15 мм, сателлита-ролика – 8 мм; материал деталей зацепления – сталь 40ХН, 48–54 НRC; средние радиусы шариковых и роликовых беговых дорожек, соответственно – 41,5 мм и 60 мм. В таблице представлены результаты расчетов контактных напряжений в звеньях передачи и перемещений центров сателлитов при упругих деформациях.

Они снижают кинематическую точность и плавность работы передачи. Поэтому для оценки упругих деформаций и напряжений деталей зацепления роликовой передачи, при действии всех нормальных сил, разработаны компьютерные модели и методика компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния деталей зацепления и проведен статический анализ в программе SolidWorks Simulation методом конечных элементов.

**Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния планетарной роликовой передачи**

На рисунке 2 показана схема зацепления планетарной роликовой передачи [7, 8], которая построена по той же кинематической схеме и имеет тот же принцип работы, что и шариковая передача на рисунке 1.



1 – ведущее звено; 2 – сателлит-ролик; 3 – неподвижный диск с многопериодной дорожкой; 4 – многопериодная дорожка; 5 – водило-сепаратор; 6 – паз водила-сепаратора

**Рисунок 2** – Схема зацепления планетарной роликовой передачи

На рисунке 3 представлена компьютерная модель для одного спутника-ролика, находящегося в зацеплении, на которой показаны исходные параметры моделирования: места крепления деталей, все нормальные силы, действующие на эти детали и сопрягаемые поверхности. Методика компьютерного моделирования включает задание материала – легированной стали с механическими свойствами, соответствующими расчетным, установление контакта сопрягаемых поверхностей, определение способов крепления деталей, нагружение деталей зацепления силами, направленными по нормали к контактирующим поверхностям, выбор параметров конечно-элементной сетки, решение модели, анализ полученных значений.

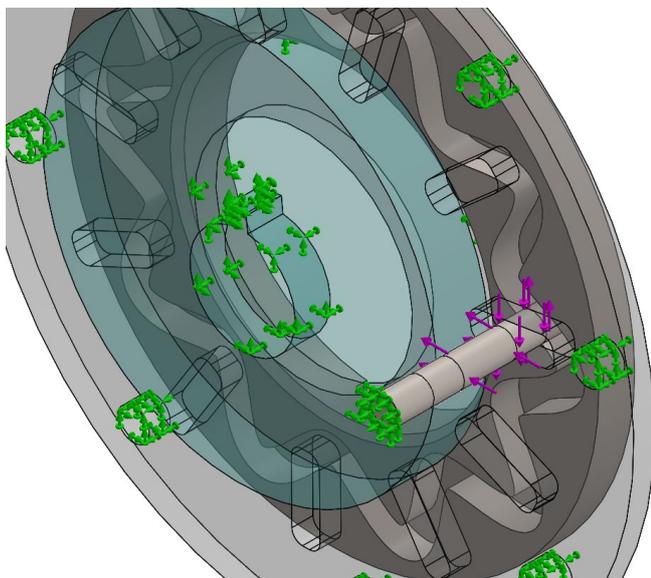


Рисунок 3 – Компьютерная модель с исходными параметрами моделирования

В результате моделирования созданы эпюры напряжений и деформаций нагружаемых деталей зацепления планетарной роликовой передачи. На рисунке 4 показана эпюра напряжений в роликовом зацеплении. Наибольшие напряжения возникают в местах контактов спутника-ролика с ведущей и неподвижной беговыми дорожками. При этом напряжения ниже предела текучести материала при растяжении и сжатии.

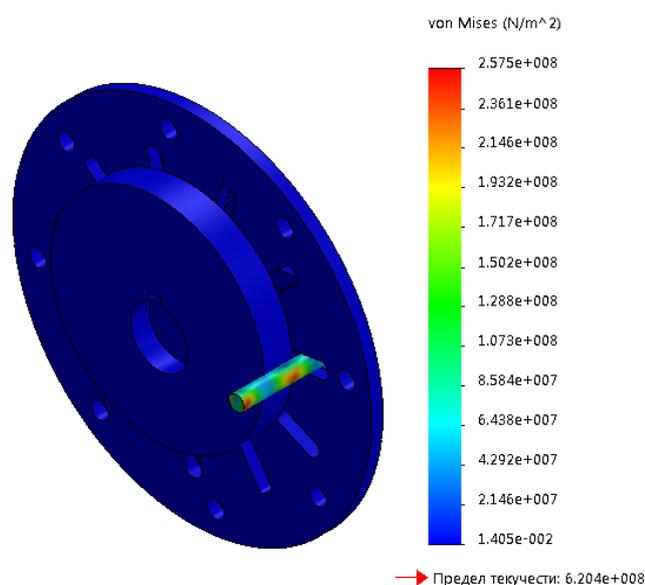


Рисунок 4 – Результаты компьютерного моделирования напряжений в роликовом зацеплении

На рисунке 5 показана эпюра перемещений в результате деформаций деталей роликовой передачи.

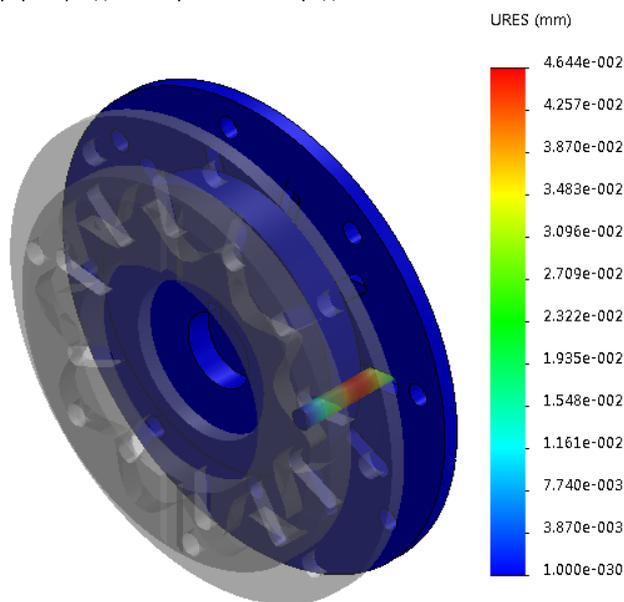


Рисунок 5 – Результаты компьютерного моделирования деформаций (перемещений) в роликовом зацеплении

Наибольшие перемещения возникают в середине спутника-ролика, т. к. все действующие на него нормальные силы создают кроме контактных деформаций еще и его изгиб. Наибольшее перемещение в результате моделирования составило 0,046 мм. Моделирование не учитывало распределение нагрузки на все спутники передачи. Рассматривался худший вариант, когда в зацеплении находится один спутник. С учетом коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  и распределения нагрузки на все спутники наибольшее перемещение будет меньше и составит 0,0256 мм. Перемещения будут создавать неточности вращения выходного звена передачи, т. е. снижать ее кинематическую точность.

### Заключение

Предложены математические зависимости с поправочными коэффициентами на основе которых разработана методика, позволяющая рассчитать контактные напряжения и деформации (перемещения) в звеньях планетарных шариковых и роликовых передач. Представлены значения наибольших контактных напряжений и деформаций, которые влияют на нагрузочную способность и точность рассматриваемых конструкций передач. Показано, что в роликовой передаче контактные напряжения по величине значительно меньше, чем в шариковой за счет разделения действия нагрузки на несколько участков цилиндрической поверхности спутника-ролика и за счет большей площади его контакта с деталями зацепления. Показано также, что в роликовом зацеплении, кроме контактных деформаций, возникают деформации при изгибе спутников-роликов, что снижает кинематическую точность передачи. Разработанные компьютерные 3D-модели и результаты моделирования позволили сделать визуализацию и оценку напряженно-деформированного состояния исследуемых передач и получить эпюры контактных и изгибных напряжений и деформаций в программной среде SolidWorks Simulation.

Проведенные исследования позволят определять напряжения и деформации в звеньях шариковых и роликовых передач при их проектировании и расчете массогабаритных характеристик.

### Список цитированных источников

1. Планетарные кулачково-плунжерные передачи. Проектирование, контроль и диагностика / М. Ф. Пашкевич [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 221 с.
2. Пашкевич, М. Ф. Планетарные шариковые и роликовые редукторы и их испытания / М. Ф. Пашкевич, В. В. Герасценко. – Минск : БелНИИТИ, 1992. – 248 с.

3. Капитонов, А. В. Кинематические и массогабаритные характеристики ресурсоэффективных механических передач. Компьютерное моделирование, экспериментальная оценка: монография / А. В. Капитонов, В. М. Пашкевич. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2017. – 248 с.
  4. Лустенков, М. Е. Передачи с промежуточными телами качения: определение и минимизация потерь мощности / М. Е. Лустенков. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2010. – 274 с.
  5. Методы экспериментальных исследований кинематической точности планетарных передач с промежуточными телами качения и контроля профиля беговых дорожек / А. В. Капитонов [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2016. – № 2 (51). – С. 41–50.
  6. Исследование кинематической погрешности планетарного эксцентрикового редуктора / А. В. Капитонов [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2014. – № 3 (44). – С. 14–24.
  7. Капитонов, А. В. Исследование кинематической точности планетарных роликовых передач методами гармонического анализа и контроля в сборе / А. В. Капитонов, С. Г. Черняков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2011. – № 4 (33). – С. 40–50.
  8. Капитонов, А. В. Методика оценки и анализ кинематических погрешностей планетарных роликовых передач / А. В. Капитонов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2009. – № 2 (23). – С. 88–97.
  9. Тимошенко, С. П. Теория упругости / перевод. с англ.: С. П. Тимошенко, Дж Гудьер ; под ред. Г. С. Шапиро. – 2-е изд. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.
  10. Менькова, Н. М. Прикладная механика. Введение в курс: учеб. пособие / Н. М. Менькова ; М-во образования РФ, Моск. гос. ин-т радиотехники, электроники и автоматики. – М. : Моск. гос. ин-т радиотехники, электроники и автоматики, 2003. – 98 с.
  11. Можаровский, В. В. Компьютерная реализация методики расчета контактного взаимодействия зубьев зубчатых колес из изотропного и композиционного материалов / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2021. – № 6 (129). – С. 171–177.
  12. Иванов, М. Н. Детали машин: учеб. для студентов вузов / М. Н. Иванов ; под ред. В. А. Финогенова. – М. : Высш. шк., 1998. – 383 с.
- References**
1. Planetarnye kulachkovo-plunzhernye peredachi. Proektirovanie, kontrol' i diagnostika / M. F. Pashkevich [i dr.]. – Mogilev : Belorus.-Ros. un-t, 2003. – 221 s.
  2. Pashkevich, M. F. Planetarnye sharikovye i rolikovye reduktory i ih ispytaniya / M. F. Pashkevich, V. V. Gerashchenko. – Minsk : BelNIINTI, 1992. – 248 s.
  3. Kapitonov, A. V. Kinematicheskie i massogabaritnye harakteristiki resursoeffektivnyh mekhanicheskikh peredach. Komp'yuternoe modelirovanie, eksperimental'naya ocenka: monografiya / A. V. Kapitonov, V. M. Pashkevich. – Mogilev : Belorus.-Ros. un-t, 2017. – 248 s.
  4. Lustenkov, M. E. Peredachi s promezhutochnymi telami kacheniya: opredelenie i minimizaciya poter' moshchnosti / M. E. Lustenkov. – Mogilev : Belorus.-Ros. un-t, 2010. – 274 s.
  5. Metody eksperimental'nyh issledovaniy kinematicheskoy tochnosti planetarnykh peredach s promezhutochnymi telami kacheniya i kontrolya profilya begovykh dorozhek / A. V. Kapitonov [i dr.] // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2016. – № 2 (51). – S. 41–50.
  6. Issledovanie kinematicheskoy pogreshnosti planetarnogo ekscentrikovogo reduktora / A. V. Kapitonov [i dr.] // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2014. – № 3 (44). – S. 14–24.
  7. Kapitonov, A. V. Issledovanie kinematicheskoy tochnosti planetarnykh rolikovykh peredach metodami garmonicheskogo analiza i kontrolya v sbore / A. V. Kapitonov, S. G. CHernyakov // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2011. – № 4 (33). – S. 40–50.
  8. Kapitonov, A. V. Metodika ocenki i analiz kinematicheskikh pogreshnostey planetarnykh rolikovykh peredach / A. V. Kapitonov // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2009. – № 2 (23). – S. 88–97.
  9. Timoshenko, S. P. Teoriya uprugosti / perevod. s angl.: S. P. Timoshenko, Dzh Gud'er ; pod red. G. S. SHapiro. – 2-e izd. – M. : Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1979. – 560 s.
  10. Men'kova, N. M. Prikladnaya mekhanika. Vvedenie v kurs: ucheb. posobie / N. M. Men'kova ; M-vo obrazovaniya RF, Mosk. gos. in-t radiotekhniki, elektroniki i avtomatiki. – M. : Mosk. gos. in-t radiotekhniki, elektroniki i avtomatiki, 2003. – 98 s.
  11. Mozharovskij, V. V. Komp'yuternaya realizaciya metodiki rascheta kontaktnogo vzaimodejstviya zub'ev zubchatykh koles iz izotropnogo i kompozitsionnogo materialov / V. V. Mozharovskij, S. V. Kirginceva // Izvestiya Gomeľ'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny. – 2021. – № 6 (129). – S. 171–177.
  12. Ivanov, M. N. Detali mashin: ucheb. dlya studentov vtuzov / M. N. Ivanov ; pod red. V. A. Finogenova. – M. : Vyssh. shk., 1998. – 383 s.

Материал поступил 25.02.2024, одобрен 09.03.2024, принят к публикации 12.03.2024

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДОПУСКОВ НЕПОДВИЖНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РАЗНОЙ ТОЛЩИНЫ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ТОЧНОСТИ СБОРКИ МАШИН МЕТОДОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

О. А. Медведев<sup>1</sup>, С. В. Савчук<sup>2</sup>, Б. С. Дарчич<sup>3</sup>

<sup>1</sup> К. т. н., доцент, доцент кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: olanmed56@gmail.com

<sup>2</sup> К. т. н., доцент кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: sergeyskb@tut.by

<sup>3</sup> Студент четвертого курса УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: bodj1234567@gmail.com

### Реферат

В статье рассматривается методика определения оптимальных значений допусков компенсаторов разной толщины, используемых для достижения точности замыкающих звеньев линейных сборочных размерных цепей машин методом регулирования. Критерием оптимизации является себестоимость обработки плоских поверхностей комплекта компенсаторов, необходимого для одного экземпляра изделия. Методика позволяет повысить объективность определения величины и степени компенсации, числа неподвижных компенсаторов, допусков компенсаторов во взаимосвязи с параметрами точности сборочных работ. Методика может быть полезна инженерам, разрабатывающим техпроцессы сборки машин.

**Ключевые слова:** сборка, точность, компенсатор, метод регулирования, методика, оптимизация.

### OPTIMISATION OF TOLERANCES OF FIXED EXPANSION JOINTS OF DIFFERENT THICKNESSES FOR PRECISE MACHINE ASSEMBLY BY THE CONTROL METHOD

O. A. Medvedev, S. V. Savchuk, B. S. Darchich

### Abstract

The article discusses the method for determining the optimal tolerances of expansion joints of different thicknesses used to achieve the accuracy of the closing links of linear assembly dimensional chains of machines by the control method. The optimization criterion is the cost of processing flat surfaces of a set of expansion joints required for one piece of product. The method makes it possible to increase the objectivity of determining the value and stage of compensation, the number of fixed expansion joints, and the tolerances of expansion joints in relation to the parameters of the accuracy of assembly work. The methodology can be useful for engineers who develop technological processes for assembling machines.

**Keywords:** assembly, accuracy, compensator, control method, methodology, optimization.

### Введение

Метод ступенчатого изменения (регулирования) размера одного из составляющих звеньев (компенсатора) широко используется для достижения высокой точности замыкающих звеньев длинных конструкторских сборочных размерных цепей машин в серийном и массовом производстве. Обычно компенсаторами являются кольца или втулки небольшой толщины. До сборки для каждого экземпляра собираемых узлов приходится изготавливать комплект компенсаторов, в котором толщины соседних компенсаторов отличаются на величину ступени компенсации. В собираемом экземпляре узла используется лишь один компенсатор, толщина которого, в большинстве случаев, находится измерением места под компенсатор, полученного при предварительной сборке узла без компенсатора, когда на место замыкающего звена устанавливается его эталон. Если толщина выбранного компенсатора равна размеру измеренного места, то после окончательной сборки узла с таким компенсатором замыкающее звено будет равно размеру эталона. В противном случае отклонение компенсатора от размера указанного места приведет к такому же по величине отклонению замыкающего звена от эталона. Следовательно, вместо зависимости точности замыкающего звена от точности всех составляющих звеньев конструкторской размерной цепи возникает зависимость точности замыкающего звена только от точности компенсатора.

Такой подход к анализу точности сборки позволяет в значительной мере устранить недостатки, свойственные традиционным методикам расчета сборочных размерных цепей, используемых при достижении точности сборки методом регулирования [1, 2 и др.]: 1) в условии достижения точности сборки не учитываются погрешно-

сти формирования размера компенсатора; 2) степень компенсации определяется без учета погрешностей сборочных работ и оснастки; 3) в величину компенсации, кроме допусков составляющих звеньев сборочной конструкторской размерной цепи, включается допуск компенсатора и погрешности сборочных работ [1, 2, 3], несмотря на то, что выбираемый компенсатор не может компенсировать погрешности, влияющие на формирование его размера.

### Постановка задач исследования

Для объективного определения допустимых и оптимальных значений погрешностей сборочных работ и сборочной оснастки необходимо составить объективное математически выраженное условие достижения точности сборки на основе тщательного анализа факторов, возникающих в процессе предварительной сборки изделия, выбора компенсатора и при окончательной сборке. Такое условие должно устанавливать взаимосвязь между заданным в технических условиях на сборку допуском замыкающего звена и погрешностями сборочных работ.

Для практического использования такого условия для оценки приемлемости разработанной технологии сборки и принятой сборочной оснастки необходимо разработать методику определения допустимых рациональных значений отдельных погрешностей, влияющих на точность сборки.

Поскольку погрешностью изготовления компенсатора можно управлять, применяя разные методы и стадии их обработки, необходимо разработать методику определения оптимального значения допустимой погрешности компенсатора по критерию минимума затрат на изготовление комплекта компенсаторов на каждый экземпляр изделия.

**Величина компенсации и условие достижения точности замыкающего звена сборочной конструкторской размерной цепи**

Для определения погрешности толщины выбираемого компенсатора следует выявить и решить технологическую сборочную размерную цепь, которая формируется на этапе предварительной сборки узла и измерения в нем размера полости под компенсатор. Замыкающим звеном в такой цепи является толщина выбранного компенсатора, а составляющими звеньями, кроме размеров штатных деталей узла, также являются размеры используемой сборочной оснастки (этalon замыкающего звена) и погрешности выполнения сборочных работ и изготовления компенсаторов, входящих в комплект на один узел.

В пределах партии собираемых узлов поле рассеяния толщины компенсатора, как замыкающего звена, будет равно сумме полей рассеяния всех составляющих звеньев технологической размерной цепи. Целенаправленным, индивидуальным для отдельного экземпляра собираемого узла, изменением толщины компенсатора возможно компенсировать только отклонения той части составляющих звеньев этой цепи, которые имеют стабильные значения для этого экземпляра, то есть отклонения звеньев (в пределах их допусков  $TA_j$ ), являющихся размерами штатных деталей узла. Без изменения толщины компенсатора суммарное отклонение таких составляющих звеньев полностью вошло бы в отклонение замыкающего звена  $A_A$  конструкторской сборочной размерной цепи.

Остальные составляющие звенья технологической цепи могут приобретать случайные значения при сборке конкретного экземпляра узла. Их невозможно предсказать и компенсировать изменением толщины компенсатора, зависящей от их значений. Отклонения этих звеньев неизбежно будут определять отклонение толщины выбранного компенсатора от размера полости под компенсатор и, следовательно, отклонение замыкающего звена  $A_A$  от эталона при окончательной сборке узла с выбранным компенсатором. К таким звеньям относятся: погрешность изготовления эталона замыкающего звена  $\delta_z$ , погрешность установки эталона  $\delta_{yz}$ , погрешность измерения места под компенсатор  $\delta_u$ , погрешность изготовления выбираемого компенсатора  $\delta_k$ , погрешность выбора компенсатора  $\delta_e$  (отклонение номинальной толщины выбранного компенсатора от результата измерения места под компенсатор).

Проведенный анализ влияния элементов технологической сборочной размерной цепи на толщину выбранного компенсатора и на погрешность замыкающего звена сборочной конструкторской цепи позволяет составить выражение для рационального определения величины компенсации за счет ступенчатого изменения толщины компенсатора и условия достижения точности сборки при методе регулирования неподвижными компенсаторами разной толщины.

Величина компенсации  $V$  представляет собой диапазон целенаправленного изменения толщины компенсатора. Максимальная толщина компенсатора потребуется в случае, когда в технологической сборочной размерной цепи увеличивающие составляющие звенья, являющиеся размерами штатных деталей узла, приобретут максимальные предельные значения в пределах их допусков, а аналогичные уменьшающие звенья – минимальные значения. Соответственно, минимальная толщина компенсатора потребуется в случае, когда увеличивающие составляющие звенья приобретут минимальные предельные значения, а уменьшающие звенья – максимальные предельные значения. Разность между максимальной и минимальной толщиной, являющаяся величиной компенсации, можно определить как сумму  $m$  допусков составляющих звеньев технологической цепи, принадлежащих размерам деталей, участвующих в предварительной сборке узла

$$V = \sum_{j=1}^m \delta_j. \quad (1)$$

С учетом проведенного анализа технологической цепи условие достижения точности сборки должно отражать соотношение допуска замыкающего звена  $TA_A$  конструкторской цепи и суммы погрешностей, вызывающих отклонение размера места под компенсатор от толщины выбранного компенсатора (в пределах использования одного компенсатора из комплекта

$$TA_A \geq \delta_z + \delta_{yz} + \delta_u + \delta_k + \delta_e. \quad (2)$$

Таким образом, при высокой точности сборочной оснастки, измерительных средств и компенсаторов можно обеспечить высокую точность сборки при невысокой точности составляющих звеньев конструкторской размерной цепи (кроме компенсатора).

**Определение ступени компенсации и числа ступеней компенсации**

Важным параметром полученного условия достижения точности является погрешность выбора компенсатора нужной толщины из заранее изготовленного комплекта компенсаторов, в котором толщины соседних компенсаторов отличаются на величину ступени компенсации. Анализ условий выбора компенсатора позволяет сделать вывод, что при соблюдении технологического регламента эта погрешность не может превышать ступень компенсации. Поэтому ступень компенсации  $S$ , как максимальную величину погрешности выбора толщины компенсатора, при которой условие достижения точности сборки (2) превращается в равенство, следует определять по формуле

$$S = TA_A - \delta_z - \delta_{yz} - \delta_u - \delta_k. \quad (3)$$

Число ступеней компенсации  $N$  (число компенсаторов в комплекте) определяется делением величины компенсации на ступень компенсации

$$N = \frac{V}{TA_A - \delta_z - \delta_{yz} - \delta_u - \delta_k}. \quad (4)$$

**Определение рациональных значений погрешностей сборочных работ и оснастки**

Полученное условие достижения точности замыкающего звена  $A_A$  и выражение для расчета числа ступеней компенсации можно использовать для определения рациональных значений погрешностей сборочной оснастки (материального эталона замыкающего звена и измерительного средства), погрешностей установки эталона и изготовления компенсатора. Как следует из выражения (4), уменьшение указанных погрешностей до минимально возможных значений при прочих равных условиях приведет к уменьшению числа компенсаторов в комплекте и, возможно, к снижению затрат на изготовление комплекта компенсаторов. Однако малые значения погрешностей возможны при использовании более дорогой сборочной оснастки и дорогостоящей технологии изготовления точных компенсаторов, что может привести к повышению общих затрат на достижение требуемой точности.

При выборе средства измерения размера места под компенсатор целесообразно учитывать взаимосвязь между значениями  $\delta_u$  и  $s$ , которая аналогична взаимосвязи допустимой погрешности измерения и допуска контролируемого параметра. В соответствии с рекомендациями [4] и ГОСТ 8.051-81 для достоверного измерения и заключения о годности, погрешность измерения не должна превышать одной пятой части от допуска контролируемого параметра, если он соответствует точности грубее 9 качества, и одной третьей части, если он относится к более точным качествам. Обычно ступень компенсации имеет значение от нескольких сотых до нескольких десятых долей миллиметра, что при размере места под компенсатор 3...5 мм соответствует точности грубее 9 качества. Следовательно, исключить ошибочный выбор компенсатора, отличающегося от размера места под компенсатор более чем на одну ступень компенсации  $S$ , можно, если погрешность измерения будет соответствовать условию

$$\delta_u \leq 0,2 \cdot S. \quad (5)$$

Погрешность размера эталона замыкающего звена  $A_A$  может быть принята равной допуску этого размера. Так как количество требуемых эталонов замыкающего звена  $A_A$  для изделия определенной конструкции невелико, то его без существенных затрат можно изготовить с максимальной возможной на данном предприятии точностью (обычно с точностью размера по 6...7 качествам).

Погрешность установки эталона  $\delta_{yэ}$  следует рассчитывать на основе геометрических схем его возможных перекосов в собираемом изделии. При исключении возможности перекосов эталона погрешность его установки может быть принята равной большему из двух параметров: либо погрешности формы установочной поверхности эталона; либо параметру  $R_z$  шероховатости установочной поверхности эталона.

После преобразований формулы (4) с учетом взаимосвязи (5) получим

$$N = \frac{V}{0,83(TA_{\Delta} - \delta_y - \delta_{yэ} - \delta_k)} \quad (6)$$

Учитывая то, что с ростом  $\delta_k$  первый множитель в выражении (7) уменьшается, а второй увеличивается, можно предположить, что график функции (7) близок к параболическому с минимальным значением в пределах реального диапазона изменения  $\delta_k$  (от допуска 6 до допуска 14 квалитета). Так как толщина компенсатора должна иметь стандартный допуск, соответствующий одному из указанных квалитетов, то функция  $C$ , определяемая формулой (7), будет иметь дискретный характер. Оптимальным значением допуска толщин компенсаторов по критерию минимальной себестоимости комплекта компенсаторов на один экземпляр изделия будет то значение, при котором функция (7) приобретает минимальное значение.

Наиболее трудоемкой частью решения задачи оптимизации допусков толщин компенсаторов является установление взаимосвязи между затратами на изготовление одного компенсатора и допуском его толщины  $c = f(\delta_k)$ . Из-за большого количества факторов, влияющих на себестоимость компенсаторов, выразить такую зависимость одной аналитической формулой весьма затруднительно. Намного проще можно определять дискретные значения этой функции для ограниченного числа квалитетов на основе расчета численных показателей типовой технологии мехобработки (припуски на технологические переходы, режимы резания, основное время) для компенсаторов типа колец (или втулок). Например, широко используемые компенсаторы типа колец, отличающиеся друг от друга диаметром наружного цилиндра в диапазоне от 10 до 150 мм и толщиной в диапазоне от 0,5 до 10 мм при точности толщины в диапазоне от 6 до 14 квалитета, можно в условиях серийного производства обрабатывать по единой типовой технологии при использовании станков ЧПУ. При этом для достижения разных квалитетов точности толщин компенсаторов, мехобработка плоских торцов должна состоять из разного количества технологических переходов, что и будет являться основной причиной различия себестоимостей компенсаторов с разной точностью толщин, при прочих равных характеристиках. Затраты на обработку других конструктивных элементов компенсатора не зависят от точности его толщины и их можно не учитывать при составлении функции (7). Таким образом, для сокращения числа технологических факторов, учитываемых при оптимизации допусков толщин компенсаторов, можно ограничиться расчетом только тех составляющих себестоимости компенсаторов, которые в наибольшей степени зависят от этих допусков. К таким составляющим относится стоимость заготовки компенсатора (так как масса заготовки зависит от величины припусков, удаляемых при выполнении технологических переходов мехобработки плоских торцов компенсаторов, вид и число которых зависит от точности толщины компенсатора) и себестоимость переходов мехобработки плоских торцов.

В качестве наиболее дешевых типовых заготовок для стальных компенсаторов в виде колец приняты пластины, отрезанные от круглого горячекатаного проката (ГОСТ 2590-2006).

### Оптимизация допусков компенсаторов

Наиболее существенное влияние на затраты на достижение точности сборки методом регулирования имеет значение погрешности изготовления компенсаторов (их технологический допуск). Наиболее точными элементами компенсатора в виде втулки или кольца являются его плоские торцы, размер между которыми входит в конструкторскую сборочную размерную цепь. Основную долю в себестоимости компенсатора составляют затраты на обработку этих торцов. Величина затрат увеличивается с уменьшением допустимой погрешности толщины компенсатора  $\delta_k$ . Затраты на изготовление комплекта компенсаторов для одного экземпляра собираемого узла можно выразить произведением затрат на один компенсатор (в виде функциональной зависимости затрат  $c = f(\delta_k)$  от допустимой погрешности изготовления компенсаторов) на число компенсаторов в комплекте  $N$ , определяемое по формуле (6). Таким образом, затраты на изготовление комплекта компенсаторов можно определить по формуле (7)

$$C_N = f(\delta_k) \cdot N = f(\delta_k) \cdot \frac{V}{0,83(TA_{\Delta} - \delta_y - \delta_{yэ} - \delta_k)} \quad (7)$$

При разработке типовой технологии мехобработки плоских торцов компенсаторов в виде колец, с размерами в указанных ранее диапазонах, для условий серийного производства выбраны методы обработки торцов и стадии исполнения этих методов, технологические базы, типовой маршрут мехобработки, металлорежущее оборудование с ЧПУ и технологическая оснастка, определены припуски на возможные переходы мехобработки расчетно-аналитическим методом, определены режимы резания и затраты времени для возможных переходов мехобработки, определены затраты на заготовки и на возможные переходы мехобработки.

Для среднесерийного производства в качестве наиболее предпочтительного метода мехобработки плоскостей на черновой, получистовой стадии техпроцесса (по сочетанию таких факторов, как высокая производительность и универсальность и невысокая себестоимость обработки) принято фрезерование торцовыми фрезами. В качестве метода обработки высокоточных компенсаторов принято плоское шлифование на станках с прямоугольным столом.

Стадии исполнения указанных методов обработки одного плоского торца принимались с учетом таблиц точности мехобработки [4], в зависимости от точности толщины компенсатора: для получения толщин компенсаторов с точностью 13 или 14 квалитета – черновое (однократное) фрезерование; для получения толщин компенсаторов с точностью 11 или 12 квалитета – черновое и получистовое фрезерование (2 технологических перехода); для получения толщин компенсаторов с точностью 9 или 10 квалитета – черновое, получистовое и чистовое фрезерование (3 перехода); для получения толщин компенсаторов с точностью 8 квалитета – черновое, получистовое, чистовое фрезерование и предварительное шлифование (4 перехода); для получения толщин компенсаторов с точностью 7 квалитета – черновое, получистовое, чистовое фрезерование, предварительное и чистовое шлифование (5 переходов); для получения толщин компенсаторов с точностью 6 квалитета – черновое, получистовое, чистовое фрезерование, предварительное, чистовое и тонкое шлифование (6 переходов).

В качестве приспособления для установки полуфабрикатов компенсаторов при обработке на вертикально-фрезерном и плоскошлифовальном станках принята стандартная магнитная плита.

Для определения припусков, режимов резания, основного и штучно-калькуляционного времени для указанных переходов использовались традиционные для технологии машиностроения зависимости и нормативы, приведенные в [4, 5].

В ходе предварительных расчетов масс заготовок компенсаторов с одинаковыми размерами, но разной точностью толщины, установлено, что из-за малой величины припусков, удаляемых при получистовых и чистовых переходах, массы заготовок для компенсаторов разной точности отличаются на несколько грамм и стоимость их заготовок практически одинакова. Это позволяет не учитывать стоимость заготовок как малозначительный фактор, при оптимизации допусков толщин компенсаторов.

Затраты  $c = f(\delta_k)$  на выполнение  $P$  переходов (при  $P$  от 1 до 6), требуемых для достижения определенной точности, определялись суммированием затрат на отдельные переходы  $c_i$ . ( $c_1$  – для чернового фрезерования,  $c_2$  – для получистового фрезерования,  $c_3$  – для чистового фрезерования,  $c_4$  – для предварительного шлифования,  $c_5$  – для чистового шлифования,  $c_6$  – для тонкого шлифования)

$$c = f(\delta_k) = \sum_{i=1}^P c_i. \quad (8)$$

Каждое слагаемое  $c_i$  определялось как произведение затрат на одну минуту работы оборудования, принятого для выполнения  $i$ -й стадии обработки компенсатора [5], на штучно-калькуляционное время однопереходной операции в минутах.

Для автоматизации расчета численных показателей типовой технологии мехобработки торцов компенсаторов и себестоимости комплекта компенсаторов разработана компьютерная программа с использованием табличного редактора Excel.

Апробация предлагаемой методики проведена на примере оптимизации допусков компенсатора, в виде шайбы (звено  $A_6$ ), для регулировки полости под пружину форсунки ЯЗДА 273-20 закрытого типа с многодырчатый распылителем и гидравлически управляемой иглой, схема которой представлена на рисунке 1.

Результаты расчетов себестоимости обработки плоских торцов компенсатора при разных качествах точности толщины представлены на рисунке 2.

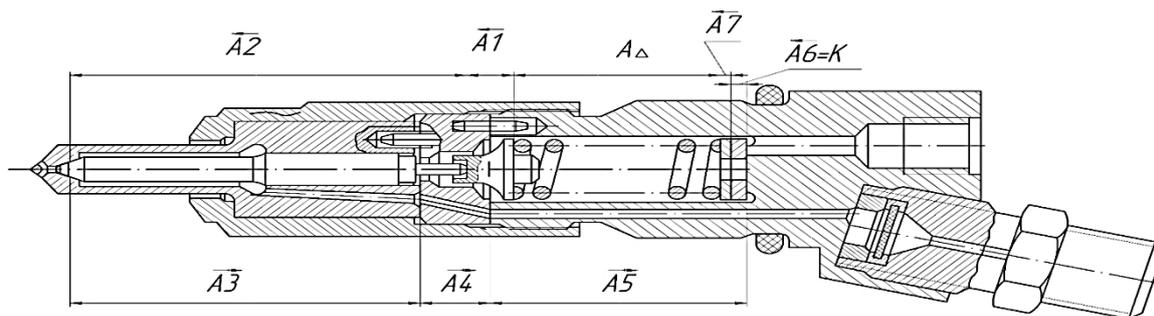


Рисунок 1 – Схема конструкции форсунки ЯЗДА 273-20 и схема размерной цепи с компенсатором (звено  $A_6$ )

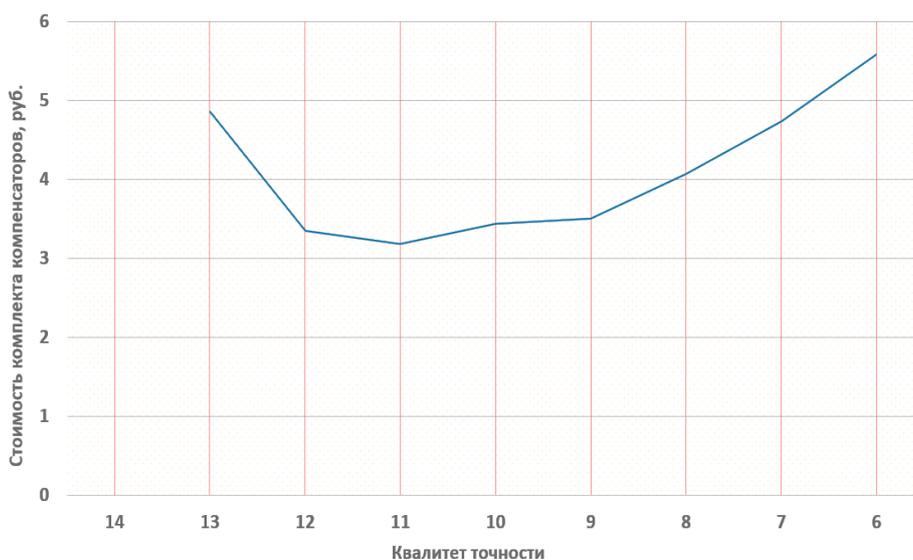


Рисунок 2 – График зависимости себестоимости комплекта регулировочных шайб форсунки ЯЗДА 273-20 от номера квалитета точности их толщины

Из графика видно, что минимальную себестоимость будет иметь комплект регулировочных шайб с точностью толщины по 11 квалитету. Шайбы с точностью толщины по 14 квалитету не соответствуют условию достижения точности размера полости под пружину, поэтому для них стоимость не определялась. Малое отличие стоимостей шайб с точностью толщины по 9 и 10 квалитетам обусловлено одинаковым составом методов и стадий их обработки и незначительным различием припусков и режимов резания на чистовое и получистовое фрезерование таких шайб. Необоснованное назначение точности регулировочных шайб по 13 и 6 квалитетам приведет к увеличению затрат на обработку плоскостей шайб в 1,5 и 1,75 раза, соответственно, хотя и удовлетворяет условию достижения точности. Это свидетельствует об экономической целесообразности использования предлагаемой методики оптимизации допусков толщин компенсаторов.

### Заключение

Реализация предлагаемого подхода к определению параметров точности сборочной оснастки и компенсаторов при достижении точности сборки методом регулирования позволяет повысить эффективность определения величины и ступени компенсации, числа неподвижных компенсаторов, а также оптимальных допусков компенсаторов во взаимосвязи с параметрами точности сборочных работ и оснастки. Разработанная методика оптимизации допусков компенсаторов позволяет в 1,5...2 раза сократить себестоимость изготовления комплекта компенсаторов на каждый экземпляр собираемого изделия. Она может быть полезна инженерам-технологам, занимающимся проектированием техпроцессов сборки машин.

**Список цитированных источников**

1. Маталин, А. А. Технология машиностроения: учебник / А. А. Маталин. – 5-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 512 с.
2. Солонин, И. С. Расчет сборочных и технологических размерных цепей / И. С. Солонин, С. И. Солонин. – М. : Машиностроение, 1980 – 110 с.
3. Технология машиностроения (специальная часть): учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. / под ред. А. М. Дальского [и др.]. – 5-е изд. перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2001.
5. Обработка металлов резанием: справочник технолога / А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм ; под общ. ред. А. А. Панова. – М. : Машиностроение, 1988. – 736 с.
6. Расчеты экономической эффективности новой техники: справочник / под общ. ред. К. М. Великанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1990. – 448 с.

**References**

1. Matalin, A. A. Tekhnologiya mashinostroeniya: uchebnik / A. A. Matalin. – 5-e izd., ster. – Sankt-Peterburg : Lan', 2020. – 512 s.
2. Solonin, I. S. Raschet sborochnyh i tekhnologicheskikh razmernykh cepej / I. S. Solonin, S. I. Solonin. – M. : Mashinostroenie, 1980 – 110 s.
3. Tekhnologiya mashinostroeniya (special'naya chast'): uchebnik dlya mashinostroitel'nyh special'nostej vuzov / A. A. Gusev [i dr.]. – M. : Mashinostroenie, 1986. – 480 s.
4. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya : v 2-h t. / pod red. A. M. Dal'skogo [i dr.]. – 5-e izd. pererab. i dop. – M. : Mashinostroenie, 2001.
5. Obrabotka metallov rezaniem: spravochnik tekhnologa / A. A. Panov, V. V. Anikin, N. G. Bojm ; pod obshch. red. A. A. Panova. – M. : Mashinostroenie, 1988. – 736 s.
6. Raschety ekonomicheskoy effektivnosti novej tekhniki: spravochnik / pod obshch. red. K. M. Velikanova. – 2-e izd., pererab. i dop. – L. : Mashinostroenie, 1990. – 448 s.

*Материал поступил 26.02.2024, одобрен 14.03.2024, принят к публикации 28.03.2024*

## МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, АДГЕЗИЯ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ПОКРЫТИЙ AlCrN, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ СЕПАРИРОВАННОЙ ПЛАЗМЫ КАТОДНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА

И. П. Акула<sup>1</sup>, Н. М. Чекан<sup>2</sup>, М. Ю. Хома<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> К. физ.-мат. н., заведующий лабораторией наноматериалов и ионно-плазменных процессов, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: chekan@phti.by

<sup>3</sup> Научный сотрудник, лаборатория наноматериалов и ионно-плазменных процессов, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: mihmauzer@phti.by

### Реферат

Получены покрытия нитрида алюминий-хром в условиях сепарации плазмы стационарного катодно-дугового разряда. Показано, что существующая магнитная система сепарации вакуумной установки УВНИПА-1-001 позволяет снизить количество макрочастиц – побочного продукта эрозии катода – в 1,7–2 раза, в зависимости от давления азота. Для данного сепаратора остается проблемой удаление макрочастиц с размером менее 1 мкм. Их плотность остается достаточно высокой (порядка 22 000 мм<sup>-2</sup>) и незначительно снижается с ростом давления азота. Методами АСМ показано наличие пор субмикронных размеров, которые формируются макрочастицами при их отражении поверхностью основы. Из анализа элементного состава покрытий установлено, что имеет место расслоение плазменного потока двухкомпонентной металлической плазмы на ионные составляющие хрома и алюминия, приводящее к значительному отклонению состава покрытий от состава мишени в сторону сильного дефицита алюминия. При этом сепарация благоприятно сказывается на приближении состава покрытия к стехиометрическому AlCrN. Покрытия из сепарированной плазмы имеют более высокую адгезию к основе из инструментальной стали. Лучшим достигнутым результатом по адгезии является 29 Н для покрытия AlCrN, полученного при давлении азота 21 мПа, что в 1,5 раза превышает силу адгезии образцов покрытий без сепарации плазмы.

**Ключевые слова:** покрытия AlCrN, сепарация плазмы, макрочастицы, шероховатость, элементный состав.

### SURFACE MORPHOLOGY, ADHESION AND ELEMENTAL COMPOSITION OF AlCrN COATINGS OBTAINED FROM FILTERED CATHODIC ARC PLASMA

I. P. Akula, N. M. Chekan, M. Yu. Khoma

### Abstract

Aluminum-chromium nitride coatings were obtained under plasma separation conditions of a stationary cathodic arc discharge. It is shown that the existing magnetic filtering system of the UVNIPA-1-001 vacuum equipment allows reducing the number of macroparticles – a by product of cathode erosion – by 1.7–2 times, depending on the nitrogen pressure. For this filter, the removal of macroparticles with a size of less than 1 micron remains a problem. Their density remains quite high (about 22,000 mm<sup>-2</sup>) and decreases slightly with increasing nitrogen pressure. AFM methods have shown the presence of pores of submicron sizes, which are formed by macroparticles when they are reflected by the surface of the base. From an analysis of the elemental composition of the coatings, it was established that there is a stratification of the plasma flow of two-component metal plasma into the ionic components of chromium and aluminum, leading to a significant deviation of the composition of the coatings from the composition of the target towards a strong deficiency of aluminum. In this case, filtration has a beneficial effect on bringing the coating composition closer to stoichiometric AlCrN. Filtered plasma coatings have higher adhesion to a tool steel base. The best achieved adhesion result is 29 N for the AlCrN coating obtained at a nitrogen pressure of 21 mPa, which is 1.5 times higher than the adhesion force of coating samples without plasma separation.

**Keywords:** AlCrN coatings, plasma filtration, macroparticles, roughness, elemental composition.

### Введение

Покрытия нитридов титана, циркония широко используются в качестве износостойких покрытий для металлообрабатывающих инструментов благодаря своим хорошим механическим и трибологическим свойствам [1–3]. В то же время для высокоскоростной обработки без применения или в случае ограниченного применения СОЖ такие покрытия являются непригодными вследствие низкой температуры их окисления, которая составляет порядка 450–550 °С [4–6], в то время как температура в зоне резания может достигать 1000 °С [7].

На смену им приходят покрытия, способные формировать на воздухе плотные защитные слои, предотвращающие замещение азота кислородом, сохраняя в целом необходимую твердость покрытий. Это в первую очередь относится к покрытиям AlTiN, AlTiSiN, AlCrN. Именно хром и алюминий могут образовывать плотные практически беспористые слои окислов, препятствующие дальнейшей диффузии кислорода вглубь покрытия.

Покрытия AlTiN и AlCrN особенно привлекательны из-за их превосходной стойкости к окислению, отличных механических свойств, а также химической стабильности [1]. Такие покрытия обладают лучшей износостойкостью, благодаря образованию постоянных оксидных слоев на изнашиваемых поверхностях и относительно низкому коэффи-

циенту трения. Добавление алюминия в нитриды хрома и титана повышает износостойкость при высоких температурах (850–900 °С) [2, 4]. AlCrN покрытия показывают очень высокие значения твердости при повышенных температурах эксплуатации и износостойкости при экстремальных механических нагрузках. Свойства формируемого тонкопленочного материала сильно зависят от концентрации алюминия в покрытиях. При содержании Al в покрытии ниже 75 % образуется регулярная фаза c-AlN [4]. Рост содержания алюминия способствует образованию гексагональной фазы h-AlN с кристаллической решеткой типа вюрцита, что приводит к снижению твердости покрытий [8]. Гексагональная фаза AlN является более стабильной, чем кубическая фаза, таким образом, превращение кубической фазы в гексагональную происходит спонтанно [8]. В случае кубической кристаллической структуры наблюдается улучшение износостойкости и термостойкости покрытия по сравнению с гексагональной структурой [8].

Большой проблемой для таких покрытий, получаемых методом катодно-дугового осаждения в вакууме, остается наличие макрочастиц (МЧ) в результате попадания на основу капель расплавленного металла катода. Эти дефекты являются основным недостатком катодно-дугового осаждения и приводят к налипанию обрабатываемого металла, локальному отслоению и питтинговой коррозии покрытия [9].

Поэтому актуальной задачей является удаление МЧ в формируемых покрытиях с использованием электромагнитной сепарации плазменного потока [10], от конструкции которого зависят перспективы практического применения вакуумно-дугового осаждения покрытий на современном этапе.

К настоящему времени практически отсутствуют данные по сепарации многокомпонентной плазмы, для которой возможно расслоение на легкие и тяжелые ионы плазмы в криволинейных магнитных полях, обусловленное различным соотношением заряда к массе ионов ее компонент [11].

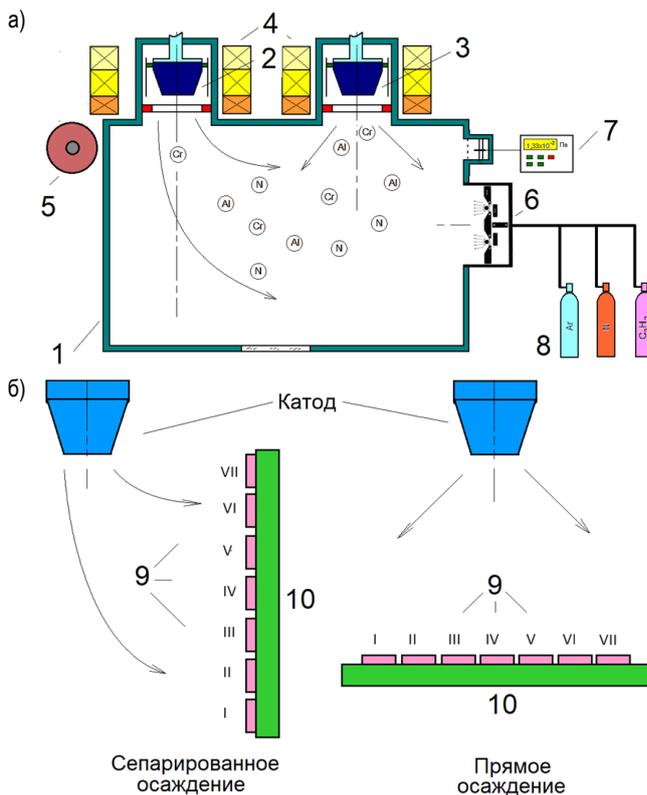
В настоящей статье приводятся данные о состоянии поверхности покрытий AlCrN, полученных из сепарированной плазмы катодно-дугового разряда.

**Методы получения и исследования покрытий**

Покрытия AlCrN наносились на вакуумной установке УВНИПА-1-001 катодно-дуговым методом, реализация которого схематически представлена на рисунке 1. Для формирования покрытий AlCrN использовался катод специального состава Al 70 ат.% + Cr 30 ат.%, изготовленный методом горячего прессования в вакууме смеси порошков металлов в требуемой пропорции.

Металлическая плазма из ионов алюминия и хрома формировалась с помощью источника в вакуумной установке УВНИПА-1-001 с имеющейся системой магнитной сепарации, основными элементами которой являются эксцентрично расположенная система трех автономных соленоидов стационарной металлической плазмы вблизи катода 4 (рисунок 1а) и двух катушек 5, соосно расположенных вверху и внизу снаружи вакуумной камеры. Схема осаждения покрытий приведена на рисунке 1б. Для сравнения были выполнены эксперименты по осаждению покрытий без использования магнитной сепарации. Параметры осаждения покрытий AlCrN приведены в таблице 1.

В качестве основы использовались образцы из инструментальной стали Р6М5 Ø25 мм×5 мм и штамповой стали Х12М Ø30 мм×4 мм, рабочая поверхность которых была отполирована до уровня шероховатости Ra = 0,01 мкм с использованием оборудования пробоподготовки Struers (Дания), включающего в себя отрезной станок Discotom-60, автоматический пресс CitoPress-10 для горячей запрессовки образцов в эпоксидную смолу и автоматическую шлифовально-полировальную систему Tegramin-20.



1 – вакуумная камера, 2 – система электромагнитных катушек горения катодного пятна, 3 – источник несепарированной плазмы, 4 – источник сепарированной плазмы, 5 – отклоняющие электромагнитные катушки, 6 – газовый ионно-лучевой источник, 7 – вакуумметр, 8 – рабочие газы, 9 – основа, 10 – держатель образцов  
 а) – вакуумная установка УВНИПА-1-001;  
 б) – расположение образцов относительно катода

**Рисунок 1** – Схема осаждения покрытий

**Таблица 1** – Условия получения покрытий

Номер образца	Ток дуги, А	Поток плазмы	Давление газа, мПа		Напряжение смещения, В	Время осаждения, мин
			N <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>		
1-1	55	сепарированный	6,5	–	–100	60
1-2			11	–		
1-3			21	–		
1-4			11	11		
2-1		несепарированный	6,5	–	–100	32
2-2			11	–		
2-3			21	–		
2-4			11	11		

Толщина осажденного тонкопленочного материала определялась с помощью интерферометрического микроскопа МИИ-4 по величине сдвига интерференционных полос на перепаде высот основы и покрытия. Резкая граница между покрытием и основой создавалась путем специального маскирования участка основы. Морфология поверхности износостойких покрытий была исследована при помощи атомной силовой микроскопии (АСМ) на приборе Нанотоп-206. Все изображения поверхностей были получены в полуконтактном режиме при резонансной частоте колебания кантилевера с величиной 251 кГц. Области сканирования составляли (3,0×3,0) мкм<sup>2</sup>. Состояние поверхности осажденных покрытий AlCrN на предмет присутствия дефектов в виде затвердевших капель металла исследовалось с помощью оптической микроскопии на инструментальном микроскопе ПЛАНАР при увеличении 1000<sup>х</sup>. Дефектность поверхности определялась путем подсчета капель с размерами от субмикронных до порядка 5 мкм на площади (275×200) мкм<sup>2</sup>. Исследование адгезионной прочности композиционных покрытий к основе из инструментальной стали проводилось на скретч-тестере JLST 022 (J&L, Южная Корея),

оборудованном датчиком акустической эмиссии, который позволяет определить момент начала растрескивания материала под индентором и динамику процесса трещинообразования по мере движения алмазного индентора Роквелла индентора вдоль поверхности покрытия при возрастающей нормальной нагрузке. Нагрузка на индентор возрастала от 1 Н до 40 Н. Длина трека латерального индентирования составляла 15 мм. Адгезия оценивалась по нескольким параметрам. Первым из них является L<sub>c1</sub> – нагрузка, при которой появляется устойчивый сигнал от датчика акустической эмиссии, свидетельствующий о начале процессов трещинообразования в покрытии. На панорамном снимке трека движения индентора начинают появляться крупные трещины и напластование материала перед движущимся индентором. Вторым критерием является L<sub>c2</sub> – нагрузка, при которой начинают появляться сколы покрытия на периферии трека, связанные с выдавливанием металла на периферию трека и приводящие к появлению в этих местах сколов покрытий. Критерий L<sub>c3</sub> – это нагрузка, при которой покрытие в области трека полностью удаляется с основы. В большинстве случаев это значение принимается за величину адгезии покрытия к основе. Химиче-

ский состав покрытий и распределение химических элементов по толщине исследовался методами оптико-эмиссионной спектроскопии с использованием спектрометра GD-PRFILER 2 (HORIBA, Япония) с шагом прожига 4 нм в тлеющем разряде аргона.

### Результаты и обсуждение

Об эффективности сепарации можно судить по сравнению поверхности покрытий, полученных из сепарированной и несепарированной плазмы, оптические фотографии которых приведены на рисунке 2 для образцов покрытий 1–1 и 2–1 соответственно.

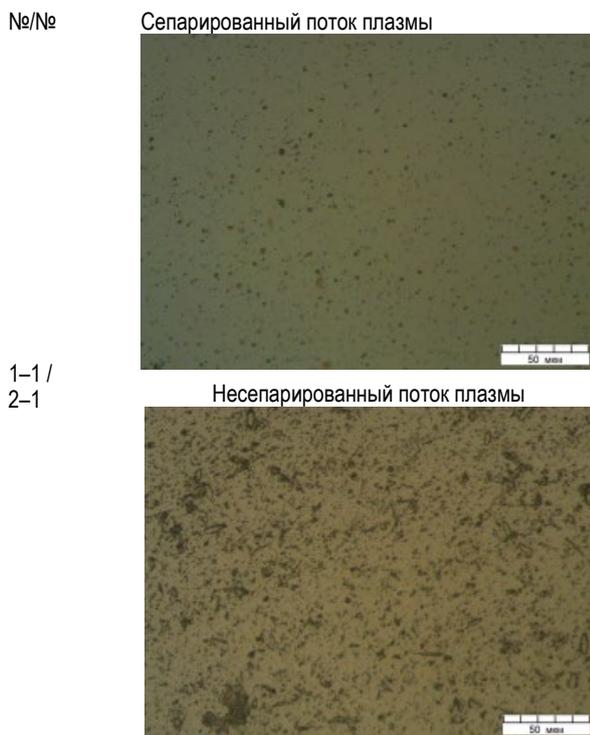


Рисунок 2 – Поверхность покрытия AlCrN из сепарированного и несепарированного потока плазмы (1000<sup>×</sup>)

На поверхности покрытия 2–1 присутствует большое количество частиц с размером 5 мкм и более. Некоторые из них, попадая на поверхность основы под малыми углами, становятся сильно вытянутыми в одном направлении, другие имеют в плоскости рисунка правильную форму круга с уплощенной серединой. Наблюдаются также скопления затвердевших макрокапель вблизи выступов на поверхности покрытия с размером 3–5 мкм. Для сепарированных покрытий на их поверхности присутствуют только дефекты с размерами менее 1 мкм с единичными включениями более крупных частиц порядка 1–3 мкм. Поверхность таких покрытий является сплошной, без видимых проколов. Обработка снимков поверхности по распределению макродефектов в виде гистограмм приведена на рисунке 3.

Можно видеть, что в условиях сепарации эффективно удаляются макрочастицы с размером более 1 мкм. Число мелких частиц также снижается на 25–30 %. Ощутимое влияние на распределение макрочастиц оказывает давление азота. Для сепарированной плазмы плотность макрочастиц с размером менее 1 мкм снижается с 1250 до 1230 при увеличении давления азота с 6,3 мПа до 11 мПа. При этом значительно увеличивается количество частиц средних размеров для режима осаждения без сепарации, что обусловлено формированием нитридов на поверхности катода, которые препятствуют формированию больших ванночек расплавленного металла в окрестности катодного пятна. Учитывая, что частицы 1–3 мкм достаточно эффективно удаляются сепаратором, можно заключить, что в отличие от режима отсутствия сепарации повышение давления реакционного газа в режиме сепарации благоприятно сказывается на чистоте поверхности покрытий.

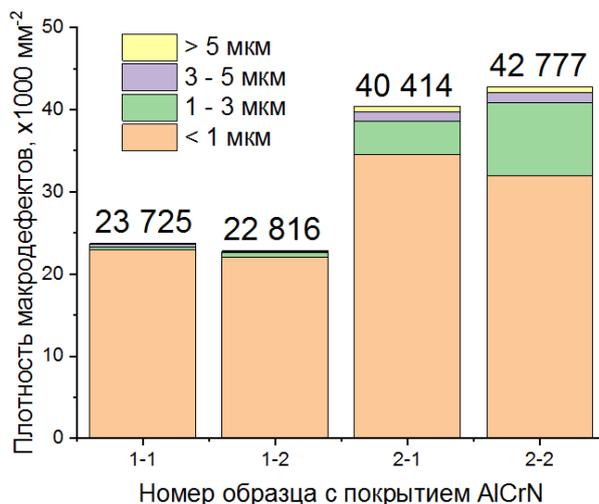
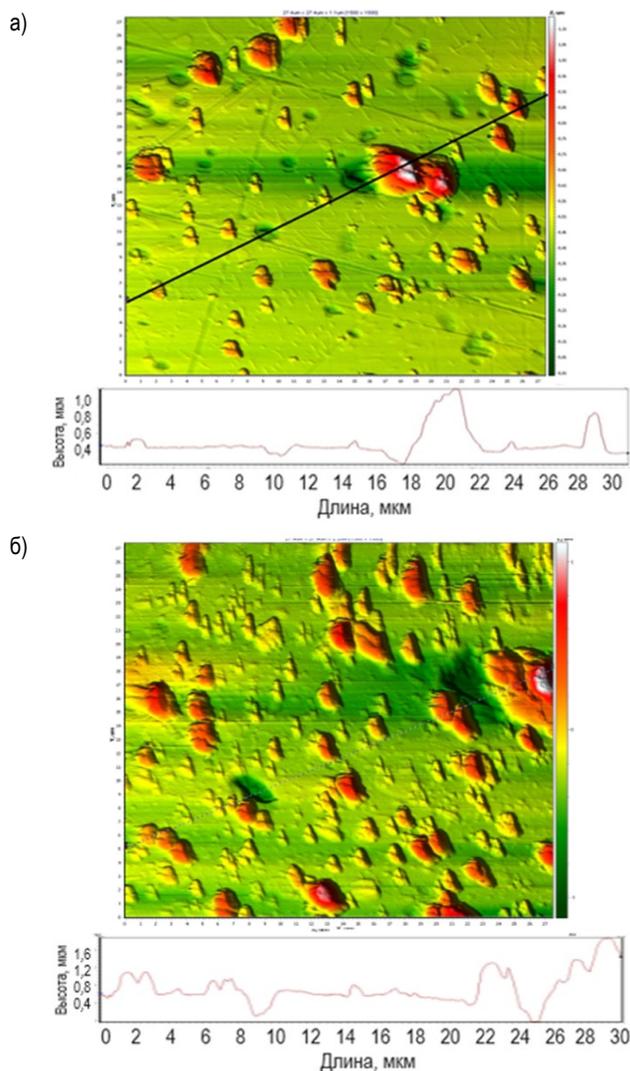


Рисунок 3 – Содержание макродефектов в покрытии AlCrN

На рисунке 4а приведено изображение поверхности образца 1–3, полученное с помощью атомного силового микроскопа. Поле сканирования составляет 28×28 мкм<sup>2</sup>. Внизу рисунка помещен профиль поверхности вдоль линии, показанной на рисунке. Можно видеть, что преобладающими дефектами поверхности являются частицы менее одного микрона. В то же время встречаются одиночные более крупные капли с размерами до нескольких микрометров. Они являются сильно уплощенными, соотношение высоты и диаметра составляет 1:4 для крупных частиц и 1:10 для мелких. Вдоль линии профиля можно видеть два дефекта покрытия в виде углублений, образованные макрочастицами, которые отделились от поверхности при соударении. Глубина микропор составляет порядка нескольких долей микрометра при диаметре около 1 мкм. Такие дефекты являются нередкими, как это можно видеть на приведенном АСМ изображении. Несмотря на наличие дефектов, пленка остается достаточно гладкой с параметрами шероховатости  $R_a = 47$  нм,  $R_q = 90$  нм при значении коэффициента асимметрии  $R_{sk} = 3$  и куртозиса  $R_{ku} = 17$ . Наличие макродефектов повышает уровень шероховатости по отношению к основе без покрытия. Для основы  $R_a = 5$  нм,  $R_q = 6$  нм,  $R_{sk} = -0,91$ ,  $R_{ku} = 4,62$ . Тем не менее, сепарация плазмы в несколько раз уменьшает показатели шероховатости, которые для покрытия, полученного без сепарации, составляют  $R_a = 164$  нм,  $R_q = 236$  нм,  $R_{sk} = 1,46$ ,  $R_{ku} = 6,96$ , как это можно видеть на примере покрытия 2–3 (рисунок 4б). Положительные значения параметра  $R_{sk}$  свидетельствуют о том, что для покрытий функция распределения высот/впадин является асимметричной со смещением максимума в сторону отрицательных значений, т. е. преобладают впадины по отношению к средней линии профиля поверхности, в то время как для поверхности основы наблюдается противоположная картина. Большие значения куртозиса для покрытий, полученных с сепарацией плазмы, свидетельствуют об узкой функции распределения высот/впадин и означают, что мелкие макрочастицы, вносящие основной вклад в шероховатость поверхности, имеют очень узкий разброс по размерам. Наличие крупных частиц на поверхности покрытий, полученных без сепарации, приводит существенно более низкому значению  $R_{ku}$ . В обоих случаях распределение высот выступов и глубин впадин не подчиняется нормальному распределению случайных величин. При этом наибольшее отклонение от этого закона имеет место для покрытий первого (с сепарацией) типа.

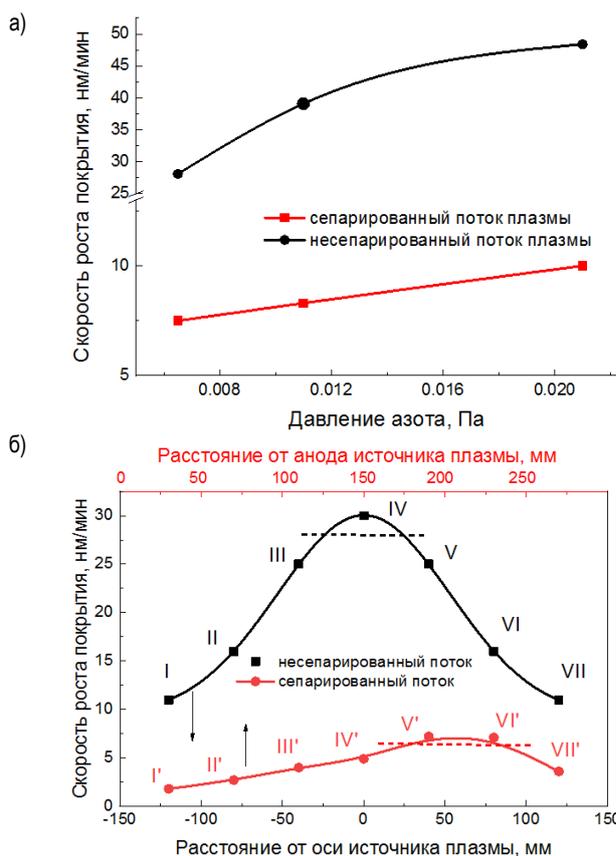
Возможные причины появления мелких макродефектов на поверхности растущего покрытия связаны с дрейфом эжектируемых с поверхности катода расплавленных частиц с наведенным дипольным моментом в сторону поверхности конденсации в неоднородном электрическом поле при подаче напряжения смещения к основе – 100 В, а также с отсутствием ловушек макрочастиц в используемом магнитном сепараторе открытого типа. В результате отражения капель от стенок вакуумной камеры и технологической оснастки не исключено их попадание в зону роста покрытия.



**Рисунок 4** – АСМ изображение поверхности образца покрытия 1–3 (а) и 2–3 (б). Внизу показан профиль поверхности вдоль отмеченной линии

Важным технологическим параметром формирования покрытий является скорость их роста. Она является одним определяющих факторов длительности вакуумного цикла несения покрытий и экономической эффективности технологии. На рисунке 5 приведены зависимости скорости роста покрытия от величины давления азота для сепарированного и несепарированного потоков плазмы. Общей тенденцией для обоих режимов нанесения покрытий является монотонное повышение скорости роста с увеличением давления азота. В исследуемом диапазоне давления 6,5–21,0 мПа наблюдается линейное увеличение данного параметра с 7,5 нм/мин до 10 нм/мин. Как можно видеть из рисунка 5, имеет место многократное снижение скорости роста покрытий при сепарации плазмы. Так, при давлении азота 11 мПа она уменьшается в 4,7 раза. По-видимому, проблема заключается в недостаточно сильных магнитных полях, формируемых соленоидами системы сепарации. Численные расчеты с помощью программной среды ANSYS Maxwell 16 показывают, что величина поля в области карусели вакуумной камеры составляет не более 0,3 мТл, что явно недостаточно для замагничивания ионов плазмы – их ларморовский радиус намного превосходит размеры вакуумной камеры.

Изменение направления движения ионов осуществляется только благодаря кулоновскому взаимодействию ионной и электронной составляющих плазмы, последняя из которых является полностью замагниченной и движется вдоль силовых магнитных линий, что, однако, не является достаточно эффективным для транспорта плазмы по криволинейной траектории.



**Рисунок 5** – Зависимость скорости осаждения покрытий AlCrN от давления азота для подложек, расположенных на центральных позициях IV (рисунок 16) (а) и от расположения подложек в вакуумной камере при давлении азота 6,5 мПа (б)

Диаграмма направленности потока плазмы при дуговом испарении является сильно вытянутой в направлении нормали к поверхности катода, и это сильно сказывается на скорости роста и толщине покрытия на участках подложки, расположенных на удалении от оси потока. На рисунке 5б для давления азота 6,5 мПа показано, как изменяется скорость осаждения в зависимости от расположения подложек по схеме рисунка 16.

Для условий сепарации наблюдается асимметричное распределение скорости осаждения покрытия со смещением максимума на 80 мм от центра карусели, на которой расположены подложки, в сторону катода. Различия в скорости осаждения покрытия между крайними верхней и нижней точками расположения подложек при расстоянии 25 см является двукратным и составляет 25 % и 50 % максимальной скорости соответственно. На рисунке 5 пунктирной линией отмечена зона равномерного осаждения, в пределах которой отклонение скорости осаждения и, следовательно, толщины покрытия составляет не более  $\pm 5\%$ . Несмотря на существенное отличие в характере изменения скорости от расстояния зона равномерного осаждения составляет порядка 80 мм для обоих режимов.

Следует отметить, что все эксперименты проводились без вращения карусели, и анализируются особенности осаждения покрытий на неподвижные подложки. Особенностью зависимости скорости осаждения  $V$  покрытия от расстояния  $x$  от оси потока для режима отсутствия сепарации является то, что она описывается законом нормального распределения случайной величины с центром распределения при  $x = 0$ :

$$V(x) = 9,4 + 20,7 \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{53,1}\right)^2\right\}. \quad (1)$$

Наличие постоянной составляющей в выражении (1) означает возможность роста покрытия в любом месте вакуумной камеры со скоростью не меньшей 9 нм/мин, что составляет 30 % от максимальной скорости в центре карусели для данных условий осаждения.

Для многокомпонентных мишеней при катодно-дуговом осаждении часто нарушается соотношение компонент мишени и покрытия. Эта проблема может усугубляться при движении плазмы в криволинейном магнитном поле. Поэтому важным является определение элементного состава покрытий. Такие исследования были выполнены для всех образцов. На примере образца 1–3 на рисунке 6 приведен профиль распределения химических элементов по глубине покрытия толщиной около 0,3 мкм. Следует отметить, что элементы равномерно распределены по глубине покрытия и качественно согласуются с составом катода и применяемыми реакционными газами. Наблюдается довольно большая переходная область между покрытием и основой порядка 0,1 мкм, связанная с шероховатостью и волнистостью поверхности основы в пределах области спектрально анализа площадью 5 мм<sup>2</sup> и в меньшей степени с взаимодиффузией элементов покрытия и основы. Состав покрытий на глубине, равной 0,1 мкм, приведен в таблице 2.

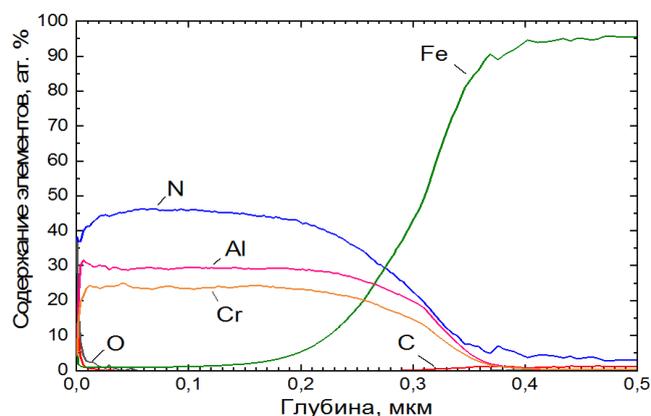


Рисунок 6 – Химический состав покрытия 1–3 по глубине

Таблица 2 – Химический состав покрытий AlCrN(C)

Номер образца	Содержание элементов в покрытии, ат. %					
	C	N	Al	Cr	Al/Cr	$\frac{N+C}{Al+Cr}$
1–1	0,00	38,53	40,36	21,12	1,91	0,62
1–2	0,00	45,81	29,93	24,26	1,23	0,84
1–3	0,00	45,83	30,09	24,08	1,25	0,85
1–4	0,00	45,53	30,41	24,07	1,26	0,85
2–1	0,00	19,94	35,25	44,81	0,78	0,25
2–2	0,00	39,83	30,24	29,93	1,01	0,65
2–3	0,00	42,45	28,71	28,84	1,00	0,73
2–4	6,78	31,50	32,16	29,56	1,09	0,62

Обращает на себя внимание практическое отсутствие углерода в составе покрытия 1–4. Вероятно, это связано с тем, что в сепарированном потоке сильно падает плотность плазмы и ионизация молекул ацетилена или образование радикалов типа  $C\equiv CH$ ,  $C-H$ ,  $C=C$  становится маловероятным. Эти нелетучие фрагменты являются источником углерода при формировании карбонитрида хром-алюминия. Обращает на себя внимание малое содержание углерода по сравнению с азотом в покрытии, полученным без сепарации плазмы (покрытие 2–4), учитывая их одинаковые парциальные давления. Исходя из соображений термодинамики формирования соединений азота и углерода с переходными металлами, для которых энтальпия образования нитридов по величине значительно превышает энтальпию образования карбидов, преобладающим будет синтез нитридов, что и наблюдается в данных экспериментах.

Из данных таблицы 2 следует, что для обоих режимов транспорта плазмы при всех условия осаждения соотношение алюминия и хрома в катоде и покрытиях очень сильно разнятся. Если соотношение частиц алюминия и хрома в катоде составляет 7/3, то в покрытиях оно колеблется от 0,78 до 1,9. При этом данное соотношение несколько выше для покрытий, полученных в режиме сепарации.

Причина обеднения покрытия алюминием не совсем ясна. Наиболее вероятным фактором может быть уход более легких и быстродвижущихся частиц алюминия из плазменной струи, т. е. диаграмма разлета алюминиевой подсистемы плазмы может быть значительно более широкой, чем подсистема хрома. Не исключена причина, связанная с распылением конденсирующихся на подложке частиц алюминия более тяжелыми частицами хрома, что особенно должно проявляться при подаче на подложку потенциала смещения.

В условиях сепарации и движения плазмы по криволинейным траекториям менее инерционные ионы алюминия отклоняются значительно лучше, чем в два раза более тяжелые ионы хрома. В результате баланс элементов при сепарации на 25 % смещается в сторону алюминия. Будучи более химически активным элементом, алюминий увеличивает содержание неметаллической компоненты покрытия, как это можно видеть из последней колонки таблицы 2. В этом отношении сепарация благоприятно сказывается на приближении состава покрытия к стехиометрическому, что определяет более высокую стабильность в отношении изнашивания и окисления покрытия при его эксплуатации. Для всех покрытий, полученных в обоих режимах транспорта плазмы, содержание металлических компонент превышает содержание неметаллических компонент. В этом случае кристаллическая решетка тонкопленочного материала будет содержать довольно большое количества вакансий азота, которые в условиях эксплуатации и нагрева покрытий будут, скорее всего, замещаться кислородом.

На эксплуатационные характеристики покрытий, наряду с твердостью и износостойкостью важнейшей характеристикой является адгезия покрытия к основе. Для всех образцов было выполнено исследование треков движения алмазного индентора по поверхности покрытий, которые для покрытий 1–3, 1–4 и 2–3, 2–4 приведены на рисунке 7. Внизу треков помещена шкала нормальной нагрузки на индентор по мере его движения слева направо. Анализ треков позволил определить систему критических нагрузок (указана на рисунке 7), в полной мере описывающую характер производимых разрушений в покрытии, по которому можно судить об адгезии к основе. Полученные данные приведены в таблице 3.

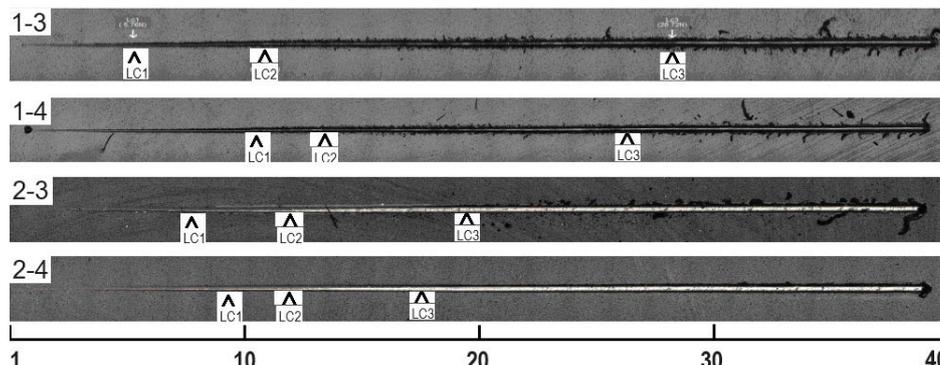


Рисунок 7 – Изображения треков алмазного индентора на поверхности покрытий AlCrN. Шкала в Ньютонах соответствует нагрузке на индентор в каждом конкретном месте трека

Из рисунка 7 следует, что для всех образцов обоих режимов осаждения характерными разрушениями являются интенсивное трещинообразование при нагрузке  $L_{c1} = (5-9)$  Н, переходящее в микроотслаивание покрытия на периферии трека при нагрузке  $L_{c2} = (8-13)$  Н, затем полное удаление покрытия при  $L_{c3} = (16-26)$  Н. Общей тенденцией является увеличение критической нагрузки  $L_{c1}$  как для покрытий группы 1 (сепарация), так и группы 2 (отсутствие сепарации) по мере роста давления реакционных газов. Это означает, что покрытия становятся более вязкими и меньше растрескиваются как результат получения более однородной структуры с меньшим количеством вакансий неметаллической компоненты. По этому критерию покрытия групп 1 и 2 являются примерно одинаковыми.

**Таблица 3** – Значения критических нагрузок в адгезионных испытаниях

Критическая нагрузка	Номер образца покрытия							
	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4
$L_{c1}$ , Н	5,4	4,0	5,8	10,6	4,6	4,3	7,6	9,2
$L_{c2}$ , Н	7,8	10,5	11,1	13,1	8,9	10,8	12,5	12,1
$L_{c3}$ , Н	16,3	19,4	28,7	26,1	19,6	19,8	19,8	17,5

Подобным образом ведут себя покрытия в отношении периферийного отслаивания. Заметное различие наблюдается для критической нагрузки  $L_{c3}$  полного удаления покрытия. Как видно из таблицы 3, сепарация плазмы приводит существенному увеличению адгезии покрытий к основе. Для образца покрытия 1-3 критическая нагрузка составляет 28,7 Н, тогда как для образцов группы 2 она не превышает 20 Н. Отсутствие крупных макрочастиц в покрытиях группы 1 приводит к снижению силы трения и уменьшению сдвиговых напряжений между основой и покрытием.

#### Заключение

Получены покрытия нитрида алюминий-хром в условиях сепарации плазмы стационарного катодно-дугового разряда. Показано, что существующая магнитная система сепарации вакуумной установки УВНИПА-1-001 позволяет снизить количество макрочастиц – побочного продукта эрозии катода – в 1,7–2 раза в зависимости от давления азота. При этом покрытия практически не содержат крупных, более 1 мкм в диаметре макрочастиц. Для данного сепаратора остается проблемой удаление макрочастиц размером менее 1 мкм. Их плотность остается достаточно высокой (порядка 22 000 мм<sup>-2</sup>) и незначительно снижается с ростом давления азота. Сепарация приводит к многократному снижению скорости роста покрытия из-за недостаточной интенсивности магнитного поля, управляющего движением потока по криволинейной траектории. Методами АСМ показано наличие пор субмикронных размеров, которые формируются макрочастицами при отражении их поверхностью основы. Из анализа элементного состава покрытий показано, что имеет место расслоение плазменного потока двухкомпонентной металлической плазмы на ионные составляющие хрома и алюминия, приводящее к значительному отклонению состава покрытий от состава мишени с сильным дефицитом алюминия. При этом сепарация благоприятно сказывается на приближении состава покрытия к стехиометрическому AlCrN. Покрытия из сепарированной плазмы имеют более высокую адгезию к основе из инструментальной стали. Лучшим достигнутым результатом по адгезии является 29 Н для покрытия AlCrN, полученного при давлении азота 21 мПа, что в 1,5 раза превышает силу адгезии образцов покрытий без сепарации плазмы. Этот результат является важным дополнительным аргументом в пользу развития технологий улучшения состава катодно-дуговой плазмы.

*Работа выполнена в рамках проекта БРФФИ T23M-048.*

#### Список цитированных источников

1. Microstructure of TiAlN and CrAlN coatings and cutting performance of coated silicon nitride inserts in cast iron turning / Y. Long [et al.] // *Ceramics International*. – 2014. – Vol. 40. – P. 9889–9894.
2. The effect of temperature on wear mechanism of the AlCrN coated components / M. Michalak [et al.] // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 674. – P. 233–238.

3. Veprek, S. Industrial application of superhard nanocomposite coatings / S. Veprek, M.J.G. Veprek-Heijman // *Surface and Coating Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P. 5063–5073.
4. Thermal stability of arc evaporated high aluminum-content Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N thin films / A. Hörling [et al.] // *Journal Vacuum Science Technology A*. – 2002. – Vol. 20. – P. 1815–1823.
5. A study of the oxidation behavior of CrN and CrAlN thin films in air using DSC and TGA analysis / J. Lin [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P. 3272–3283.
6. Chen, C. S. Diffusion barrier properties of amorphous ZrCN films for copper metallization / C. S. Chen, C. P. Liu // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2005. – Vol. 351. – P. 3725–3729.
7. Properties and performance of diamond coated ceramic cutting tools / S. Soderberg [et al.] // *Applications of Diamond Films and Related Materials*. – 1991. – P. 43–51.
8. Influence of deposition parameters on hard Cr-Al-N coatings deposited by multi-arc ion plating / L. Wang [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2012. – Vol. 258. – P. 3629–3636.
9. Yusuf, A. A. Corrosion resistance behavior of single-layer cathodic arc PVD nitride-base coatings in 1M HCl and 3.5 pct NaCl solutions / A. A. Yusuf, Z. M. Gasem, A. M. Kumar // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2011. – Vol. B 48. – P. 1321–1332.
10. Tribological behaviors of super-hard TiAlN coatings deposited by filtered cathode vacuum arc deposition / Zh. Zhang [et al.] // *Materials*. – 2022. – Vol. 15 (36). – P. 2236.
11. Распределение химических элементов в покрытиях, полученных катодно-дуговым методом в условиях магнитной сепарации плазмы / М. Ю. Хома [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов ФТИ НАН Беларуси*. – 2022. – Т. 2. – С. 224–233.

#### References

1. Microstructure of TiAlN and CrAlN coatings and cutting performance of coated silicon nitride inserts in cast iron turning / Y. Long [et al.] // *Ceramics International*. – 2014. – Vol. 40. – P. 9889–9894.
2. The effect of temperature on wear mechanism of the AlCrN coated components / M. Michalak [et al.] // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 674. – P. 233–238.
3. Veprek, S. Industrial application of superhard nanocomposite coatings / S. Veprek, M.J.G. Veprek-Heijman // *Surface and Coating Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P. 5063–5073.
4. Thermal stability of arc evaporated high aluminum-content Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N thin films / A. Hörling [et al.] // *Journal Vacuum Science Technology A*. – 2002. – Vol. 20. – P. 1815–1823.
5. A study of the oxidation behavior of CrN and CrAlN thin films in air using DSC and TGA analysis / J. Lin [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P. 3272–3283.
6. Chen, C. S. Diffusion barrier properties of amorphous ZrCN films for copper metallization / C. S. Chen, C. P. Liu // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2005. – Vol. 351. – P. 3725–3729.
7. Properties and performance of diamond coated ceramic cutting tools / S. Soderberg [et al.] // *Applications of Diamond Films and Related Materials*. – 1991. – P. 43–51.
8. Influence of deposition parameters on hard Cr-Al-N coatings deposited by multi-arc ion plating / L. Wang [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2012. – Vol. 258. – P. 3629–3636.
9. Yusuf, A. A. Corrosion resistance behavior of single-layer cathodic arc PVD nitride-base coatings in 1M HCl and 3.5 pct NaCl solutions / A. A. Yusuf, Z. M. Gasem, A. M. Kumar // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2011. – Vol. B 48. – P. 1321–1332.
10. Tribological behaviors of super-hard TiAlN coatings deposited by filtered cathode vacuum arc deposition / Zh. Zhang [et al.] // *Materials*. – 2022. – Vol. 15 (36). – P. 2236.
11. Распределение химических элементов в покрытиях, полученных катодно-дуговым методом в условиях магнитной сепарации плазмы / М. Ю. Хома [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов ФТИ НАН Беларуси*. – 2022. – Т. 2. – С. 224–233.

*Материал поступил 06.03.2024, одобрен 29.03.2024, принят к публикации 29.03.2024*

## ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА АГРЕГАТА ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕ-ПОСЕВНОГО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО АППМ-6

С. В. Савчук<sup>1</sup>, А. Н. Парфиевич<sup>2</sup>, С. В. Монтик<sup>3</sup>, О. А. Медведев<sup>4</sup>

<sup>1</sup> К. т. н., доцент кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: sergeyskb@tut.by

<sup>2</sup> К. т. н., доцент, декан факультета электронно-информационных систем, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: parfievichand@gmail.com

<sup>3</sup> К. т. н., доцент, заведующий кафедрой машиностроения и эксплуатации автомобилей, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: svmontik@mail.ru

<sup>4</sup> К. т. н., доцент, доцент кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: olanmed56@gmail.com

### Реферат

В статье рассмотрена гидравлическая система агрегата комбинированного почвообрабатывающе-посевного АППМ-6, представлены и изучены основные узлы данной системы, проведено изучение особенностей ее функционирования, рассмотрены вопросы, касающиеся соблюдения определенных требований обязательных при эксплуатации данной машины.

**Ключевые слова:** агрегат почвообрабатывающе-посевной многофункциональный, система гидравлическая, трактор, рабочий орган, соединение.

## HYDRAULIC SYSTEM OF THE MULTI-FUNCTIONAL TILLAGE AND SOWING UNIT APPM-6

S. V. Sauchuk, A. N. Parfievich, S. V. Montik, O. A. Medvedev

### Abstract

The article considers the hydraulic system of the combined tillage-sowing unit APPM-6, presents and studies the main components of this system, studies the features of its functioning, discusses issues related to compliance with certain mandatory requirements for the operation of this machine.

**Keywords:** multifunctional tillage and sowing unit, hydraulic system, tractor, working body, connection.

### Введение

Одним из основных потребителей гидравлических систем является сельскохозяйственное машиностроение, где системы мощностью 10–20 кВт применяются для эксплуатации навесного оборудования тракторов, а также исполнительных механизмов активных рабочих органов уборочных машин, почвенных фрез и др. [1].

Для достижения высоких качественных показателей при осуществлении агротехнического процесса сева в современных условиях необходимо применять новые высокопроизводительные машины, способные совместить в своей конструкции различные операции и тем самым выйти на кратчайшие сроки проведения посевных работ, повысить качество агротехнического процесса.

Совмещение в составе почвообрабатывающей и посевной машины различных функций ведет к усложнению конструкции машины, зачастую требует отдельного управления различными элементами и рабочими органами, причем это должно производиться с минимальной себестоимостью. Наиболее простым и в то же время эффективным способом управления элементами посевного агрегата является управление и регулирование составных частей машины с помощью гидравлической системы.

В настоящее время на имеющемся парке тяговых средств используется электрогидравлическая система, позволяющая управлять задним навесным устройством, которое в свою очередь агрегируется с почвообрабатывающими орудиями, а также гидрофицированными рабочими органами мобильных машин, например, гидромотором вентилятора сеялки и др. [2]. Функциональная схема такой системы представлена на рисунке 1. Представленная система состоит из следующих элементов: пульты управления 1 передним и задним навесным устройством, программатор 2 и джойстики 3, которые управляют последовательностью работы внешних потребителей со стороны оператора, микропроцессорные контроллеры 4, электрогидравлический регулятор 5 переднего навесного устройства 6, датчик угла поворота 7, гидробак 8, насос переменной производительности 9, клапан «ИЛИ» 10, датчики перемещения и усилия 11, 12, а также кнопочный внешний пульт управления 13, электрогид-

равлический регулятор заднего навесного устройства 14 и секции внешних потребителей гидроблока 15. Указанная система также хорошо укладывается в концепцию активного управления положением рамы посевного агрегата в случае регулирования ее высоты над рельефом поверхности, при наличии в составе посевного агрегата дополнительных компонентов для данной реализации.

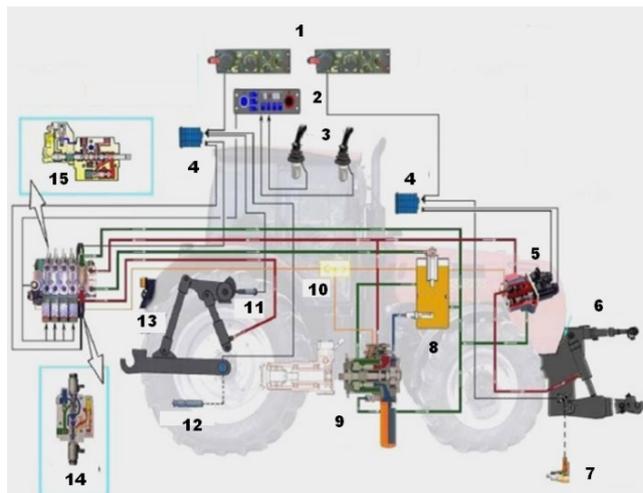


Рисунок 1 – Функциональная схема электрогидравлической системы управления рабочими органами трактора «Беларус МТЗ-3022»

### Основная часть

Агрегат АППМ-6 «Берестье» предназначен для обработки почвы после вспашки с одновременным высевом и внесением удобрений или для мульчированного сева зерновых, зернобобовых, крестоцветных культур.

Специально закаленный материал в сочетании с оптимизированной конструкцией, гибким модульным строением и благоприятным положением центра тяжести обеспечивают этой эффективно и точно работающей машине славу надежного и прочного сельскохозяйственного орудия. Оснащение рабочими органами дает возможность одновременно проводить подготовку поверхности почвы и сев. Кроме того, оптимально рассчитанное положение центра тяжести машины обеспечивает хорошее обратное уплотнение почвы. Так как обработка почвы осуществляется только прицепными рабочими органами, то и расход топлива является низким.

Все рабочие органы для подготовки почвы можно регулировать на нужную глубину обработки. Прикатывающие катки позволяют осуществить точное регулирование глубины хода.

Для обратного уплотнения поверхностного слоя имеется каток на пневмошинах.

Мульчирующий сошник согласован с особенностями машины. С этим сошником в различных почвенных условиях можно обеспечить более высокие скорости движения, чем с другими типами сошников.

Агрегат агрегируется с тракторами «Беларус-2522», «Беларус-3022» и другими тракторами класса 5.

На агрегате АППМ-6ДУ применена зависимая гидравлическая система.

Включает в себя цепи:

- 1) гидромотора;
- 2) гидроцилиндров.

Цепь гидромотора служит для работы вентилятора, состоит из напорной и сливной линий.

АППМ-6ДУ агрегируется с тракторами 5-класса, в которых применяется регулируемый гидронасос, за счет которого достигается постоянство частоты вращения гидромотора (вентилятора) [3].

Для уменьшения сопротивления гидравлической жидкости в сливной линии и тем самым уменьшения давления в сливной линии используется муфта с условным проходом DN25 (рисунок 2) (напорная линия – муфта с условным проходом DN13) (рисунок 3).



Рисунок 2 – Муфта с условным проходом DN25



Рисунок 3 – Муфта с условным проходом DN13

Для уменьшения нагрузки и дальнейшего выхода из строя гидромотора во время отключения (запитки гидросистемы гидромотора) применяется обратный клапан (рисунок 4).

Зависимая цепь гидроцилиндров состоит из двух независимых от друга ветвей:

- 1) складывание и раскладывание боковых секций и маркеров;
- 2) поднятие и опускание сеялки и приводного колеса.



Рисунок 4 – Обратный клапан

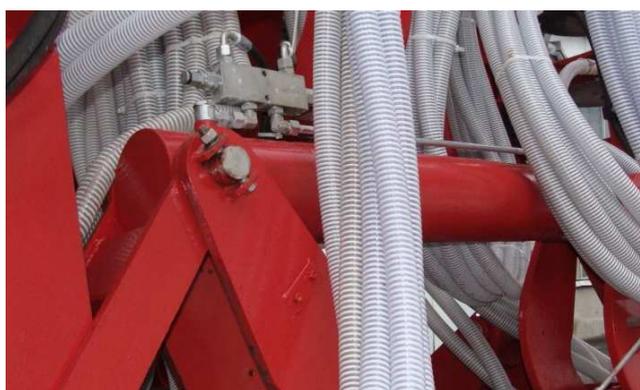


Рисунок 5 – Гидроцилиндр складывания-раскладывания боковых секций

#### Складывание и раскладывание боковых секций и маркеров

Ветвь на складывание и раскладывание боковых секций и маркеров осуществляет поочередную работу гидроцилиндров: складывания боковых секций и маркеров. В момент складывания и раскладывания боковых секций маркеры не раскладываются.

Это достигается перекрытием гидравлических потоков спаренным шаровым трехходовым краном. Перекрытие потоков осуществляется переводом рычага крана (рисунок 6).



Рисунок 6 – Спаренный шаровый трехходовой кран

Для осуществления складывания и раскладывания боковых секций и маркеров требуется подключение одной пары гидравлических рукавов к трактору (рисунок 7).



Рисунок 7 – Пары гидравлических рукавов



Рисунок 9 – Гидроцилиндры поднятия и опускания пакерных катков

От самопроизвольного раскладывания боковых секций и предотвращении несчастных случаев во время разрыва гидравлического рукава предусмотрена гидравлическая страховка в виде контрбаласного клапана, установленного на самом гидроцилиндре. В случае обрыва трубопровода на гидроцилиндре предусмотрена механическая страховка.

Поочередное раскладывание маркеров осуществляет гидроуправляемый распределитель выбора направления, включённый в цепь гидроцилиндров маркеров (рисунок 8), который имеет две пары выводов цепей гидроцилиндров (слева – цепи гидроцилиндров маркеров и складывания-раскладывания боковых секций, справа – цепи гидроцилиндров приводного колеса и пакерного катка).

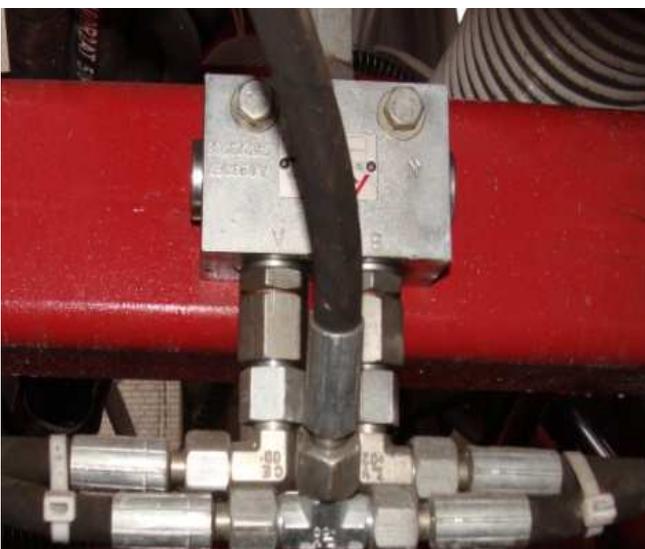


Рисунок 8 – Гидроуправляемый распределитель выбора направления

#### Поднятие и опускание пакерных катков и приводного колеса

Ветвь на поднятие и опускания пакерных катков и приводного колеса осуществляет одновременную работу гидроцилиндров: поднятие и опускания пакерных катков (центральной секции и боковой) (рисунок 9) и приводного колеса (рисунок 11).

Одновременная работа гидроцилиндров (в рабочем положении) приводного колеса, поднятия пакерных катков центральной рамы и боковых секций, а также поочередная работа гидроцилиндров поднятия пакерных катков центральной рамы и боковых секций (в транспортном положении) достигается за счет использования четырехходового шарового крана (рисунок 10).



Рисунок 10 – Четырехходовой шаровый кран

На гидроцилиндрах поднятия пакерных катков центральной рамы установлены контрбаласные клапана для гидравлической страховки от самопроизвольного опускания центральной рамы в момент транспортировки.



Рисунок 11 – Гидроцилиндр приводного колеса

Подключение агрегата к трактору:

агрегат АППМ-6ДУ имеет три пары гидровыводов:

- 1 пара – цепь гидромотора;
- 2 пара – цепь гидроцилиндров маркеров и гидроцилиндров складывания и раскладывания боковых секций;
- 3 пара – цепь гидроцилиндров пакерного катка и гидроцилиндра приводного колеса.

Каждая пара рукавов имеет свою маркировку в виде заглушек различного цветового оттенка:

- цепь гидромотора – синий цвет заглушек гидромуфт;
- цепь маркеров и боковых секций – зеленый цвет заглушек гидромуфт;
- цепь гидроцилиндров пакерных катков и приводного колеса – красный цвет заглушек гидромуфт.

Подключение следует производить попарно в одну секцию распределительного блока трактора.

Необходимо соединять только безнапорные гидравлические линии.

Соединять гидравлические шланги с гидросистемой трактора можно только, когда в гидросистеме трактора и орудия не имеется напора. Высокое давление в гидросистеме может вызвать срабатывание непредвиденных движений.

Избегать перемешивания разных сортов масла!

Применение орудия с различными тракторами может привести к недопустимому смешиванию масел. Смешивание масел может повредить детали трактора.

*Проверка шлангов и муфт*

Перед соединением проверьте все гидравлические шланги на отсутствие повреждений. После соединения проверьте прочное крепление всех гидромуфт. Дефектные гидравлические шланги или плохо закрепленные гидравлические муфты могут привести к срабатыванию непредвиденных движений машины или к травматизму персонала.

*Не превышать максимальное число оборотов вентилятора*

У вентилятора с гидроприводом частота вращения вентилятора не должна превышать 5000 об/мин. При более высокой частоте вращения вентилятор может разрушиться, и его осколки могут привести к серьезному повреждению машины. Находящиеся поблизости люди могут получить тяжелые увечья или даже погибнуть.

*Проверка гидравлических шлангов*

Перед эксплуатацией необходимо внимательно проверить соединения гидравлических шлангов и сами шланги. Если гидравлические шланги присоединены небрежно или повреждены, то возможна утечка горячего масла, что может привести к тяжелым травмам.

*Поднимание или опускание*

С помощью надлежащего распределительного клапана на тракторе орудие можно приподнять или опустить в рабочее положение. При поднятом орудии рабочие органы его приподнимаются над поверхностью почвы до такой высоты, что будет возможно движение трактора с орудием, например, на разворотных полосах.

*Раскладывание и складывание только при поднятом орудии*

Раскладывание и складывание можно проводить только при поднятом орудии. При складывании/раскладывании в рабочем положении машину можно сильно повредить.

С помощью надлежащего распределительного клапана на тракторе орудие можно разложить или сложить в транспортное положение.

Выключение машины:

- выключите (рисунок 12) гидравлический привод вентилятора;
- поставьте трактор и машину на ровную поверхность;
- приведите машину в транспортное положение;
- закройте запорный кран.

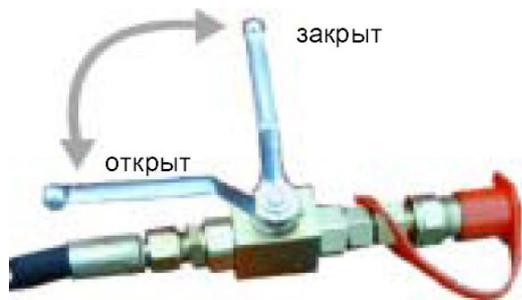


Рисунок 12 – Запорный кран

## Заключение

Гидравлическая система агрегата АППМ-6 является одним из важнейших узлов машины, обеспечивающим правильное функционирование составляющих элементов и выполнение исполнительных команд, задающих основные показатели (число оборотов вентилятора, обеспечение плоскопараллельного движения, установку и поддержание требуемой глубины обработки почвы, выставление заданной глубины посева и др.) при выполнении агротехнического процесса.

Подключение гидравлики должно производиться только в безнапорном состоянии. Соединять гидравлические шланги с гидросистемой трактора можно только тогда, когда в гидросистеме трактора и орудия не имеется напора. Высокое давление в гидросистеме может вызвать срабатывание непредвиденных движений. Во время работы гидросистема находится под высоким давлением. Необходимо регулярно производить проверку всех трубопроводов, шлангов и резьбовых соединений на наличие неплотностей и внешние повреждения. При поиске мест утечек важно использовать только предназначенные для этого инструменты. Повреждения необходимо устранять немедленно. Эксплуатация машины с любыми повреждениями строго запрещается. Кроме того, вытекшее масло может стать причиной травматизма и пожаров. При получении травмы следует немедленно обратиться к врачу.

От безусловного соблюдения указанных выше требований зависит как сама возможность соединения посевной машины с тяговым средством, так и качество выполняемых работ в соответствии с техническим регламентом. Особое внимание необходимо уделить соблюдению охраны труда при выполнении данного вида работ, так как гидравлическая система является источником повышенной опасности. Поэтому разрешается эксплуатация агрегата только с исправной гидравлической системой, со своевременным проведением всех регламентных работ по техническому обслуживанию, изложенному в руководстве по эксплуатации машины обученных специалистов в области сельского хозяйства и лиц, получивших квалификацию для выполнения сельскохозяйственных работ иным путем и прошедшим инструктаж по обращению с этой машиной.

## Список использованных источников

1. Кондаков, Л. А. Машиностроительный гидропривод / Л. А. Кондаков, Г. А. Никитин, В. Н. Прокофьев ; под ред. В. Н. Прокофьева. – М. : Машиностроение, 1978. – 495 с.
2. Подшиваленко, И. Л. Гидронавесная система тракторов «Беларус» с джойстикovým управлением : методические указания по выполнению лабораторной работы / И. Л. Подшиваленко, А. И. Русак, А. В. Сафонов. – Горки : БГСХА, 2014. – 24 с.
3. Руководство по эксплуатации агрегата почвообрабатывающе-посевного многофункционального АППМ-6 / сост.: А. В. Кузнецова, А. А. Кухарчук, И. В. Синюкович : утв. ОАО «Брестский электромеханический завод» 16.06.2008 г.: текст по состоянию на 01 сентября 2023 г. – Брест, 2008. – С. 11–16.

## References

1. Kondakov, L. A. Mashinostroitel'nyj gidroprivod / L. A. Kondakov, G. A. Nikitin, V. N. Prokof'ev ; pod red. V. N. Prokof'eva. – M. : Mashinostroenie, 1978. – 495 s.
2. Podshivalenko, I. L. Gidronavesnaya sistema traktorov «Belarus» s dzhoystikovym upravleniem : metodicheskie ukazaniya po vypolneniyu laboratornoj raboty / I. L. Podshivalenko, A. I. Rusak, A. V. Safonov. – Gorki : BGSKHA, 2014. – 24 s.
3. Rukovodstvo po ekspluatcii agregata pochvoobrabatyvayushche-posevnogo mnogofunkcional'nogo APPM-6 / sost.: A. V. Kuznecova, A. A. Kuharchuk, I. V. Sinyukovich : utv. OAO «Brestskij elektromekhanicheskij zavod» 16.06.2008 g.: tekst po sostoyaniyu na 01 sentyabrya 2023 g. – Brest, 2008. – S. 11–16.

Материал поступил 11.03.2024, одобрен 28.03.2024, принят к публикации 28.03.2024

УДК 655.557:655.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ МАСЛО- И НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Е. А. Урецкий<sup>1</sup>, В. В. Мороз<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Компетентный внештатный представитель Корпорации Hoffland Environmental Inc. (USA) 10391 Silver Springs Road Conroe, TX 77303. Environmental technology and equipment, e-mail: euretsky@yandex.by

<sup>2</sup> К. т. н, доцент, заведующий кафедрой природообустройства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vovavall@mail.ru

### Реферат

В статье приведены исследованная и детально разработанная эффективная технология очистки масло- и нефтесодержащих сточных вод дорожно-транспортного предприятия «Локомотивное депо Брест».

**Ключевые слова:** pH, флотация, коагуляция, сорбция, осадок, суспензия, взвешенные вещества.

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR PURIFICATION OF OIL AND OIL-CONTAINING WASTEWATER ROAD TRANSPORT COMPANIES

E. A. Uretsky, V. V. Moroz

### Abstract

The article presents a researched and developed in detail effective technology for the treatment of oil and oil-containing wastewater of the road transport enterprise Locomotive depot Brest.

**Keywords:** pH, flotation, coagulation, sorption, sediment, suspension, suspended solids.

### Введение

Проблема очистки промышленных и ливневых сточных вод от масло- и нефтепродуктов продолжает оставаться одной из острых в водоотведении. Нефтепродукты являются одним из наиболее распространённых антропогенных загрязнителей поверхностных водоёмов, а в некоторых регионах также и подземных источников питьевого водоснабжения.

Опасность присутствия нефти в водных объектах заключается в ее физических свойствах и химическом составе. Нефтяные соединения практически нерастворимы и обычно принимают в воде вид пленки или капельной эмульсии.

Кроме того, при интенсивном перемешивании загрязнённых сточных вод нефтепродукты эмульгируются. Это явление приводит к значительному увеличению их концентрации.

Даже если концентрация примесей невысока, то из-за плотности воды частицы нефти распределяются по поверхности тонким слоем. Нефтяное пятно препятствует самоочищению водного объекта, ухудшая его газообмен, затрудняя поступление кислорода в толщу воды.

Действие нефти на водных обитателей очень токсично, в результате контакта с частицами нефтепродуктов закупориваются клеточные мембраны, происходит существенное угнетение метаболизма.

Нефть – многокомпонентный энергоноситель, состоящий из органики и минеральных соединений, неблагоприятных для природных объектов. Полициклические ароматические углеводороды (антрацен, овален, бензапирен) относятся к высокотоксичным и канцерогенным соединениям, вызывающим мутацию генов.

Содержание нефтепродуктов в сточных водах нормируется законодательством, в котором установлены нормативы предельно допустимых концентраций (ПДК) содержания нефти и нефтепродуктов. Фактические концентрации примесей нефти должны подвергаться постоянному контролю.

Загрязняющие вещества, содержащиеся в промышленных и ливневых водах (нефтепродукты, взвешенные вещества, тяжёлые металлы и пр.), находятся в виде грубодисперсных суспензий и эмульсий, в коллоидном и растворённом состоянии. Для каждой из групп веществ существуют свои достаточно эффективные методы очистки. Однако для выполнения всех требований, предъявляемых к очищаемым сточным водам для выпуска в водоём, требуется применение целого комплекса методов.

Выбор метода очистки сточных вод предприятий зависит от многих факторов. Это количество сточных вод, различные её виды и расходы, возможность и экономическая целесообразность извлечения примесей из этих сточных вод, требования к качеству очищенной воды при её использовании для повторного, оборотного водоснабжения и сброса в водоем, объема водоема, наличие районных или городских очистных сооружений и т. п. [1, 2, 3].

Для очистки сточных вод от нефтепродуктов применяют:

- механические;
- физико-химические;
- химические;
- биологические методы.

Из механических методов очистки практическое значение имеют отстаивание, центрифугирование и фильтрование; из физико-химических методов – флотация, коагуляция и сорбция, мембранные технологии; из химических методов – хлорирование и озонирование.

Наиболее эффективен и универсален при больших объёмах сточных вод биологический метод. Этот метод очистки сточных вод, как правило, применяется после того, как сточные воды прошли механическую и физико-химическую очистку, но содержат еще достаточно большое количество растворенных и тонкодиспергированных нефтепродуктов, а также других органических загрязнений и не могут быть выпущены в водоем без дальнейшей очистки. Метод основан на биохимическом разрушении органических загрязнений и происходит под воздействием комплекса бактерий и простейших микроорганизмов, развивающихся в водоочистном сооружении. При биологической очистке происходит превращение органических загрязнений в безвредные продукты окисления – H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и др.

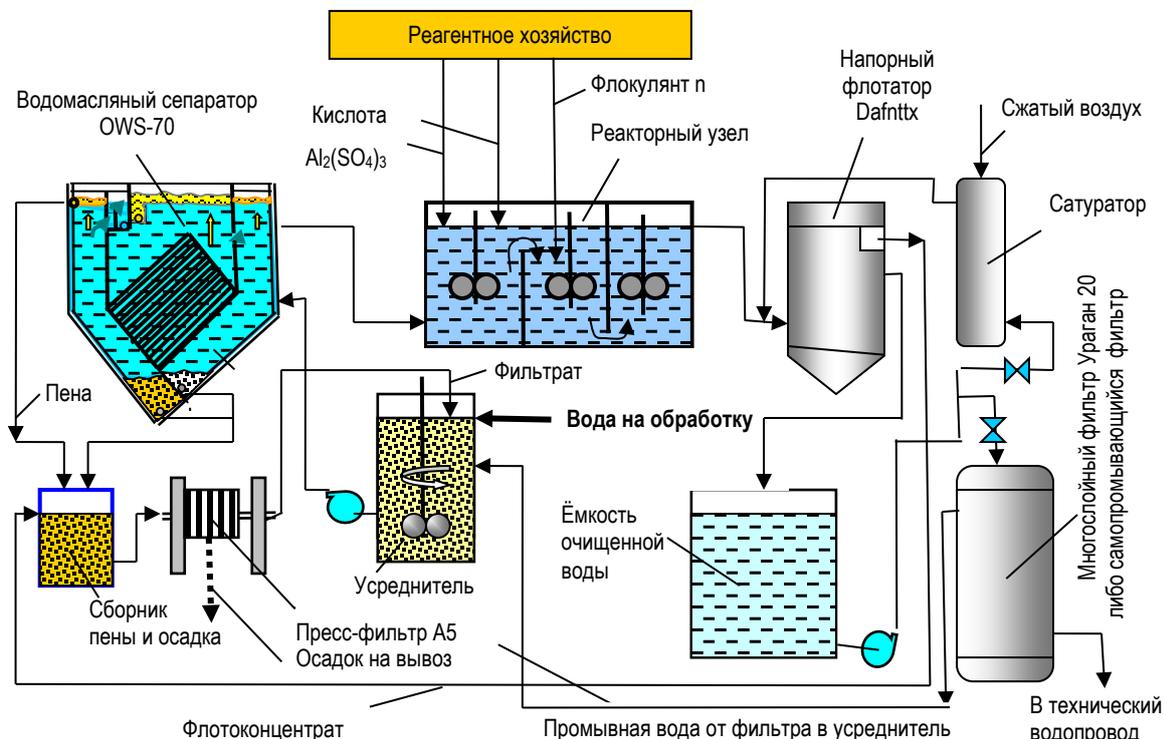
Природоохранное законодательство Республики Беларусь предусматривает ответственность для хозяйствующих субъектов за превышение разрешенных значений воздействия на окружающую среду.

Приведённые методы очистки сточных вод сложны, недостаточно экономичны и не совсем пригодны для очистки сточных вод для небольших предприятий (автобазы, автопредприятия дорожно-транспортные предприятия и пр.)

**Основная часть. Разработка технологии очистки масло- и нефтесодержащих сточных вод предприятия «Локомотивное депо Брест»**

Рассмотрим очистку маслосодержащих сточных вод дорожно-транспортных предприятий на примере разработанной и предложенной

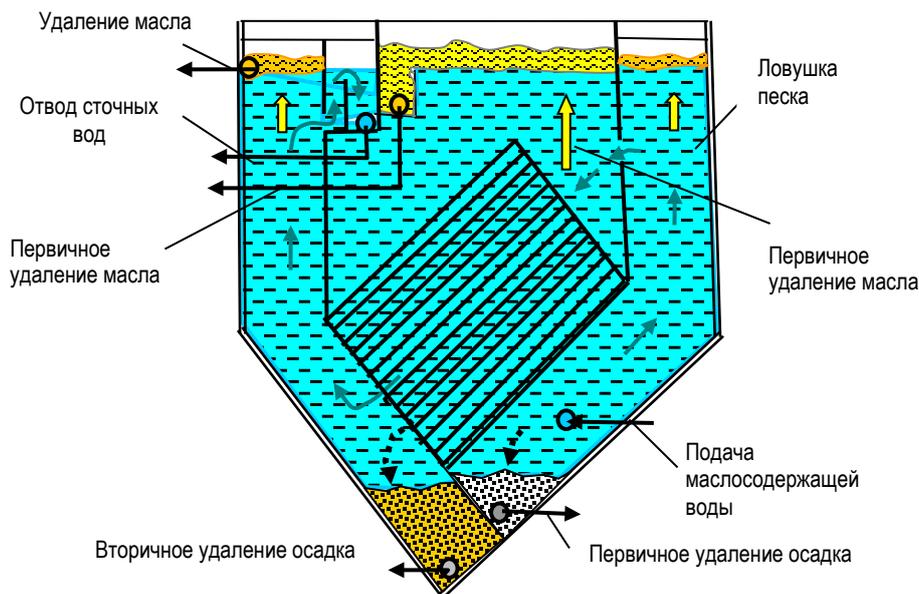
транснациональной корпорацией Hoffland Environmental Inc. (USA) технологической линии такого вида сточных вод для предприятия «Локомотивное депо Брест», показанной на рисунке 1 [4]. В разработке линии принял активное участие полномочный представитель этой корпорации Е. А. Урецкий [5].



**Рисунок 1** – Упрощённая схема очистки маслосодержащих сточных вод предприятия «Локомотивное депо Брест»

В состав оборудования входит водомасляный сепаратор OWS-70 (рисунок 2). Он использует в своей конструкции седиментационную часть, содержащую волнистые коалесцирующие пластины размером 50 × 100 × 75 см в количестве 40 штук, расположенных под углом 45°, общей площадью 11 м<sup>2</sup>. В этой части конструкции свободные концентрированные нефтепродукты поднимаются к поверхности. Этому способствует пакет волнистых параллельно расположенных коалесцирующих пластин, основная функция которых – укрупнение мелких частиц нефтепродуктов.

При контакте частиц нефти с коалесцирующей поверхностью они проходят зоны с практически нулевой скоростью, поток приближается к ламинарному и частицы нефтепродуктов аккумулируются на поверхности элементов, медленно передвигаясь вверх по поверхности пластины и собираются в виде крупных шаровидных капель. Эти капли затем быстро всплывают на поверхность, где они собираются и поступают в сборный лоток нефтепродуктов. Одновременно создаются оптимальные условия для очистки от взвешенных частиц, которые осаждаются в нижней части сепараторов.



**Рисунок 2** – Водомасляный сепаратор OWS-70 (США)

Данный тип сепараторов широко применяется в различных отраслях промышленности для очистки сточных вод моек автомобилей, автозаправочных станций и т. д. Сепараторы обеспечивают эффект очистки стоков от свободных нефтепродуктов до 15 мг/дм<sup>3</sup>. Процесс отделения воды и нефтепродуктов происходит за счёт очистки на коалесцирующем блоке.

Для дальнейшей более глубокой очистки в состав оборудования линии входит напорный флотатор DAFTEX, изображённый на рисунке 3.

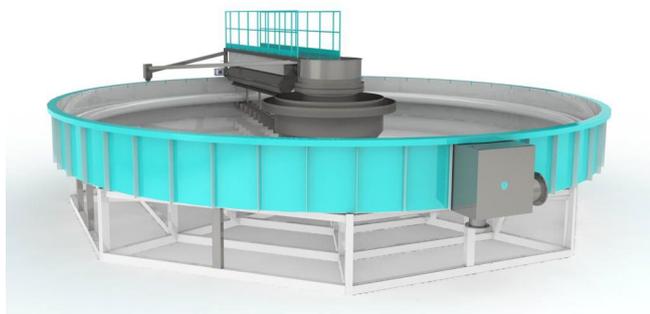


Рисунок 3 – Напорный флотатор DAFTEX (США)

Он состоит из следующих компонентов:

- флотационно-осветлительная ёмкость флотатора, изготавливаемая Брестским локомотивным депо по чертежам Hoffland Environmental Inc. размером 2 × 3 × 1,5 м, объёмом 20 м<sup>3</sup>;
- скребок объёма пены с совмещённой скребковой мешалкой;
- нагнетающий насос;
- системы воздушной инжекции;
- напорной удерживающей ёмкости объёмом;
- пневматические контрольные клапаны;
- система дозирования коагулянта;
- ёмкость смешивания и реакции;
- система контроля величины pH;
- системы удаления осадка;
- флокуляционная ёмкость.

Процесс флотации в нём достигается путём смешивания химически обработанного потока сточных вод под давлением воздушного водяного потока. Система воздушной инжекции вводит сжатый воздух в напорно-удерживающую ёмкость.

Система контрольных пневматических клапанов постоянно поддерживают рабочее давление в напорной ёмкости в пределах 6 МПа, в которой происходит растворение воздуха в рециркуляционной воде.

Когда давление достигает необходимого значения и происходит требуемое насыщение раствора воздухом, данный раствор вводится в поток сточных вод и растворённый воздух стремится высвободиться на поверхность. Флокулированные части и взвешенный осадок под действием пузырьков воздуха собираются в укрупнённые частицы. Молекулярные частицы пузырьков продолжают увеличиваться в объёме и приобретают возможность всплывать на поверхность флотатора. В зоне сбора пены происходит аккумулятивное всплывающих веществ и происходит их скребание. Очищенная вода свободным потоком стекает через распределительную перегородку.

Собранный и накопленный осадок в сгустителе направляется на дальнейшее обезвоживание на фильтр-пресс модели А5, показанный на рисунке 4.

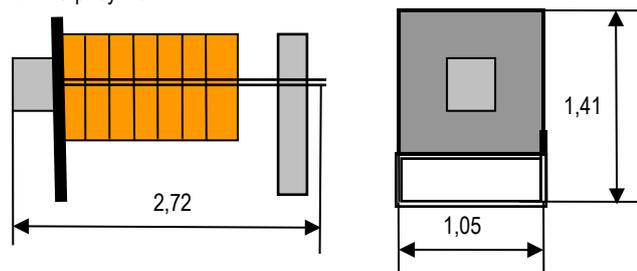


Рисунок 4 – Упрощённая схема фильтр-пресса модели А5 (США)

Техническая характеристика пресс-фильтра:

- объём межкамерного пространства – 0,15 м<sup>3</sup>;
- количество фильтровальных пластин – 17 (1+16) шт.;
- длина 2,72 м, ширина 1,05 м, высота 1,41 м.

Фильтр-пресс состоит из набора вертикально расположенных полипропиленовых плит, опирающихся на горизонтальные балки, закреплённые в неподвижной упорной плите и в стойке. Набор фильтрующих плит сжимается механизмом зажима между концевыми плитами упорной и нажимной. Сжатие осуществляется гидроцилиндром. Создаваемое гидроцилиндром давление составляет 175–210 МПа.

В комплект поставки воздушный диафрагмовый насос с фильтром маслораспылителем, регулятором и глушителем. Полуавтоматический пневматический передвигатель плит облегчает очистку плит фильтр-пресса. Фильтр-пресс имеет двухстадийный контроль, позволяющий иметь слой коагента большой плотности. Гидравлическая система поддерживает постоянное давление в камерах вне зависимости от термического расширения. Влажность обезвоженного осадка после реагентной обработки (известкования) 50–60 %.

Хопперы – ёмкости для сбора осадка-шлама с флотационно-гравитационного осаждения осадка и слива воды после разделения осадка самовыгружаемые ёмкости имеют размеры 1,2 × 1,2 × 1 м – вся поверхность обработана специальным резино-эпоксидным раствором, что обуславливает долгий срок службы.

Для доочистки сточных вод запроектирован Хармско-индустриальный кассетный напорный фильтр, модели «Ураган», производительностью 20 м<sup>3</sup>/ч. Фильтр изображён на рисунке 5.

Фильтр отличается лёгким сервисным обслуживанием и запатентованным дизайном. В нём поток вверх имеет 2 зоны сепарации, одна – перед кассетой и следующая – через кассету, что позволяет получить два фильтра в одном. Твёрдый осадок выпадает на дно фильтра и легко удаляется через слив.



Рисунок 5 – Хармско-индустриальный напорно-кассетный фильтр модели «Ураган» (США)

Корпус фильтра выполнен из нержавеющей стали марки 304 (стандарт США) со специальной антикоррозионной обработкой. Фильтровальная кассета обладает долгим сроком службы, легко вытаскивается и промывается. Она отличается лёгким сервисным обслуживанием и запатентованным дизайном поток вверх, имеет две зоны сепарации, одна – перед кассетой и следующая – через кассету, что позволяет получить два фильтра в одном. Твёрдый осадок выпадает на дно фильтра и легко удаляется через слив. Производительность фильтра – 20–25 м<sup>3</sup>/ч, допустимое давление – 12 МПа.

Вместо промышленного кассетного фильтра модели «Ураган» может быть использован динамический песчаный самопромывающийся фильтр марки ДСТ (США), показанный на рисунке 6.

Техническая характеристика фильтра:

- площадь фильтрации – 0,65 м<sup>2</sup>;
- внутренний диаметр – 0,9 м;
- высота – 2,67 м;
- производительность – 3,18–9,54 м<sup>3</sup>/ч;
- скорость фильтрования – 10–15 м/ч;
- максимальное содержание взвешенных веществ в воде: в исходной – 20–100 мг/дм<sup>3</sup>, в осветленной – 2–5 мг/дм<sup>3</sup>.

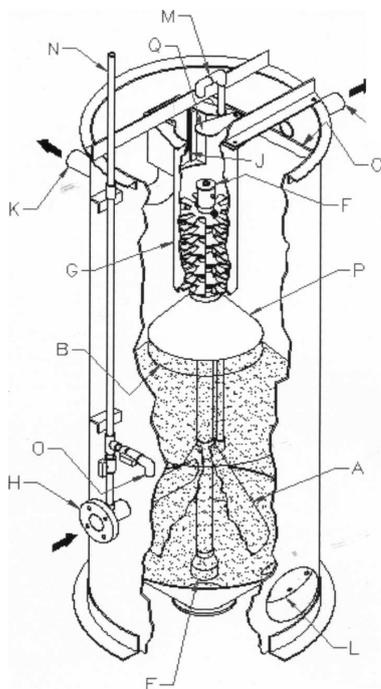


Рисунок 6 – Динамический песчаный самопромывающийся фильтр марки ДСТ (США)

Принцип работы фильтра. Фильтр работает при избыточном давлении 0,1–0,17 МПа (1,01–1,7 атм). Он состоит из распределительного устройства, слоя песка, водослива, отводчика фильтрата, эрлифта, сепаратора, цилиндрического распределительного устройства, эжекционной камеры, сливного патрубка.

Подача воды осуществляется в основание фильтра. Затем вода течёт вверх через ряд труб, равномерно распределяющих её в слое песка через открытое основание конуса распределения входного отверстия (А). Поток течет вверх, через нисходящий движущийся слой песка (В) с удаляемыми твердыми частицами. Очищенный от песка фильтрат переливается через кромку перегородки (С) и отводится из фильтра патрубком (D), (H).

Одновременно слой песка, наряду с накопленными твердыми частицами, отводится вниз по отводящей трубе, которая размещена в центре фильтра. Сжатый воздух подводится в основание эрлифта (Е). Воздух отмывает грязный песок от примесей в трубе воздушной транспортировки, с помощью барботажного восходящего потока. После достижения взвесью вершины (F) грязный жидкий раствор перетекает в центральное отделение (I). Песок возвращается к поддерживающей конструкции через моечную машину/сепаратор благодаря силе тяжести (G), которая позволяет быстрому песку отделиться от грязной жидкости.

Сжатый воздух подводится в основание эрлифта (Е). Воздух отмывает грязный песок от примесей в трубе воздушной транспортировки, по норме 0,797–0,1196 кВт·ч с помощью барботажного восходящего потока. После достижения взвесью вершины (F) грязный жидкий раствор перетекает в центральное отделение (I). Песок возвращается к поддерживающей конструкции через моечную машину/сепаратор благодаря силе тяжести (G), которая позволяет быстрому песку отделиться от грязной жидкости.

В процессе разработки и наладки технологического оборудования и схемы очистки масло- и нефтесодержащих сточных вод предприятия осуществлялся химико-технологический контроль как в США, так и в г. Бресте.

Состав сточных вод на выходе системы и ПДК, доведённые предприятию «Локомотивное депо Брест», приведены в таблице.

Таблица 1 – Состав сточных вод

Показатели	Единица измерения	На выходе	ПДК, установленные для предприятия
Азот аммонийный	мг/дм <sup>3</sup>	27	до 28
Нефтепродукты	мг/дм <sup>3</sup>	0,2–0,8	До 1,0
рН	–	7,5–8,0	6,5–9

#### Заключение

1. Разработана эффективная технология очистки масло- и нефтесодержащих сточных вод для дорожно-транспортных предприятий и в частности предприятия «Локомотивное депо Брест», насыщенная современным высокопроизводительным технологическим оборудованием.

2. Разработанная технология предложена для внедрения Лидскому и Барановичскому дорожно-транспортным предприятиям.

#### Список цитированных источников

1. Урецкий, Е. А. Оптимизация существующих и разработка новых ресурсосберегающих технологий в водном хозяйстве предприятий прибор- и машиностроения : монография / Е. А. Урецкий, Е. С. Гогина, В. В. Мороз. – М. : АСВ, 2022. – 624 с.
2. Degremont. Технический справочник по обработке воды : в 2 т. : пер. с фр. / Л. Андриамирадо [и др.] ; редкол.: М. И. Алексеев [и др.]. – 2-е изд. – СПб. : Новый журнал, 2007. – Т. 2. – 1696 с.
3. Очистка промышленных сточных вод : пер. с нем. – СПб. : Новый журнал, 2012. – 384 с.

#### References

1. Ureckij, E. A. Optimizaciya sushchestvuyushchih i razrabotka novyh resursosberegayushchih tekhnologij v vodnom hozyajstve predpriyatij priboro- i mashinostroeniya : monografiya / E. A. Ureckij, E. S. Gogina, V. V. Moroz. – M. : ASV, 2022. – 624 s.
2. Degremont. Tekhnicheskij spravochnik po obrabotke vody : v 2 t. : per. s fr. / L. Andriamirado [i dr.] ; redkol.: M. I. Alekseev [i dr.]. – 2-e izd. – SPb. : Novyj zhurnal, 2007. – T. 2. – 1696 s.
3. Ochistka promyshlennyh stochnyh vod : per. s nem. – SPb. : Novyj zhurnal, 2012. – 384 s.

Материал поступил 27.10.2023, одобрен 04.01.2024, принят к публикации 16.01.2024

## УПРАВЛЕНИЕ ОСАДКОМ МЕТАНОВОГО БРОЖЕНИЯ БИОМАССЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГУМУСА

Ю. В. Кляусова<sup>1</sup>, А. А. Цыганова<sup>2</sup>, Г. В. Бельская<sup>3</sup>

<sup>1</sup> К. с.-х. н., доцент Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: yuliya-klaus@mail.ru

<sup>2</sup> К. с.-х. н., доцент, заведующий кафедрой «Инженерная экология» Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: appa-1981-81@mail.ru

<sup>3</sup> К. с.-х. н., доцент, доцент Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: gbelskaja@mail.ru

### Реферат

В новых условиях функционирования энергосистемы Республики Беларусь следует переориентировать функционирование биогазовых комплексов на выработку преимущественно тепловой энергии для локальных целей и производство биогумуса – органического удобрения из осадка метанового брожения. С точки зрения производства биогумуса, главная проблема заключается в низком содержании в дигестате сухого вещества (обычно не более 8 %) и, соответственно, воды – до 90–92 %. Основными приемами доработки является обезвоживание и сгущение, что позволяет сократить объемы складирования отходов, улучшить качество окружающей среды, получить дополнительный продукт с добавочной стоимостью, который можно использовать в качестве ценного органического удобрения. Рациональное использование органического осадка является существенным направлением повышения эффективности биогазовых технологий.

**Ключевые слова:** метановое брожение биомассы, органический осадок, управление, обезвоживание, сгущение, биогумус.

### MANAGEMENT OF SLUDGE PRODUCED BY BIOMASS METHANE FERMENTATION TO OBTAIN BIOHUMUS

Y. V. Kliausava, H. A. Tsyhanava, H. V. Belskaya

### Abstract

In new conditions of the energy system functioning in Republic of Belarus, biogas plants should be reoriented to the production of mainly heat energy for local purposes and production of biohumus – organic fertilizer from methane fermentation sludge. From the point of view of biohumus production, the main problem is the low content of dry matter in digestate (usually not more than 8 %) and, accordingly, water content – up to 90–92 %. The main methods to refine are its dewatering and thickening. The processing of organic sludge allows to reduce the volume of waste storage, improve the quality of environment, obtain an additional product with added value, which can be used as a valuable organic fertilizer. Rational use of organic sludge is a significant area of increasing the efficiency of biogas technologies.

**Keywords:** methane fermentation of biomass, organic sludge, digestate, management, dewatering, thickening, biohumus.

### Введение

Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года (НСУР-30) определяет направление по декарбонизации энергетического сектора за счет использования атомной энергии и возобновляемых источников энергии [1]. Существенным направлением является производство биогаза и его целевое использование, в частности в качестве автомобильного топлива для общественного транспорта и газификации жилищного сектора сельских регионов [2]. Биогаз имеет неоспоримые технологические преимущества, в сравнении с энергией солнца и ветра, а именно, его можно последовательно производить и поэтапно накапливать без существенных потерь.

Развитие альтернативной энергетики происходит с учетом конкретных условий – экономических, экологических, социальных. В Республике Беларусь сложилась необходимость частичной переориентации производственной деятельности биогазовых заводов, в первую очередь, по причине завершения строительства в 2022 году и начала производства атомной энергии на Белорусской АЭС. Поэтому в новых условиях следует переориентировать функционирование биогазовых комплексов на производство преимущественно тепловой энергии для местных нужд (например, тепличных комплексов, отопления производственных помещений), энергетическое обслуживание самих биогазовых установок, а также организовать производство сертифицированного органического удобрения (биогумуса) из осадка метанового брожения [3]. Эту деятельность следует реализовывать на основе отдельных проектов.

### Влияние условий метанового брожения на качество дигестата

Биогазовые технологии состоят в сбраживании любых органических субстратов (биомассы) в специальном оборудовании (реакторах) при анаэробных условиях. Сбраживание органического сырья происходит в четыре этапа – гидролиз, ацидогенез, ацетогенез и

метаногенез. Эти стадии протекают одновременно. Консорциум микроорганизмов метанового сбраживания для своего функционирования требует строго определенных условий по температуре, pH, соотношению биогенных элементов в биомассе, содержанию влаги в субстрате. Метанобразующие бактерии предъявляют к условиям своего существования значительно более жесткие требования, чем кислотообразующие. Они нуждаются в строго анаэробных условиях и требуют более длительного времени для воспроизводства. Разложение органики на отдельные компоненты и преобразование их в метан происходит только во влажной среде.

По состоянию на 31.07.2023 г. [4], на территории республики функционирует достаточно развитая инфраструктура из 37 биогазовых комплексов, общая установленная мощность которых составляет 53,682 МВт.

Крупнейшими по мощности установками являются:

- ОАО «Рассвет» им. К.П. Орловского, Могилевская область (мощность 4,8 МВт);
- ЗАО «ТДФ Экотех-Снов», Минская область, Несвижский район, д. Грусково (мощность 2,126 МВт);
- КУПП «Брестский мусороперерабатывающий завод», г. Брест (мощность 3,192 МВт);
- СЗАО «ТелДаФакс Экотех МН», Минская область, полигон ТБО «Тростенецкий» (мощность 2,997 МВт);
- ЗАО «ТелДаФакс Экотех-Северный» Минская область, Минский район, д. Дубовляны (мощность 2,816 МВт).

На биогазовых комплексах используют две основные технологии. Первая состоит в анаэробной переработке органических отходов животноводства (с добавлением других компонентов, в первую очередь зеленой биомассы) в биореакторах с последующим улучшением качества получаемого биогаза. По такой технологии работают 16 биогазовых заводов, общей установленной мощностью 21,219 МВт.

Вторая технология состоит в получении биогаза (свалочного газа) из твердых отходов жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), содержащих органическую фракцию, с использованием газопоршневых агрегатов. Такие комплексы размещены на полигонах твердых коммунальных отходов (ТКО), вблизи крупных и средних городов. В настоящее время на территории страны функционирует 21 газопоршневая установка, общей установленной мощностью 31,76 МВт.

Эффективное функционирование биогазовых комплексов на животноводческих фермах определяется следующими зонами: 1. Управление субстратами. 2. Состав сырья, его предварительная обработка. 3. Процесс анаэробной ферментации. 4. Очистка, хранение и использование биогаза. 5. Хранение (размещение) и улучшение органического осадка [5]. Первые четыре зоны в литературе хорошо изучены. Пятой зоне – хранению (размещению) и доработке образующегося после брожения органического осадка – уделяется недостаточно внимания. Однако, технологии получения биогаза в количественном и качественном аспектах совершенствуются. Тенденция производства биогаза остается стабильной благодаря качественным инженерным решениям в рамках стратегии развития «зеленой энергетики».

### Сухая и влажная ферментация

Можно констатировать, что дигестат (от англ. digestate – «ферментированный осадок») – это стабилизированный материал, содержащий неразложившиеся в процессе сбраживания биомассы органические вещества (в том числе целлюлозные волокна), некротические микроорганизмы и водную фракцию. С точки зрения производства биогаза, главная проблема заключается в больших объемах дигестата, из-за высокого содержания воды – до 90–92 %. Соответственно, содержание сухого вещества низкое, обычно не превышает 8 %. Это создает серьезные трудности в доработке и использовании этого ресурса.

Анаэробные процессы в биореакторах происходят двумя путями, которые определяются содержанием твердого вещества и воды в исходной биомассе. Эти процессы называются сухой и влажной ферментацией. Сухая ферментация требует меньших энергетических и материальных затрат (на транспортировку органической массы и нагрев жидкой фракции), однако микробиологический процесс в этих условиях протекает нестабильно, что приводит к неравномерному образованию биогаза и возможной остановке микробиологического процесса. Влажное сбраживание (с добавлением воды в бродящую биомассу) требует дополнительных затрат на транспортировку и нагрев воды, что сопровождается неизбежными потерями тепла и достаточно высоким потреблением электроэнергии. Несмотря на то, что метод сухого сбраживания дешевле, процесс влажного брожения используют чаще, так как производство биогаза стабильно и гарантировано.

Количество добавляемой в бродящую массу воды зависит от исходной влажности субстратов. Для жидкого (мокрого) метода лучше, чтобы содержание сухого вещества было 5–15 %. Если содержание сухого вещества меньше 5 %, то процессы брожения тоже происходят, но возникает «бесполезный» объем воды, что существенно снижает рентабельность технологических процессов и приводит к высоким объемам образования дигестата. С другой стороны, содержание 15 % сухого вещества является верхней границей (лимитирующим фактором), при которой субстрат еще можно перекачивать насосом, перемешивать либо смешивать [6] в реакторах. Примерами использования технологии влажной ферментации биомассы является производственная деятельность биогазовых комплексов ОАО «Рассвет» им. К. П. Орловского Могилёвской области, ЗАО «ТДФ Экотех-Снов» Минской области.

В некоторых конфигурациях биогазовых установок получают дигестат с меньшим содержанием воды. При этом, жидкую фазу выжимают из водного остатка ферментации и используют для первоначального разминания субстрата, то есть получают частично замкнутый технологический цикл. Твердая фаза отделенного дигестата больше подходит для транспортировки, что расширяет возможности его применения. Сухой метод (без добавления воды) считается на сыпучие материалы с содержанием сухого вещества свыше 25 %. Содержание сухого вещества в субстрате от 40 до 60 % делает его пригодным только к компостированию.

Технологии сухой ферментации используют в газопоршневых агрегатах на полигонах ТКО, где получают твердый дигестат, но неопределенного состава. Примерами использования таких технологий является производственная деятельность КУПП «Брестский мусороперерабатывающий завод», полигон ТБО «Тростенецкий» Минский район, полигон ТБО «Северный» Минский район и некоторые другие. Биологическая переработка органических отходов на полигонах позволяет уменьшить объемы их складирования и захоронения, получить свалочный газ и производить из него электрическую энергию для нужд ЖКХ. С точки зрения использования полученного дигестата для производства удобрений, эти технологии представляются неперспективными вследствие неконтролируемого состава и высокой загрязненности целым рядом токсикантов, содержащихся в отходах ЖКХ.

### Характеристика сырья

Состав получаемого в биореакторах дигестата напрямую зависит от исходных характеристик сырья – его элементного и химического состава. При выборе субстратов учитывают, что только из сухой органической массы можно произвести метан. Выход метана и состав осадка можно оценить по степени разлагаемости органического субстрата, то есть доле субстрата, которая преобразуется в биогаз. Чем более доступный для разложения (усвоения) органический материал, тем выше выход биогаза из системы и более доступный для питания растений органический осадок.

В органических субстратах, происходящих в результате производственной деятельности агропромышленного комплекса и предприятий пищевой промышленности, могут содержаться токсичные вещества – остаточные количества пестицидов, удобрений, антибиотиков, гормональных средств [7]. Поэтому необходимо проводить соответствующие (регулярные) анализы химического состава используемых субстратов с целью получения экологически чистого гумуса. Оптимизацию состава используемых субстратов также следует проводить с учетом возможного содержания загрязнений типа песка, минеральной фракции, аммиака и других компонентов. По нашему мнению, требования к характеристикам перерабатываемых отходов, определяющие эффективность работы биогазовой установки, должны быть приведены в технологических регламентах и эксплуатационных документах на биогазовые установки конкретного типа.

### Состав получаемого дигестата

Состав дигестата делает пригодным его для использования в качестве удобрения, поскольку в ферментере высвобождается до 50 % органического азота в виде поглощаемых растениями ионов аммония  $\text{NH}_4^+$ . Приблизительный состав дигестата (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав органического осадка

Показатель	После перебраживания первичной биомассы	После перебраживания вторичной биомассы
Сухое вещество, %	7,0	6,1
pH	8,3	8,5
Органическое вещество, кг/т	51,0	42,0
Азот общий, кг/т	4,7	4,8
Аммоний, кг/т	2,7	2,9
Фосфор, кг/т	1,8	1,8
Калий, кг/т	5,0	3,9

Большая часть твердого дигестата представляет собой связанный азот в нестабильной форме, который доступен для питания растений. С другой стороны, твердый дигестат содержит большое количество относительно стабилизированного непереброженного органического материала (целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина), поскольку быстро разлагаемые органические вещества преобразуются в биогаз. Кроме азота, органический осадок содержит значительное количество фосфора, калия, серы и некоторых микроэлементов. Питательный состав дигестата незначительно варьирует в зависимости от используемых для брожения субстратов.

Как видно из приведенных данных, дигестат, полученный из первичной и вторичной биомассы, имеет достаточно схожие показатели по содержанию сухого вещества, pH, объему органической фракции, содержанию азота, в том числе аммонийного, фосфора и калия [8]. Поскольку из субстрата уходит лишь небольшое количество аммиака, большая часть азота остается в дигестате. Процессы разложения уменьшают количество связанного азота в органическом веществе, в то время как количество аммиака, который присутствует в дигестате в виде аммония нитрата  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , увеличивается с 45 % до 76 %. Поскольку значение pH во время ферментации смещается от нейтрального к слегка щелочному (pH от 8,0 до 8,5), равновесие также смещается от легкорастворимого аммония  $\text{NH}_4^+$  к аммиаку  $\text{NH}_3$ . Поэтому, при хранении и применении дигестата, существует достаточно высокий риск выделения аммиака в атмосферу. Положительно в этом процессе то, что в аммонийной форме азот доступен для питания растений. Однако, если потребности возделываемых растений низкие, то происходит процесс денитрификации и аммиак уходит в атмосферу. Это вещество является парниковым газом, который ускоряет процесс глобального потепления климата.

Содержание доступного для растений фосфора в дигестате составляет от 1,8 до 3,5 кг/т, причем его содержание достаточно стабильно для двух основных типов сырья. Другие макро- и микроэлементы – калий, магний, кальций также остаются в дигестате. Особо следует отметить содержание серы. В зависимости от метода, используемого для удаления следов сероводорода из биогаза, большая часть серы также может быть возвращена в дигестат.

Установлено, что внесение дигестата в почву улучшает ее структуру и функционирование вследствие повышения микробиологической активности на период до трех месяцев. Положительно оценивается низкая влажность дигестата в сравнении, например с жидким навозом, что приводит к быстрому его проникновению в почву и эффективному повышению плодородия. В качестве удобрения в растениеводстве остатки ферментации могут в значительной степени заменить основное внесение и внекорневые подкормки, в зависимости от возделываемой культуры. Отмечен высокий эффект с точки зрения доступности азота – обычно намного превышающий 70 % от количества внесенных минеральных удобрений [9]. Все перечисленные данные подтверждают ценность использования дигестата для производства органических удобрений.

### Методы управления органическим осадком

Образовавшийся в реакторе дигестат закачивают в специальные лагуны (при больших объемах образования), либо собирают в контейнеры для хранения. Инновационные методы управления дигестатом предполагают использование газонепроницаемой крышки для его хранения, чтобы избежать выбросов метана и аммиака, обладающих высоким парниковым эффектом. Жидкий дигестат распределяют в резервуары для жидкого навоза, а твердый дигестат можно вносить на сельскохозяйственные угодья с помощью разбрасывателей навоза. Иногда остатки ферментации рекомендуется вносить на площади для выращивания кормов для сельскохозяйственных животных. Этот возврат обеспечивает частично замкнутый цикл биогенных элементов [10, 11], что соответствует принципам «зеленой экономики».

Некоторые авторы рекомендуют высушивать дигестат перед внесением в почву, с использованием тепловой энергии от конверсии биогаза. Эта технология позволяет транспортировать высушенный дигестат на достаточно большие расстояния, что значительно расширяет сферу его применения.

Поэтому одним из направлений улучшения дигестата является его первичное обезвоживание и сгущение. Методы, применяемые для этих процессов, следующие:

- 1) использование гравитационных и/или центробежных сил;
- 2) использование давления.

После обезвоживания можно получить твердую фракцию дигестата с содержанием твердых частиц 18 % и выше. Для этих целей используют ленточные прессы или центрифуги, также процесс можно интенсифицировать за счет добавления полимера. Отделенная твердая фаза содержит, в основном, клетчатку, состоящую из неразложившихся целлюлозных волокон. Суспензия дигестата или твердый дигестат, полученный в результате «сухого» анаэробного сбраживания с высоким содержанием твердых веществ, часто содержит от 18 % до 25 %, а некоторые технологии позволяют получать еще более сухой дигестат.

Следующая схема (рисунок 1) содержит теоретически возможные методы доработки и использования твердой фракции дигестата [12].

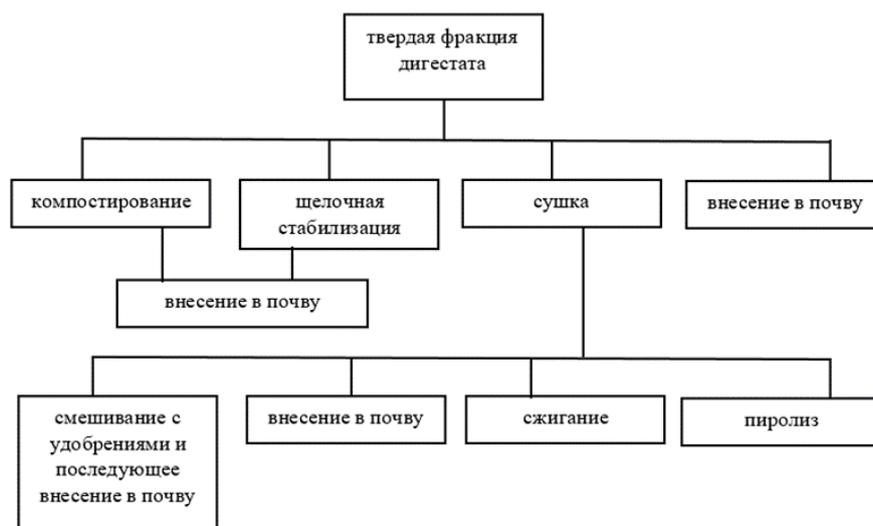


Рисунок 1 – Методы использования твердой фракции дигестата

Методы доработки включают в себя компостирование целлюлозного волокна и стабилизацию его известью. Это приводит к гибели патогенных микроорганизмов и одновременно к повышению pH (подщелачиванию), которое почти всегда сопровождается дополнительным выделением аммиака, что может быть проблемой для рас-

тениеводства. Наиболее часто используемым вариантом является непосредственное внесение целлюлозных волокон в почву, без известкования.

В Республике Беларусь начато производство твердых органических удобрений из осадка метанового брожения. Положительные

результаты достигнуты в хозяйствах ОАО «Рассвет» им. К. П. Орловского Могилевской области и ЗАО «ТДФ Экотех-Снов» Минской области. На этих предприятиях производят для реализации экологически чистые твердые удобрения (биогумус) типа "Экоплант" 20.15.80.000, с содержанием твердой фракции до 20 %. Производимый биогумус не содержит нитратов, семян сорной растительности, отсутствует патогенная микрофлора, без специфических запахов. Потенциал увеличения урожайности при использовании биогумуса составляет порядка 40–50 %.

Наконец, можно также высушивать неразложившуюся клетчатку и обогащать ее питательными элементами для внесения в почву. Этот прием эффективно улучшает аэрацию почв и повышает ее плодородие. Эффективный доступ воздуха к корням улучшает водно-воздушный баланс и приводит к повышению урожайности растений.

Поскольку органический осадок может содержать определенное количество трудно-разлагаемых углеводов, он может представлять интерес в производстве композитного топлива после сушки. Высушенное целлюлозное волокно дигестата может быть использовано в качестве топлива для сжигания или производства топлива, методами пиролиза и газификации. Однако высокое содержание в них соединений серы и азота приводят к относительно быстрому накоплению шлаков, которые вызывают коррозию металлических поверхностей оборудования. Кроме того, процесс сжигания неочищенного композитного топлива сопровождается высокими выбросами сернистых и азотистых соединений.

Жидкая фракция называется щелоком дигестата. На схеме (рис. 2) представлены возможные варианты доработки и использования жидкой фракции дигестата [12].

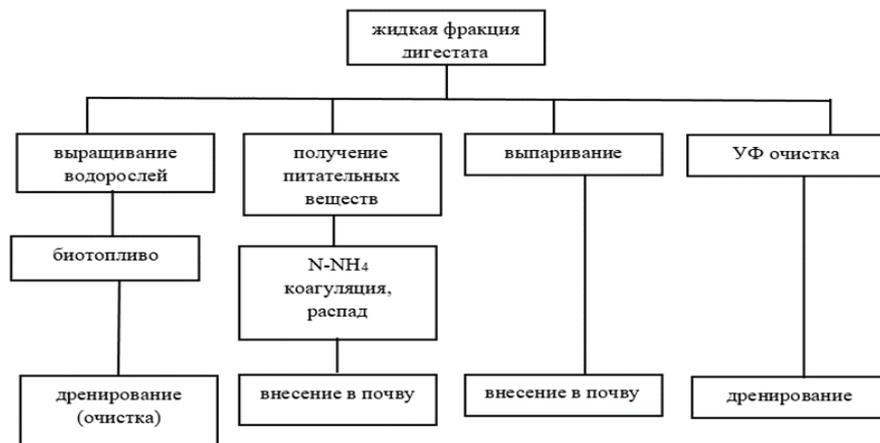


Рисунок 2 – Способы управления жидкой фракцией дигестата

Жидкая фракция может быть использована для выращивания водорослей и других энергетических растений, в качестве эффективного субстрата для производства биотоплива, в соответствии с разработанными технологиями. Щелок содержит ценные питательные элементы. В частности, аммонийный азот можно вносить непосредственно в почву, но другой теоретической возможностью является его осаждение.

Выпаривание всего дигестата может быть осуществлено с помощью оборудования, работающего по принципу теплообменника с мокрой поверхностью. После выпаривания материал можно повторно смешивать с непереваренной клетчаткой и использовать в качестве удобрения. Эта система широко используется в европейских странах. Она уменьшает объем дигестатной воды до 15 % от первоначального объема, в то время как отработанное тепло поступает от когенерационной установки. В литературе обсуждаются методы очистки дигестатной жидкой фракции с использованием ультрафильтрации и обратного осмоса. Авторы считают нецелесообразным использование этих инновационных методов очистки по причине высокой стоимости и быстрого загрязнения мембранных фильтров.

### Заключение

В новых условиях функционирования энергосистемы Республики Беларусь следует переориентировать производственную деятельность биогазовых комплексов преимущественно на выработку тепловой энергии и производство высококачественного биогумуса.

В настоящее время биогаз в республике производят по двум основным технологиям. Первая состоит в анаэробной переработке органических отходов животноводства (с добавлением других компонентов) в биореакторах. Технология влажной ферментации позволяет получить осадок контролируемого состава, который требует специальной доработки – обезвоживания и сгущения. Такая система доработки позволяет получать биогумус с содержанием твердой фракции до 20 % и оптимальным составом биогенных элементов.

Биогумус лишен семян сорной растительности и патогенных микроорганизмов.

Вторая технология состоит в получении биогаза (свалочного газа) из твердых отходов жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), содержащих органическую фракцию. Сухая ферментация состоит в получении свалочного газа с использованием газопоршневых агрегатов. В процессе сухой ферментации получают твердый дигестат, но неопределенного состава. С точки зрения использования получаемого дигестата для производства биогумуса, эта технология представляется неперспективной вследствие непостоянного состава и высокой загрязненности исходных субстратов целым рядом токсиантов, содержащихся в отходах ЖКХ. Возможно содержание патогенных микроорганизмов.

Высококачественный биогумус является дополнительным ценным продуктом с добавочной стоимостью, который позволяет повысить эффективность биогазовых технологий, повышать плодородие почв, улучшать состояние окружающей среды. Переориентацию производственной деятельности биогазовых заводов следует осуществлять только в рамках отдельных проектов.

### Список цитированных источников

1. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период 2030 года / Нац. комис. по устойчивому развитию Респ. Беларусь ; редкол.: Л. М. Александрович [и др.]. – Минск : Юнипак, 2017. – 149 с.
2. Национальный доклад Республики Беларусь об осуществлении повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года / Совет Республики Национального собрания Республики Беларусь. – Минск : 2017. – 40 с.
3. Бельская, Г. В. Биогазовые технологии для успешной работы установок / Г. В. Бельская, Н. Г. Малькевич // XXII МНПК «Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых, социальных и инженерных подходов» : тез. док. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 124–125.

4. Реестр выданных сертификатов о подтверждении происхождения энергии на 31.07.2023 г. : утв. М-вом природы Респ. Беларусь по состоянию на 31.07.2023 г. – Минск : Государственный кадастр возобновляемых источников энергии Минприроды Республики Беларусь, 2023. – 81 с.
5. Величко, В. В. Проблемы использования биогазовых технологий / В. В. Величко, С. П. Кундас // Сахаровские чтения 2015 года : экологические проблемы XXI века : материалы 16-й Междунар. науч. конф., Минск, 19–20 мая 2016 г. / МГЭУ им. А. Д. Сахарова ; редкол.: С. А. Маскевича, (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 266.
6. Сайганов, А. С. Инновационное развитие АПК / А. С. Сайганов, В. В. Чабаткуль // 25 лет созидания и свершений, Минск, 2020 г. : в 7 т. / Агрпромышленный комплекс. Архитектура и градостроительство. Беларусь на мировой арене; редкол.: В. П. Андрейченко. – Минск, 2020. – Т. 4. – С. 133–144.
7. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge / L. Appels [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. – 2008. – № 34 (6). – S. 75–78.
8. Kliausava, Y. V. Using of organic sludge to improve the efficiency of biogas technologies / Y. V. Kliausava, H. A. Tsyhanava, H. V. Belskaya // Vestnik of Brest State Technical University. – № 3 (132). – 2023. – S. 75–77.
9. Дигестат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://deru.abcdef.wiki/wiki/Gärrest>. – Дата доступа: 20.04.2023.
10. Интерактивная карта Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь «Установки по использованию ВИЭ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://195.50.7.239/Cadastre/Map/>. – Дата доступа: 10.05.2023.
11. Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов – общие технические требования к биогазовым установкам. Издание официальное = Нетрадыцыйныя тэхналогіі. Энергетыка біяадходаў-Агульныя тэхнічныя патрабаванні да біягазавых устаноў. Выданне афіцыйнае : ГОСТ РФ 53790. – Москва : ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский центр стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ», Лаборатория возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, 2019. – 5 с. – (Стандартинформ).
12. Heviánková, S. Study and Research of the Cleaning Procedures of Anaerobic Digestion Products / S. Heviánková, M. Kyncl, J. Kodymová. – Czech Republic : Geo-Science Engineering, 2014. – S. 39–50.
3. Bel'skaya, G. V. Biogazovye tekhnologii dlya uspeшной raboty ustanovok / G. V. Bel'skaya, N. G. Mal'kevich // XXII MNPК «Modernizaciya hozyajstvennogo mekhanizma skvoz' prizmu ekonomicheskikh, pravovyh, social'nyh i inzhenernyh podhodov» : tez. dok. – Minsk : BNTU, 2023. – S. 124–125.
4. Reestr vydannyh sertifikatov o podtverzhenii proiskhozhdeniya energii na 31.07.2023 g. : utv. M-vom prirody Resp. Belarus' po sostoyaniyu na 31.07.2023 g. – Minsk : Gosudarstvennyj kadastr vobnovlyaemyh istochnikov energii Minprirody Respubliki Belarus', 2023. – 81 s.
5. Velichko, V. V. Problemy ispol'zovaniya biogazovyh tekhnologii / V. V. Velichko, S. P. Kundas // Saharovskie chteniya 2015 goda : ekologicheskie problemy XXI veka : materialy 16-j Mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 19–20 maya 2016 g. / MGEU im. A. D. Saharova ; redkol.: S. A. Maskevicha, (gl. red.) [i dr.]. – Minsk, 2016. – S. 266.
6. Sajganov, A. S. Innovacionnoe razvitie APK / A. S. Sajganov, V. V. CHabatul' // 25 let sozdaniya i svershenij, Minsk, 2020 g. : v 7 t. / Agropromyshlennyj kompleks. Arhitektura i gradostroitel'stvo. Belarus' na mirovoj arene; redkol.: V. P. Andrejchenko. – Minsk, 2020. – T. 4. – S. 133–144.
7. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge / L. Appels [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. – 2008. – № 34 (6). – S. 75–78.
8. Kliausava, Y. V. Using of organic sludge to improve the efficiency of biogas technologies / Y. V. Kliausava, H. A. Tsyhanava, H. V. Belskaya // Vestnik of Brest State Technical University. – № 3 (132). – 2023. – S. 75–77.
9. Digestat [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://deru.abcdef.wiki/wiki/Gärrest>. – Data dostupa: 20.04.2023.
10. Interaktivnaya karta Ministerstva prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus' «Ustanovki po ispol'zovaniyu VIE» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://195.50.7.239/Cadastre/Map/>. – Data dostupa: 10.05.2023.
11. Netradicionnye tekhnologii. Energetika biootvodov – obshchie tekhnicheskie trebovaniya k biogazovym ustanovkam. Izdanie oficial'noe = Netradycyjnyya tekhnologii. Energetyka biyaadhodaў-Agul'nyya tekhnichnyya patrabavanni da biyagazavyh ustanovok. Vydanne aficyjnae : GOST RF 53790. – Moskva : FGUP «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij centr standartizacii, informacii i sertifikacii syr'ya, materialov i veshchestv», Laboratoriya vobnovlyaemyh istochnikov energii geograficheskogo fakul'teta MGU im. M. V. Lomonosova, 2019. – 5 s. – (Standartinform).
12. Heviánková, S. Study and Research of the Cleaning Procedures of Anaerobic Digestion Products / S. Heviánková, M. Kyncl, J. Kodymová. – Czech Republic : Geo-Science Engineering, 2014. – S. 39–50.

#### References

1. Nacional'naya strategiya ustojchivogo social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na period 2030 goda / Nac. komis. po ustojchivomu razvitiyu Resp. Belarus' ; redkol.: L. M. Aleksandrovich [i dr.]. – Minsk : YUnipak, 2017. – 149 s.
2. Nacional'nyj doklad Respubliki Belarus' ob osushchestvlenii povestki dnya v oblasti ustojchivogo razvitiya na period do 2030 goda / Sovet Respubliki Nacional'nogo sobraniya Respubliki Belarus'. – Minsk : 2017. – 40 s.

Материал поступил 02.02.2024, одобрен 13.02.2024, принят к публикации 13.02.2024

УДК 621.311.001

## ПРЕДИКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ pH

**В. Н. Штепа<sup>1</sup>, В. А. Кудинов<sup>2</sup>, О. Н. Прокопеня<sup>3</sup>, Э. Н. Муслимов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Д. т. н., доцент, проректор по научной работе УО «Полесский государственный университет», Пинск, Беларусь, e-mail: tppoless@gmail.com

<sup>2</sup> Д. п. н., профессор, профессор кафедры программного обеспечения и администрирования информационных систем Курского государственного университета, Курск, Российская Федерация, e-mail: kudinovva@yandex.ru

<sup>3</sup> К. т. н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: olegprokopenya@mail.ru

<sup>4</sup> Инженер-консультант по разработке экспертных систем, Пинск, Беларусь, e-mail: muslimoven@mail.ru

### Реферат

Мониторинг, проведенный с использованием компьютерно-интегрированной системы сбора информации на действующих очистных сооружениях, позволил сформировать базу данных о показателях качества сточных вод (pH, окислительно-восстановительный потенциал, электропроводность, температура). В результате статистической обработки результатов установлено наличие попарных взаимосвязей средней тесноты между указанными показателями качества, что позволило сделать вывод о предполагаемой эффективности предиктивного управления процессом очистки на основе прогнозируемых значений pH. Разработана система нейросетевого прогнозирования pH, которая после обучения с использованием полученной базы данных продемонстрировала высокую достоверность результатов прогноза и может быть рекомендована к применению. Приведена возможная структура системы предиктивного управления процессом очистки сточных вод для практической реализации.

**Ключевые слова:** сточные воды, прогнозирование pH, корреляционный анализ, нейронные сети, очистные сооружения.

## PREDICTIVE CONTROL OF THE PROCESS OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT BASED ON NEURAL NETWORK FORECASTING pH

**V. N. Shtepa, V. A. Kudinov, O.N. Prokopenya, E. N. Muslimov**

### Abstract

Monitoring, carried out using a computer-integrated information gathering system at existing wastewater treatment plants, made it possible to create a database on wastewater quality indicators (pH, redox potential, electrical conductivity, temperature). As a result of statistical processing of the results, the presence of pairwise relationships of medium closeness between the indicated quality indicators was set, which made it possible to form a conclusion about the expected effectiveness of predictive control of the purification process based on predicted pH values. A neural network pH forecasting system has been developed, which, after training using the obtained database, demonstrated high reliability of the forecast results and can be recommended for use. A possible structure of a predictive control system for the wastewater treatment process for practical implementation is presented.

**Keywords:** wastewater, pH prediction, correlation analysis, neural networks, wastewater treatment plants.

### Введение

Согласно ЭкоНИП 17.06.06-005-2022 устанавливаются требования по обеспечению экологической безопасности при эксплуатации очистных сооружений (ОС) механической, биологической и физико-химической очистки сточных вод (СВ), в том числе по эффективности удаления загрязняющих веществ, а также сооружений обработки осадков сточных вод. Одновременно, в соответствии с пунктом 7 статьи 47 Водного кодекса Республики Беларусь, сброс всех видов СВ с использованием рельефа местности (оврагов, карьеров, балок и иных подобных выемок в грунте), а также на избыточно увлажненные территории (болота) не допускается. Сброс сточных вод в окружающую среду должен осуществляться исключительно в установленные приемники сточных вод через систему канализации с предварительной качественной обработкой. Нормативные требования обеспечения экологической безопасности геозкосистем сформулированы и в постановлении Совета Министров Республики Беларусь 04.09.2019 № 594 «Правила технической эксплуатации систем питьевого водоснабжения и водоотведения (канализации) населенных пунктов».

Существующие очистные сооружения в городах и районных центрах страны построены преимущественно в 70-е годы прошлого века (всего функционирует 1470 коммунальных очистных сооружений, установленной производительностью 3,45 млн куб. метров в сутки), имеют большой физический износ и не могут обеспечить выполнение современных требований к качеству очистки сточных вод, в

первую очередь, по удалению биогенных элементов – азота и фосфора. Последнее просто не предусматривалось использовавшимися на момент их сооружения технологиями [1]. В настоящее время необходимо проведение их комплексной реконструкции и модернизации. Учитывая масштабность задачи, которая должна решаться в ограниченные сроки при ограниченных финансовых ресурсах, возникает потребность в экономичных методах управления процессом очистки, предполагающих широкое применение математических моделей при снижении доли технических средств. Построение таких моделей требует продолжительного во времени качественного мониторинга систем водоотведения [2, 3].

На основе данных Европейского агентства по окружающей среде до 2010 года только 38 % рек были отнесены к классам «хорошего» или «высокого» экологического статуса. Современными мониторинговыми исследованиями установлено, что 56 % рек и 44 % озер в Европейском Союзе (ЕС) в наши дни имеют «менее чем хороший» экологический статус. Таким образом, при весьма значительных финансовых вложениях фиксируется не достаточно сильный экологический прогресс. Это указывает на необходимость поиска новых подходов к решению проблемы [4, 5].

Учитывая высокую неравномерность поступления стоков и загрязнителей, можно ожидать, что эффективным будет предиктивное управление процессом очистки на основе распределенных средств. При этом для прогнозирования показателей качества поступающих

на очистку сточных вод можно применить нейросетевые технологии. Это позволит заранее оценивать возможность пиковых поступлений загрязнителей и с упреждением реагировать на ситуацию на начальных стадиях очистки [6, 7].

#### Постановка задачи

Требуется разработать систему сбора информации о качестве сточных вод в системе водоотведения и прогнозирования значений активной реакции водных растворов, поступающих на очистку, на основе использования математического аппарата нейронных сетей, сформировать базу значений показателей качества сточных вод путем мониторинга процесса на значительном временном интервале, осуществить обучение нейронной сети и оценку точности прогнозирования.

#### Обоснование выбора технологического объекта, материалы и методика исследований

Сложилась сложная ситуация с коммунальными очистными сооружениями г. Барановичи, которая вызвана тем, что в городскую канализацию отводится большое количество неочищенных производственных сточных вод с ряда промышленных предприятий города. Крайне негативное воздействие на активный ил оказывают значения показателя «рН» на входе ОС, они систематически превышают допустимые величины – есть периоды протяжённостью около 2 часов, когда рН выше значения 8,5 в пиках достигая 10 и более. Превышения, как правило, относятся к определённым часам суток и дням недели. Фиксируемая продолжительная во времени щелочная активная реакция водного раствора, поступающего на обработку активным илом, однозначно провоцирует гибель микробной популяции последнего и блокирует нормальную очистку. При этом происходит синтез серосодержащих токсикантов в сети канализации до поступления СВ на обработку.

Попытки реанимирования ОС загрузкой активного ила с других очистных сооружений либо внесением биостимулирующих агентов, без систематизации и анализа параметров водоотведения, оказались неэффективными (либо ограничено эффективными). Экспертная оценка свидетельствует, что необходимы исследования, направленные на повышение экологической безопасности водоотведения г. Барановичи путем внедрения оперативного контроля показателей качества СВ еще на этапах их транспортировки к ОС, что может быть реализовано разработкой и внедрением модулей, осуществляющих оперативное прогнозирование показателей качества водных растворов.

Среди основных причин, которые не позволяют наладить эффективное управление сетью водоотведения в целом, включая коммунальные очистные сооружения – незначительное количество измерительных средств, способных функционировать в сегментах сети водоотведения (колодцы, коллекторы, насосные станции, напорный и безнапорный трубопроводы). Это требует формирования распределённой структуры измерительной системы, систематизации и обработки результатов мониторинга в условиях неполноты получаемой информации.

При оценке взаимосвязей между показателями качества сточных вод используется коэффициент корреляции Пирсона, который вычисляется по формуле [8]

$$r_{xy} = \frac{\sum (d_x \cdot d_y)}{\sqrt{(\sum d_x^2 \cdot \sum d_y^2)}}. \quad (1)$$

Возможные значения коэффициента корреляции варьируются от 0 до  $\pm 1$ : чем больше абсолютное значение  $r_{xy}$ , тем выше теснота связи между двумя величинами.  $r_{xy} = 0$  говорит о полном отсутствии связи;  $r_{xy} = 1$  свидетельствует о наличии абсолютной (функциональной) связи.

Для оценки тесноты (силы) корреляционной связи обычно используют общепринятые критерии (например, критерий Чеддока), согласно которым абсолютные значения  $r_{xy} > 0,3$  свидетельствуют о слабой связи, значения  $r_{xy} 0,3 - 0,7$  – о средней связи, значения  $r_{xy} > 0,7$  – о сильной связи.

Оценка статистической значимости коэффициента корреляции  $r_{xy}$  осуществляется при помощи t-критерия [8]:

$$t_r = \frac{r_{xy} \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}. \quad (2)$$

Полученное значение  $t_r$  сравнивается с критическим значением при определенном уровне значимости и числе степеней свободы  $n-2$ . Если  $t_r$  превышает  $t_{крит}$ , то делается вывод о статистической значимости выявленной корреляционной связи.

При обучении нейронной сети использовался классический алгоритм обратного распространения ошибки [9]:

*Шаг 1.* Весам сети присваиваются небольшие начальные значения.

*Шаг 2.* Выбирается очередная обучающая пара (X, Y); вектор X подается на вход сети.

*Шаг 3.* Вычисляется выход сети.

*Шаг 4.* Вычисляется разница между выходом сети, требуемым (целевым Y) и реальным (вычисленным).

*Шаг 5.* Вес сети корректируется так, чтобы минимизировать ошибку.

*Шаг 6.* Шаги со 2-го по 5-й повторяются для каждой пары обучающего множества до тех пор, пока ошибка на всем множестве не достигнет приемлемой величины.

Шаги 2 и 3 подобны тем, которые выполняются в уже обученной сети. Вычисления в сети выполняются послойно. На шаге 3 каждый из выходов сети вычитается из соответствующей компоненты целевого вектора с целью получения ошибки. Она используется на шаге 5 для коррекции весов сети. Шаги 2 и 3 можно рассматривать как «проход вперед», поскольку сигнал распространяется сетью от входа к выходу. Шаги 4 и 5 составляют «обратный проход», поскольку здесь исчисляемый сигнал ошибки распространяется назад сетью и используется для подстройки весов.

Статистический анализ был выполнен на аналитической платформе Deductor, которая является основой для создания прикладных решений. Реализованные в ней технологии позволяют на базе единой архитектуры пройти этапы построения аналитической системы: от создания хранилища данных до автоматического подбора моделей и визуализации полученных результатов. Deductor предоставляет инструментальные средства, необходимые для решения аналитических задач: отчетность, прогнозирование, сегментация, поиск закономерностей. Также Deductor является хорошей платформой для создания систем поддержки принятия решений.

В рамках работы под «предиктивным управлением» понимается процесс очистки, при котором обработка сточных вод начинается до их непосредственного поступления на очистные сооружения на основе математического оперативного прогнозирования показателей качества.

#### Компьютерно-интегрированная система сбора информации о качестве сточных вод г. Барановичи

Для работы компьютерно-интегрированной системы сбора информации о качестве сточных вод (КИС СИКСВ) используется интерпретатор Python версии 3.8, модули numpy, pandas, requests, xlrd, XlsxWriter, PyQt5, pyqtgraph. Программное обеспечение (ПО) функционирует в рамках базы данных SQLite3. Интерфейс реализован с применением кроссплатформенного фреймворка Qt (рисунок 1).



Рисунок 1 – Интерфейс компьютерно-интегрированной системы сбора информации о качестве сточных вод

В основном окне программы отображаются суточные графики дискретностью 15 минут для таких параметров, как pH, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), электропроводность и температура, а также кнопки выбора разделов:

- измерение pH (автоматическая запись в базу данных (БД) каждые 5 минут);
- измерение ОВП (автоматическая запись в БД каждые 5 минут);
- измерения электропроводности (автоматическая запись в БД каждые 5 минут);
- измерения температуры (автоматическая запись в БД каждые 5 минут);

- измерения расхода сточных вод (ручная запись в БД);
- результаты лабораторного анализа качества воды (ручная запись параметров в БД);
- архивные данные (все результаты автоматической записи в БД);
- аналитический модуль оценки водоотведения КУПП «Водоканал» г. Барановичи.

**Разделы программы «Измерение pH», «Измерение ОВП», «Измерения электропроводности», «Измерения температуры»** имеют одинаковую структуру, представленную на рисунке 2.

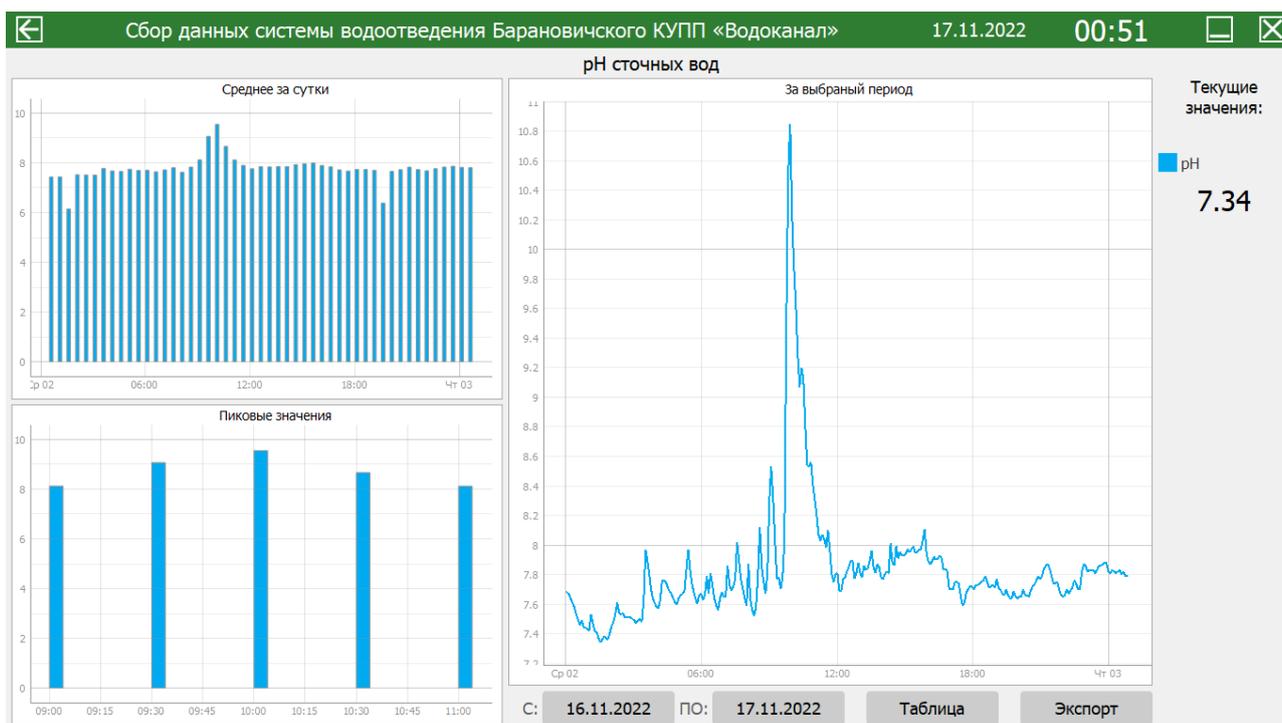


Рисунок 2 – Интерфейс компьютерно-интегрированной системы сбора информации о значениях pH сточных вод

Сбор данных проводился КИС СИКСВ на протяжении 8 месяцев. С помощью КИС СИКСВ сформирован набор данных глубиной 69000 точек для дальнейшего анализа и прогнозирования pH СВ.

**Анализ значений показателей качества сточных вод и их статистическая обработка**

Сначала рассмотрено изменение pH сточных вод в течение дня, оценены и структурированы данные этого показателя в течение всех

дней недели (по среднеарифметическим значениям) за весь период анализа (рисунок 3).

Несмотря на сглаживание усреднённых значений pH за счёт больших массивов информации, можно сделать вывод о том, что самые щелочные водные растворы поступают в «голову» биологических очистных сооружений во временном промежутке 7–11 часов (см. рисунок 3). Таким же способом выполнена систематизация данных по дням недели (рисунок 4).

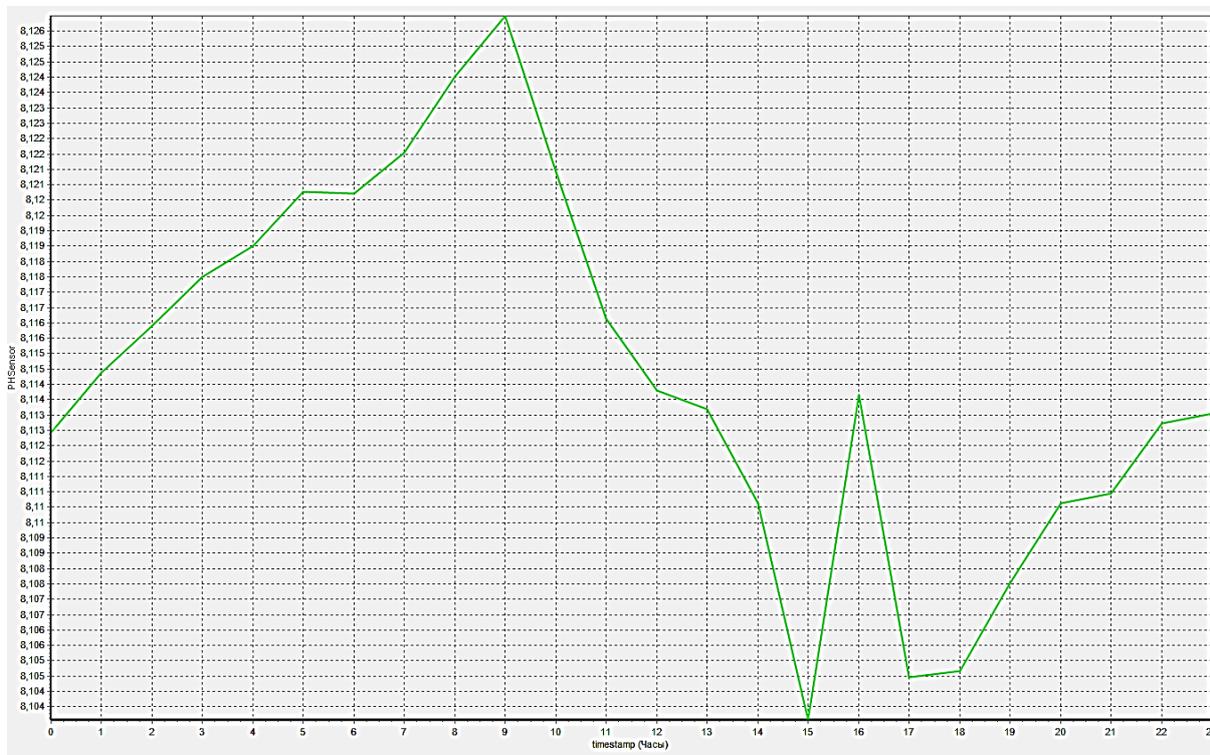


Рисунок 3 – Изменение pH в течение суток на входе в коммунальные очистные сооружения

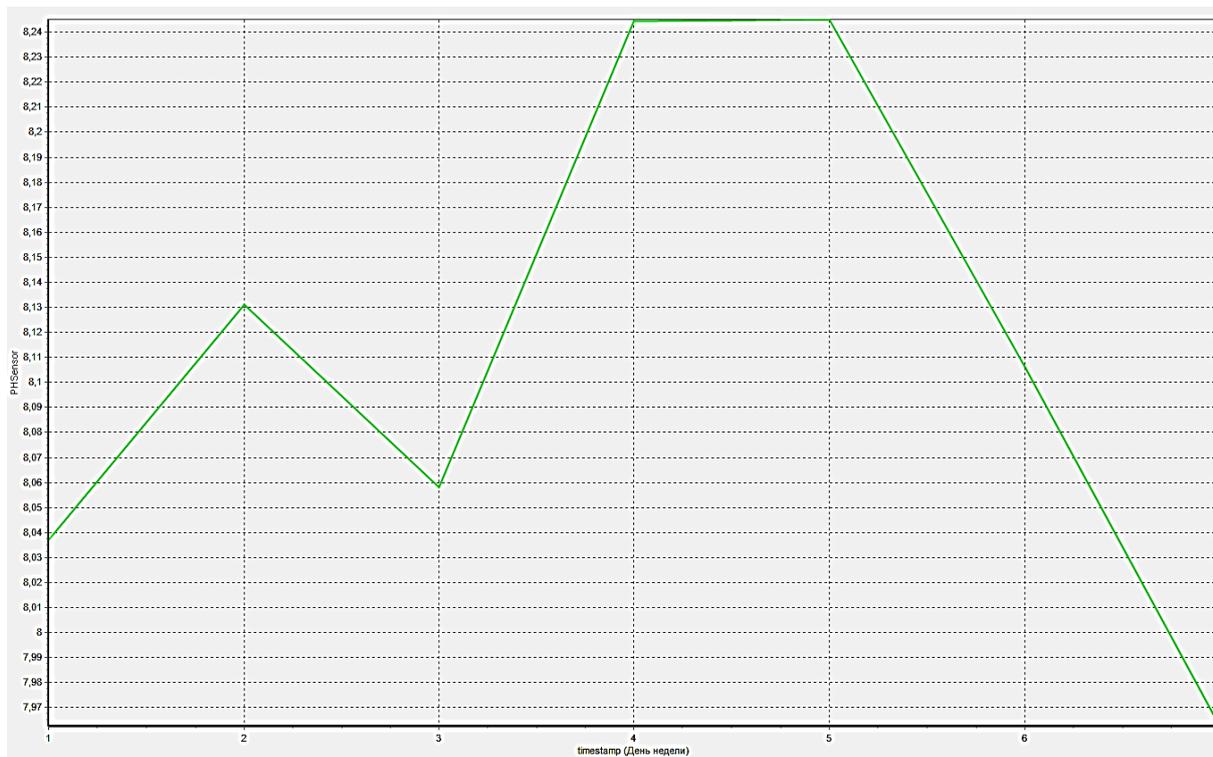


Рисунок 4 – Изменение pH по дням недели: 1 – понедельник, 2 – вторник, 3 – среда, 4 – четверг, 5 – пятница, 6 – суббота, 7 – воскресенье

Значения pH, соответствующие максимально щелочной среде, зафиксированы в четверг и пятницу, минимально щелочной – с субботы по понедельник (см. рисунок 4).

На показатель pH влияют помимо временного фактора и другие величины, которые фиксируются КИС СИКСВ: ОВП (RedoxSensor), электропроводимость (ECSensor) и температура воды (TPHSensor и TECSensor – измерители установлены, соответственно, в pH-метре и ОВП-метре).

Для установления взаимозависимостей провели анализ, где для вычисления коэффициента корреляции использовался максимум взаимокорреляционной функции: устанавливался попарный максимум из коэффициентов корреляции двух процессов, рассчитанных при возможных временных сдвигах (рисунки 5–7).

Сильные взаимосвязи выявлены между pH, ОВП и температурой (см. рисунок 5), влияние электропроводности характеризуется как средней тесноты (коэффициент – 0,502).

На ОВП ключевое влияние оказывает температура (см. рисунок 6) – степень взаимосвязей средняя (значение коэффициента выше 0,6).

Наибольшее влияние на электропроводность оказывает pH (см. рисунок 7), остальные величины приближаются к слабой силе связей.

Таким образом, можно сделать вывод о наличии корреляционных взаимосвязей между параметрами СВ, при этом они во многом характеризуются средними значениями коэффициента попарной корреляции. При этом влияние pH наиболее существенно. Полученные зависимости можно использовать при построении систем управления очистными сооружениями.

Полученные результаты относятся к СВ, уже поступившим на ОС. Воздействие на СВ на основе данных результатов будет запоздалым в силу инерционности биохимических процессов удаления загрязнителей и не будет обеспечивать поддержание pH на заданном уровне, что может вызвать гибель активного ила. Для устранения данного недостатка путем организации предиктивного управления процессом требуется устройство по прогнозированию pH.

**Нейросетевое прогнозирование значений pH сточных вод и предиктивное управление процессом очистки**

Для прогнозирования значений активной реакции водных растворов, поступающих на очистку биологическими очистными сооружениями, применили многослойный перцептрон [9, 10] (рисунок 8). Глубина прогнозирования (проекция) – 5 часов.

Входные поля			Корреляция с выходными полями	
№	Поле		PHSensor	
1	RedoxSensor			-0,925
2	ECSensor			0,502
3	TPHSensor			0,797
4	TECSensor			0,802

Рисунок 5 – Определение корреляционного влияния ОВП, электропроводности, температуры на pH сточных вод

Входные поля			Корреляция с выходными полями	
№	Поле		RedoxSensor	
1	PHSensor			0,265
2	ECSensor			0,301
3	TPHSensor			0,636
4	TECSensor			0,638

Рисунок 6 – Определение корреляционного влияния pH, электропроводности, температуры на ОВП сточных вод

Входные поля			Корреляция с выходными полями	
№	Поле		ECSensor	
1	PHSensor			0,502
2	RedoxSensor			-0,430
3	TPHSensor			0,412
4	TECSensor			0,406

Рисунок 7 – Определение корреляционного влияния pH, ОВП и температуры на электропроводность сточных вод

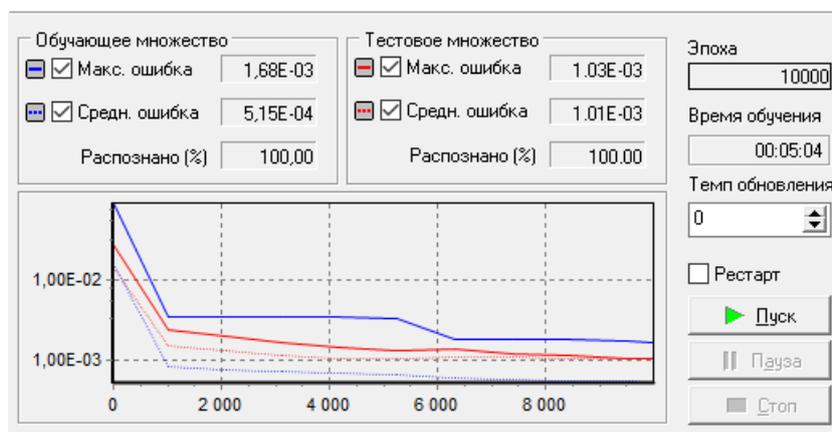


Рисунок 8 – Результаты обучения нейросети (многослойный перцептрон) прогнозирования pH сточных вод

При использовании 10000 итерационных эпох (см. рисунок 8) был достигнут высокий результат по точности прогнозирования (рисунок 9) – для обучающей и тестовой выборки относительная среднеквадратическая ошибка ниже 0,01 %.

Высокая достоверность нейросетевого прогнозирования pH позволяет рекомендовать полученную нейронную сеть для использования в системах предиктивного управления процессами очистки сточных вод. Это позволило предложить возможную структуру такой системы (рисунок 10).



Рисунок 9 – Оценка достоверности прогнозирования значений pH сточных вод с использованием нейросети



Рисунок 10 – Возможная структура системы предиктивного управления процессом очистки сточных вод с использованием нейросетевого прогнозирования значений показателей качества

Двухстороннее взаимодействие между «Модулем систематизации данных о показателях качества сточных вод» и «Автоматизированной системой управления технологическими процессами очистными сооружениями» (см. рисунок 10) вызвано необходимостью корректировки настроек первого. Также имеется возможность оперативной передачи информации от автоматических пробоотборников на «Модуль систематизации данных о показателях качества сточных вод» по ряду параметров водных растворов, например температуре и pH. При программно-аппаратном агрегировании данных от различных источников обосновано применить распределённые Web-SCADA решения. В то же время использование результатов дискретных измерений аккредитованной лабораторией определения состава СВ (автоматические пробоотборники и профильный персонал предприятий водопроводно-канализационных хозяйств) вызвано крайней большой неполнотой

информации о процессах водоотведения, соответственно, даже периодически получаемые данные имеют значительную ценность при управлении ОС. Таким образом, автоматизированная система управления процессом очистки, основываясь на результатах прогнозирования показателей качества, имеет возможность воздействовать на процесс с упреждением, исключая возможность выхода показателей за допустимые границы при пиковых выбросах загрязнителей. В обычных системах это гарантировать сложно, учитывая значительную инерционность рассматриваемых процессов.

**Заключение**

Мониторинг, проведенный с использованием компьютерно-интегрированной системы сбора информации на действующих очистных сооружениях, позволил сформировать базу данных о пока-

зателея качества сточных вод (рН, окислительно-восстановительный потенциал, электропроводность, температура). В результате статистической обработки результатов установлено наличие попарных взаимосвязей средней тесноты между указанными показателями качества, что позволило сделать вывод о предполагаемой эффективности предиктивного управления процессом очистки на основе прогнозируемых значений рН. Разработана система нейросетевого прогнозирования рН, которая после обучения с использованием полученной базы данных (69000 наборов) продемонстрировала высокую достоверность результатов прогноза (относительная средне-квадратическая ошибка для учебной и тестовой выборки менее 0,01 % при 10000 итерационных эпохах корректировки параметров нейросети) и может быть рекомендована к применению. Приведена возможная структура системы предиктивного управления процессом очистки сточных вод для практической реализации.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на практическую реализацию системы очистки сточных вод с предиктивным управлением на основе нейронной сети по показателю рН и дальнейшее расширение ее функциональных возможностей с организацией управления по другим показателям качества сточных вод.

#### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (договор № Ф23У-012 от 02.05.2023 года).

#### Список цитированных источников

1. Мазоренко, Д. І. Інженерна екологія сільськогосподарського виробництва / Д. І. Мазоренко, В. Г. Цапко, Ф. І. Гончаров. – К. : Знання, 2006. – 376 с.
2. Штепа, В. Н. Применение автоматизированных электролизных процессов в системах очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий / В. Н. Штепа, В. И. Дунай, О. Н. Прокопеня // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 2 (131). – С. 127–131.
3. Enhancing Ecological Efficiency in Biological Wastewater Treatment: A Case Study on Quality Control Information System / D. Alekseevsky [et al.] // Water. – 2023. – Vol. 15, Iss. 21. – P. 3744.
4. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy // Official Journal. L 327. – 2000. – 73 p.
5. Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks / Eugenio Molina-Navarro [et al.] // Limnologica. – 2020. – Vol. 80. – 125742.
6. Вероятностные нейронные сети в задачах управления комбинированными системами водоочистки / В. Н. Штепа [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2018. – № 2 (110) : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 88–90.
7. Штепа, В. Н. Обоснование и схемы использования ранжирующих измерительных систем экологического мониторинга и интеллектуального анализа режимов водоотведения / В. Н. Штепа, Н. Ю. Золотых, С. Ю. Киреев // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2023. – № 1 : Строительство. Прикладные науки. – С. 94–103.
8. Рязанский, В. П. Модифицированный критерий Пирсона в экономических исследованиях / В. П. Рязанский // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9–2. – С. 419–423
9. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с.
10. Головкин, В. А. Нейроинтеллект: теория и применение: в 2 кн. / В. А. Головкин. – Брест : БПИ, 1999. – Кн.1. Организация и обучение нейронных сетей с прямыми и обратными связями. – 260 с.

#### References

1. Mazorenko, D. I. Inzhenerna ekologiya sil'skogospodars'kogo virobnicтва / D. I. Mazorenko, V. G. Capko, F. I. Goncharov. – K. : Znannya, 2006. – 376 s.
2. SHtepa, V. N. Primenenie avtomatizirovannykh elektroliznykh processov v sistemah oчитki stochnykh vod rybopererabatyvayushchih predpriyatij / V. N. SHtepa, V. I. Dunaj, O. N. Prokopenya // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2023. – № 2 (131). – S. 127–131.
3. Enhancing Ecological Efficiency in Biological Wastewater Treatment: A Case Study on Quality Control Information System / D. Alekseevsky [et al.] // Water. – 2023. – Vol. 15, Issue 21. – P. 3744.
4. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy // Official Journal L 327. – 2000. – 73 p.
5. Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks / Eugenio Molina-Navarro [et al.] // Limnologica. – 2020. – Vol. 80. – 125742.
6. Veroyatnostnye nejronnye seti v zadachah upravleniya kombinirovannymi sistemami vodoочistki / V. N. SHtepa [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2018. – № 2 (110) : Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoeekologiya. – S. 88–90.
7. SHtepa, V. N. Obosnovanie i skhemy ispol'zovaniya ranzhiruyushchih izmeritel'nyh sistem ekologicheskogo monitoringa i intellektual'nogo analiza rezhimov vodoотvedeniya / V. N. SHtepa, N. YU. Zolotyh, S. YU. Kireev // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. – 2023. – № 1 : Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – S. 94–103.
8. Ryazanskij, V. P. Modificirovannyj kriterij Pirsona v ekonomicheskikh issledovaniyah / V. P. Ryazanskij // Fundamental'nye issledovaniya. – 2016. – № 9–2. – S. 419–423
9. Kruglov, V. V. Iskusstvennye nejronnye seti. Teoriya i praktika / V. V. Kruglov, V. V. Borisov. – M. : Goryachaya liniya-Telekom, 2002. – 382 s.
10. Golovko, V. A. Nejrointellekt: teoriya i primeneniye: v 2 kn. / V. A. Golovko. – Brest : BPI, 1999. – Kn.1. Organizaciya i obuchenie nejronnyh setej s pryamymi i obratnymi svyazyami. – 260 s.

Материал поступил 26.02.2024, одобрен 14.03.2024, принят к публикации 18.03.2024

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ ЭКОНОМИКИ НА ДИНАМИКУ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ В БЕЛАРУСИ

А. А. Волчек<sup>1</sup>, Т. Е. Зубрицкая<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Д. г. н. РФ и РБ, профессор, профессор кафедры природообустройства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: Volchak@tut.by

<sup>2</sup> Старший преподаватель кафедры природообустройства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: zte0607@yandex.ru

### Реферат

Одним из важных аспектов изучения динамики водопотребления является анализ воздействия человеческой деятельности на водные ресурсы и экосистемы. Повышенное потребление воды в промышленности, сельском хозяйстве и городской среде может привести к истощению подземных вод, загрязнению водоемов и изменению гидрологического режима. Изучение этих процессов позволяет разрабатывать меры по устранению негативных последствий и обеспечению устойчивого использования водных ресурсов для будущих поколений.

Для этого нами предпринята попытка изучения влияния различных отраслей экономики на потребление воды, что позволило выявить ключевые проблемы и в дальнейшем разработать стратегии эффективного использования водных ресурсов и содействовать сохранению экологического равновесия.

**Ключевые слова:** динамика водопотребления, водные ресурсы, отрасль экономики, промышленность, хозяйственно-питьевое водоснабжение.

## THE INFLUENCE OF VARIOUS SECTORS OF THE ECONOMY ON THE DYNAMICS OF WATER CONSUMPTION IN BELARUS

A. A. Volchak, T. E. Zubritskaya

### Abstract

One of the important aspects of studying the dynamics of water consumption is the analysis of the impact of human activities on water resources and ecosystems. Increased water consumption in industry, agriculture and the urban environment can lead to depletion of groundwater, pollution of reservoirs and changes in the hydrological regime. The study of these processes makes it possible to develop measures to eliminate negative consequences and ensure the sustainable use of water resources for future generations.

To do this, we attempted to study the impact of various sectors of the economy on water consumption, which allowed us to identify key problems and further develop strategies for the effective use of water resources and promote the preservation of ecological balance.

**Keywords:** dynamics of water consumption, water resources, economic sector, industry, household and drinking water supply.

### Введение

Сравнительно недавно для удовлетворения потребностей в воде нужно было лишь подвести ее от источника к потребителю. Изъятия вод из источника составляли незначительную часть и не оказывали значимых изменений его режима. По мере развития экономики и благоустройства населенных мест, все чаще возможности забора воды ограничиваются объемом ресурсов вод источника и обуславливают необходимость мероприятий по увеличению имеющихся водных ресурсов.

Забор воды из источников составляет несколько процентов от среднего годового стока. Однако, уже сейчас, сравнение потребности в воде с ее наличием в основных водосборах рек с трудом уязвляется в водохозяйственном балансе.

Основные причины:

- непропорциональность размещения водоемких потребителей распределению водных ресурсов по территории;
- значительные колебания стока от года к году.

Значительная часть водопотребления не поддается или не поддается сокращению, например, испарение воды с поверхности водохранилищ, снижению норм коммунально-бытового водопотребления.

Соответственно, деятельность по сокращению водопотребления должна быть направлена на уменьшение ее затрат в коммунальном и промышленном водоснабжении; на уменьшение потерь воды в системах водоснабжения.

Каждое из этих направлений требует больших материальных и трудовых затрат.

Развитие оборотного водоснабжения не вызывает сомнений с точки зрения охраны природных вод от загрязнения. Однако это ведет к увеличению потерь воды, т. к. при сохранении водозатрат в технологических циклах с внедрением водооборота ее потери на испарение и фильтрацию растут на коммуникациях и сооружениях

системы оборотного водоснабжения. При этом, переход на замкнутые системы водоснабжения должен сопровождаться материальными затратами на мероприятия по утилизации отходов производства; в противном случае отходы на том или ином этапе превратятся в источники загрязнения окружающей среды.

Большая часть населения территории Беларуси проживает на территориях речных бассейнов Западной Двины, Днепра, Немана. Значительные заборы воды из рек приводят к неблагоприятному изменению режима водоемов, что в свою очередь влечет за собой хозяйственные ущербы и отрицательно воздействует на окружающую среду.

Развитие водопотребления сопровождается увеличением объемов отработанных вод, которые в той или иной мере попадают в водные источники. В стране проводится большая работа по сокращению количества попадающих в водные источники загрязнений. Значительные средства вкладываются в создание оборотных систем водоснабжения (без сброса сточных вод в водоемы), в разработку безотходных технологических процессов и др. Однако, если в динамике загрязнения водных источников отходами промышленности в некоторых районах и намечается перелом, то решение проблемы в целом требует еще немалых усилий и крупных капиталовложений. Помимо загрязнений водоемов удобрениями и ядохимикатами, поступающими с полей в виде дренажных вод, а также с талыми водами, обильные загрязнения приносят с собой ливневые стоки городов. Рост некомпенсируемого изъятия воды из рек Припятского бассейна повлечет за собой сокращение лимитов воды на функционирование экосистем.

Поэтому становится ясно, что одна только рационализация водопотребления в бассейнах крупных рек страны не может открывать широкие возможности для развития водоемких производств.

Крайне важно определить величину допустимых изъятий воды. Необходимы исследования, направленные на выработку системы

методических подходов, пригодных для различных ситуаций, где будут учитываться хозяйственные и природоохранные аспекты как в зоне намечаемого изъятия вод, так и в зоне их использования.

По мере возрастания требований на воду все большее значение приобретает оптимальное управление водными ресурсами, которое включает:

- распределение водных ресурсов между отраслями хозяйства и отдельными водопотребителями;
- распределение водных ресурсов между регионами страны;
- комбинированное использование поверхностных и подземных вод с периодическим восполнением запасов подземных вод поверхностными (в периоды избытка последних).

Проблему водообеспечения страны нельзя решать без учета социальных аспектов, и, прежде всего:

- без выполнения требований питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения к качеству гарантируемых в этих целях объемов воды;
- поддержания занятости населения (с учетом естественного прироста) в отраслях, связанных с режимом водных источников (их водностью и качеством вод) или путем создания новых рабочих мест в отраслях хозяйства, функционирование которых не будет ущемляться при возможном нарушении режима природных вод и водных объектов;

– сохранения связанных с режимом водных объектов условий для отдыха, спорта, рекреаций или развития альтернативных путей удовлетворения указанных потребностей общества.

Системы питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения нуждаются в дальнейшем развитии и должны отвечать современным требованиям к жилищам, а именно в малых городах и сельских населенных пунктах. Решение этой проблемы на большей части территории не вызывает затруднений (рисунок 1) [1].

Охват жителей страны услугами централизованного водоснабжения свидетельствует о достаточно высоком уровне доступа населения к качественной воде.

Нужно различать данные по фактическому использованию воды (или современное водопотребление) и расчетные данные, относящиеся к будущему периоду. Современное состояние водопотребления должно оцениваться, главным образом, по статистическим и отчетным материалам, основанным на инструментальной регистрации.

Информационными системами охвачены не все виды использования воды. Так, не регистрируется объем воды, используемый непосредственно в руслах рек. Не поддаются регистрации потери на испарение с поверхности водохранилищ и прудов. Не проводится инструментальный учет использования воды в сельском хозяйстве.

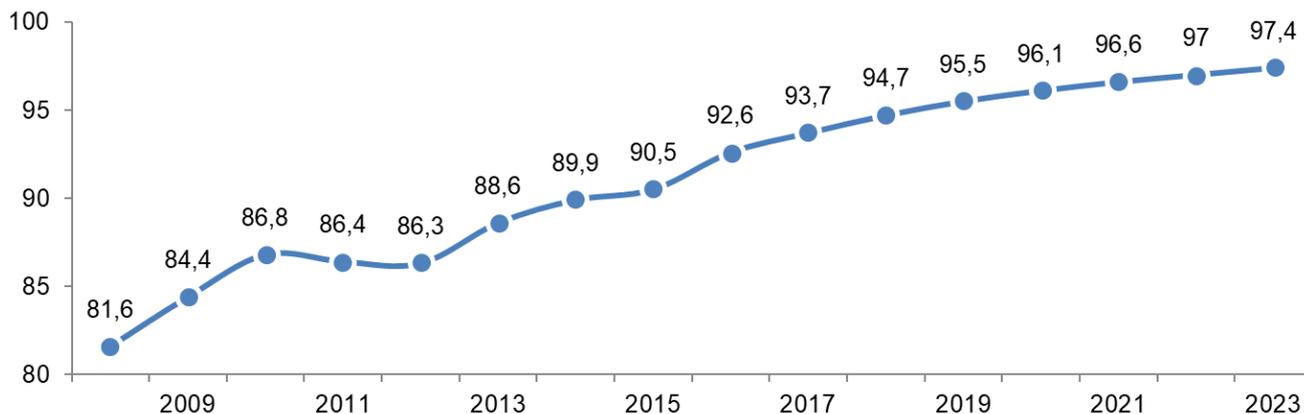


Рисунок 1 – Удельный вес домашних хозяйств, проживающих в квартирах (домах), оборудованных водопроводом (централизованной или нецентрализованной (локальной) системой питьевого водоснабжения), в общем числе домашних хозяйств на начало года

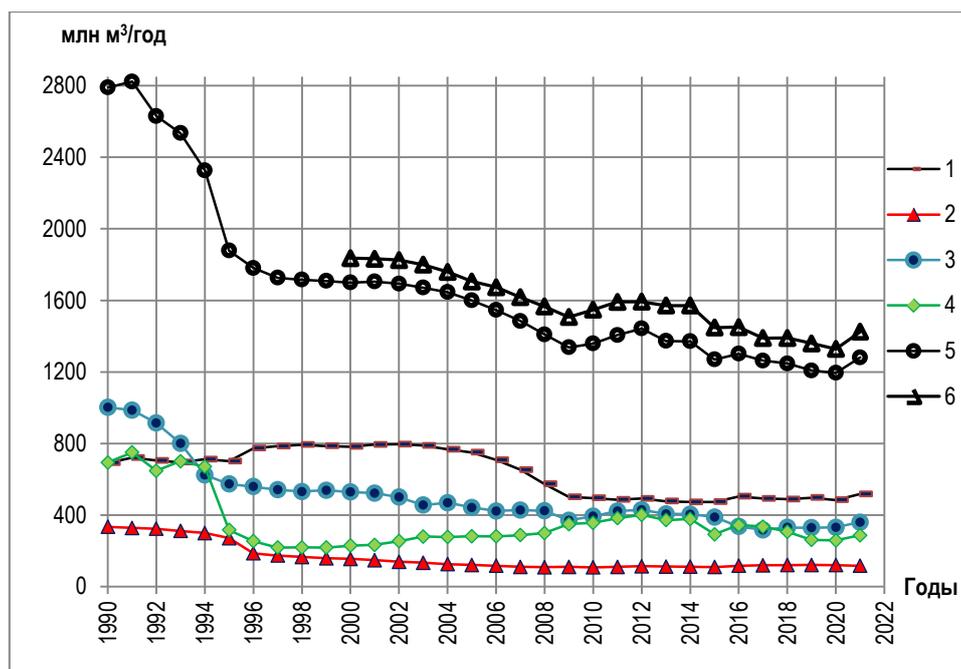


Рисунок 2 – Водопотребление в Беларуси за период с 1990 по 2021 гг.

1 – хозяйственно-питьевое; 2 – сельскохозяйственное; 3 – промышленное; 4 – рыбо-прудовое; 5 – общее; 6 – водозабор

### Результаты исследования и их обсуждение

По материалам статистической отчетности РУП "Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов" – сводные данные "Водные ресурсы, их использование и качество вод за 2000–2022 годы" были структурированы, проанализированы с представлением динамики использования водных ресурсов Беларуси в виде иллюстраций [2].

Для выявления тенденций и изменений в использовании природных вод в качестве основного показателя водопотребления рассматривается общее водопотребление (использование воды на все нужды народного хозяйства) с подразделением на отдельные отрасли.

По данным государственного водного кадастра изъятие поверхностных вод и добыча подземных вод Республики Беларусь в 2022 году составили 1414 млн м<sup>3</sup>, в том числе из поверхностных водных объектов – 610,4 млн м<sup>3</sup>, из подземных вод – 803,6 млн м<sup>3</sup>.

На рисунке 2 представлена динамика потребления воды Республикой Беларусь за период ее существования как независимой страны. Отмечается общая тенденция снижения потребления воды. Это вызвано различными факторами, среди которых в первую очередь следует отметить спад экономики на начальном этапе становления Беларуси как самостоятельной страны, переход на современные маловодоемкие технологии, изменение политики в области водопотребления и водопользования направленной на рациональное использование водных ресурсов и т. д. [3]

Однако в последние годы прослеживается увеличение водозабора, где наибольший объем забранной воды приходится на хозяйственно-питьевое и промышленное водопотребление.

В настоящее время население Беларуси обеспечивается питьевой водой главным образом из подземных источников, санитарно-гигиеническое состояние которых на действующих водозаборах в основном отвечает установленным требованиям, за исключением повышенного содержания в воде железа и марганца, в отдельных случаях бора, фтора и некоторых других компонентов, что является следствием гидрогеологических особенностей территории страны.

В водопотреблении на хозяйственно-питьевые нужды в первой половине исследуемого периода выявлены некоторые колебания, а, начиная с 1995 г. объемы использования воды на хозяйственно-питьевые нужды возрастают до 2002 года, а затем наблюдается уменьшения забора воды. В целом в стране прослеживается тенденция к экономному использованию питьевой воды и это стало возможным в результате установки населением индивидуальных приборов учета воды в жилом секторе, а также введения системы платного водопользования.

В промышленном секторе вода используется для различных целей, как правило, в качестве теплоносителя или охлаждающего средства, для мойки гидротранспорта продукции и сырья, для паробразования и т. д.

Ведущими отраслями в Республике являются пищевая промышленность; текстильное производство, включая производство одежды; обработка древесины и производство изделий из дерева; химическое производство [4, 5].

Основными потребителями воды по предприятиям являются:

- производство нефтепродуктов, химическое производство и производство резиновых и пластмассовых изделий: ОАО «Нафтан» (г. Новополоцк), ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод», ОАО «Беларуськалий», ОАО «Гродно Азот».
- металлургический комплекс: ОАО «Белорусский металлургический завод», ОАО Завод «Легмаш».
- энергетика: ОАО «Газпромтрансгаз Беларусь».
- производство продуктов питания, напитков и табачных изделий: ОАО «Савушкин продукт», СП «Санта Бремор» ООО.

Анализируя рисунок 2 за период наблюдений 1990–2021 гг., видно, что водопотребление в промышленности уменьшается. Снижение связано, прежде всего, с сокращением потребления воды на производственные нужды, переход на современные водоемкие технологии, изменение политики в области водопотребления и водопользования направленной на рациональное использование водных ресурсов, а также с разработкой технологических норм водопользования. Под нормирование попадает потребление общего количества воды, для производства единицы продукции; потребность в питьевой

и технической воде; оборотной и повторной (последовательной) используемой воде; число отводимых от предприятий сточных вод.

На промышленных предприятиях значительный объем потребляемой воды приходится на системы оборотного и повторного (последовательного) водоснабжения. Обустройство таких систем водоснабжения значительно снижает объем сбрасываемых в водоем промышленных стоков и, как следствие, снижает уровень его загрязненности и, соответственно, улучшает качество воды в водных объектах.

Поэтому необходимо рационально использовать водные ресурсы и не допускать ухудшения качества поверхностных, подземных вод, являющихся приемниками сточных вод предприятий различных отраслей промышленности.

Изменение в последние годы сельскохозяйственного водоснабжения связано с ростом благоустройства сельских поселков, а также развитием сельскохозяйственного производства. Вода в данной отрасли расходуется в значительных количествах на хозяйственно-питьевые нужды населения, на животноводческих фермах, на предприятиях по первичной переработке сельскохозяйственной продукции, на приготовление жидких подкормок для пропашных культур, на охлаждение двигателей сельскохозяйственных машин и автомобилей, на полив растений в парниках и теплицах и т. д. С 1990 года прослеживается тенденция к уменьшению сельскохозяйственного водоснабжения по Республике и это обусловлено, в первую очередь, существенным сокращением орошаемых сельскохозяйственных полей, переходом на более прогрессивные дождевальные машины и устройства и т. д. [6, 7].

В Республике Беларусь рыбохозяйственная деятельность осуществляется по двум основным направлениям: разведение и выращивание рыбы в искусственных условиях и ведение рыболовного хозяйства в рыболовных угодьях. Что непосредственно связано с использованием водных ресурсов и предъявляет высокие требования к качественным и количественным характеристикам природных вод. Для успешного воспроизводства и нормального развития рыбы необходимы чистая вода с достаточным количеством растворенного кислорода и отсутствием вредных примесей, соответствующая температура и обеспеченность кормами. Нормативы качества воды для рыбохозяйственных объектов более строгие, чем для источников питьевого водоснабжения.

На рисунке 2 в последние годы четко прослеживается увеличение водопотребления в рыбо-прудовом хозяйстве. Так, с реализацией подпрограммы 5 «Развитие рыбохозяйственной деятельности» государственной программы развития аграрного бизнеса в Республике Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 11 марта 2016 года № 196, обеспечены сохранение рыбных запасов и устойчивое использование их ресурсов. В период 2021–2025 гг. будет продолжена реализация мероприятий государственной программы на 2016–2020 годы, что также повлияет на изменение в рыбо-прудовом хозяйстве [8].

### Заключение

Таким образом, оценка изменения потребления воды по различным секторам экономики выявила ключевые проблемы в использовании водных ресурсов на территории Республики Беларусь, что в будущем может послужить при разработке комплексных планов использования водных ресурсов, что позволит снизить негативное воздействие на окружающую среду и способствовать сохранению экологического баланса.

### Список цитированных источников

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/>. – Дата доступа: 20.02.2024.
2. Окружающая среда и природные ресурсы Республики Беларусь: Статистический сб. Минстат Республики Беларусь, НИИ статистики. Минск, 2000–2022 гг.
3. Волчек, А. А. Использование водных ресурсов в Республике Беларусь / А. А. Волчек, Т. Е. Зубрицкая // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2014. – № 2 (86) : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 29–33.

4. Волчек, А. А. Проблемы водопотребления Беларуси / А. А. Волчек, Т. Е. Зубрицкая // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2016. – № 2 (98) : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 7–10.
5. 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.
6. Волчек, А. А. Динамика распределения водных ресурсов Беларуси между секторами экономики / А. А. Волчек, Т. Е. Зубрицкая // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2019. – № 2 (115) : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 6–9.
7. 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 ч. / 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.
8. Основной государственный информационный ресурс в области права и правовой информатизации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pravo.by/>. – Дата доступа: 20.02.2024.
3. Volchek, A. A. Ispol'zovanie vodnyh resursov v Respublike Belarus' / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2014. – № 2 (86) : Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya. – S. 29–33.
4. Volchek, A. A. Problemy vodopotrebleniya Belarusi / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2016. – № 2 (98) : Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya. – S. 7–10.
5. Volchek, A. A. Vodopotreblenie v oblastnyh centrakh Respubliki Belarus' / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya, N. N. SHeshko // Voda Magazine. – 2018. – № 4. – S. 46–52.
6. Volchek, A. A. Dinamika raspredeleniya vodnyh resursov Belarusi mezhdu sektorami ekonomiki / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2019. – № 2 (115) : Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya. – S. 6–9.
7. Volchek, A. A. Differencirovannaya ocenka kolebanij vodopotrebleniya v Respublike Belarus' / A. A. Volchek, T. E. Zubrickaya // Aktual'nye nauchno-tekhnicheskie 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 ch. / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet ; redkol.: A. A. Volchek [i dr.] ; nauch. red. A. A. Volchek, O. P. Meshik. – CHast' 2. – S. 61–66.
8. Osnovnoj gosudarstvennyj informacionnyj resurs v oblasti prava i pravovoj informatizacii [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.pravo.by/>. – Data dostupa: 20.02.2024.

#### References

1. Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus' [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.belstat.gov.by/>. – Data dostupa: 20.02.2024.
2. Okruzhayushchaya sreda i prirodnye resursy Respubliki Belarus': Statisticheskij sb. Minstat Respubliki Belarus', NII statistiki. Minsk, 2000–2022 gg.

*Материал поступил 05.03.2024, одобрен 21.03.2024, принят к публикации 21.03.2024*

## ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В СФЕРЕ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

М. Г. Герменчук<sup>1</sup>, Н. Н. Цыбулько<sup>2</sup>

<sup>1</sup> К. т. н., доцент, заместитель директора по научной работе УО «Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова БГУ», Минск, Беларусь, e-mail: germenchuk@iseu.by

<sup>2</sup> Д. с.-х. н., профессор, начальник научно-исследовательского сектора УО «Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова БГУ», Минск, Беларусь, e-mail: res\_sector@iseu.by

### Реферат

В статье представлен алгоритм механизмов управления рисками в сфере обеспечения радиационной безопасности человека и объектов окружающей среды, включающий мониторинг и прогноз радиационной обстановки. Показано, что представленная адаптированная модель деятельности по обеспечению радиэкологической безопасности хорошо согласуется с современными методами оценки риска, а предложенные расширенная матрица оценки степени риска и подходы по калибровке диапазонов хорошо описывают вероятностную природу рисков. Для Республики Беларусь идентифицированы основные 15 действующих и потенциальных радиэкологических рисков, предложена их категоризация по основным свойствам, представлены основные источники неопределенности в ситуациях радиэкологического риска. Показано, что долговременные тенденции роста актуальности проблем обеспечения радиационной безопасности подтверждаются высокими оценками степени радиэкологических рисков.

**Ключевые слова:** радиационная безопасность, механизмы управления радиэкологическими рисками, идентификация и квантификация рисков, степень риска, неопределенность, мониторинг и прогноз радиационной обстановки.

## GENERAL RISK MANAGEMENT MECHANISMS IN THE RADIATION SAFETY AND MONITORING OF ENVIRONMENT

M. G. Germenchuk, M. M. Tsybulka

### Abstract

The article presents an algorithm of risk management mechanisms in the radiation safety of humans and the environment, including monitoring and forecasting of the radiation situation. It is shown that the presented adapted model of activities to ensure radioecological safety is well consistent with modern methods of risk assessment, and the proposed extended risk assessment matrix and approaches to range calibration well describe the probabilistic nature of risks. For the Republic of Belarus, the main 15 existing and potential radioecological risks have been identified, their categorization by main properties has been proposed, the main sources of uncertainty in radioecological risk situations have been presented. It has been shown that long-term trends in the relevance of radiation safety problems are confirmed by high assessments of the degree of radioecological risks.

**Keywords:** radiation safety, mechanisms of radioecological risk management, identification and quantification of risks, rank of risk, uncertainty, monitoring and prognosis of the radiation situation.

### Введение

Региональные и глобальные радиэкологические проблемы, в том числе радиоактивное загрязнение биосферы вследствие испытаний ядерного оружия и катастроф на Чернобыльской АЭС и Фукусимской АЭС, а также иная деятельность по использованию атомной энергии и обеспечению радиационной безопасности человека и окружающей среды (далее – ОРБ) требуют создания эффективных механизмов по управлению возникающими экологическими, в том числе радиэкологическими, рисками.

Управление рисками в сфере ОРБ, превентивные мероприятия по снижению последствий катастрофических и иных негативных процессов требуют научно-обоснованных оценок угроз (опасностей) и рисков в сфере ОРБ с учетом их динамики в кратко-, средне- и долгосрочной перспективах.

Разработана и представлена структура модели радиационной безопасности и основные тренды актуальности проблем в сфере ОРБ, описаны основные адаптированные механизмы управления рисками.

С использованием научно обоснованных подходов проведена идентификация, квантификация и категоризация радиэкологических и иных угроз и рисков, предложены новые подходы к оценке степени риска в сфере ОРБ.

Особое внимание посвящено роли мониторинга и прогноза радиационной обстановки в окружающей среде как неотъемлемой части механизмов управления рисками в сфере ОРБ.

### Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования рассматривается сфера ОРБ как проблемосодержащая область, которая включает в себя угрозы и риски,

их оценки при реализации деятельности в этой сфере, проблемные ситуации и ситуации облучения, в качестве предмета исследования – их связи с механизмами управления рисками, в том числе, мониторингом и прогнозом радиационной обстановки в окружающей среде.

Примем, что в сфере ОРБ действуют два взаимодополняющие подхода: прагматический, где объект защиты – человек (население и персонал) и комплексный биосферный, где объекты защиты – человек и окружающая среда.

При анализе деятельности в сфере ОРБ были использованы логико-исторический подход и системный анализ, кроме того, а также теория риска, экспертные и иные методы.

Важно принять во внимание, что именно логико-исторический подход позволяет наиболее полно оценивать социальные аспекты рисков как всей системы ОРБ, так системы мониторинга и прогноза радиационной обстановки в окружающей среде (далее – система радиационного мониторинга окружающей среды) в составе механизмов управления рисками с учетом динамики угроз и рисков в этой сфере. Системный анализ позволяет формализовать оценки рисков, полученные на вербальном (качественном) уровне.

Для разработки механизмов управления рисками в сфере ОРБ были использованы общие подходы, определенные Международным стандартом IEC 31010:2018 «Менеджмент риска. Методы оценки риска» («Risk management – Risk assessment techniques», IDT), «General Safety Guide No. GSG-10 IAEA Safety Standards for Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities», а также национальный стандарт Республики Беларусь СТБ IEC 31010 – 2022 «Менеджмент риска. Техники оценки риска» от 01.08.2023 [1, 2, 3].

**Структура модели радиационной безопасности, актуальность проблем в сфере ОРБ**

Описание сферы ОРБ человека и биосферы целесообразно начинать с адаптации широко известного методического приема – модели деятельности в сфере экологической безопасности, предложенного рабочей группой Европейской экономической комиссии по мониторингу и оценке, которая предполагает, что такая деятельность состоит из четырех последовательных во времени фаз [4]. Следует отметить, что модель деятельности в сфере ОРБ хорошо согласуется с моделями управления рисками, как это показано далее.

Адаптированная для целей ОРБ структура модели безопасности включает в себя:

I. Признание проблемы на научном и социальном уровне, оценка ее общественной значимости (элемент А).

II. Формулирование политики радиационной безопасности (элементы В, С и D).

III Реализация политики радиационной безопасности (элемент Е).

IV Оценка результатов настоящей и планируемой деятельности с использованием ядерной энергии и в ОРБ (элемент F).

Такой методический подход позволяет выделить временные параметры реализации отдельных фаз деятельности, оценить общественную значимость вопросов обеспечения радиационной безопасности в зависимости от состава угроз и рисков с учетом типа ситуации облучения на разных этапах социально-экономического развития Республики Беларусь.

Очевидно, что именно фаза I, которая предполагает признание проблем в сфере ОРБ на научном и социальном уровне и последующая оценка ее значимости в различные временные периоды, как это далее описывает элемент А, задает последующие тренды актуальности проблем ОРБ для общества.

Оценим актуальность проблем в сфере ОРБ, используя логико-исторический подход с применением экспертных методов оценок. На рисунке 1 представлен экспертный анализ значимости проблем и выявленные тренды актуальности задач в сфере ОРБ в период 1945–2024 гг.

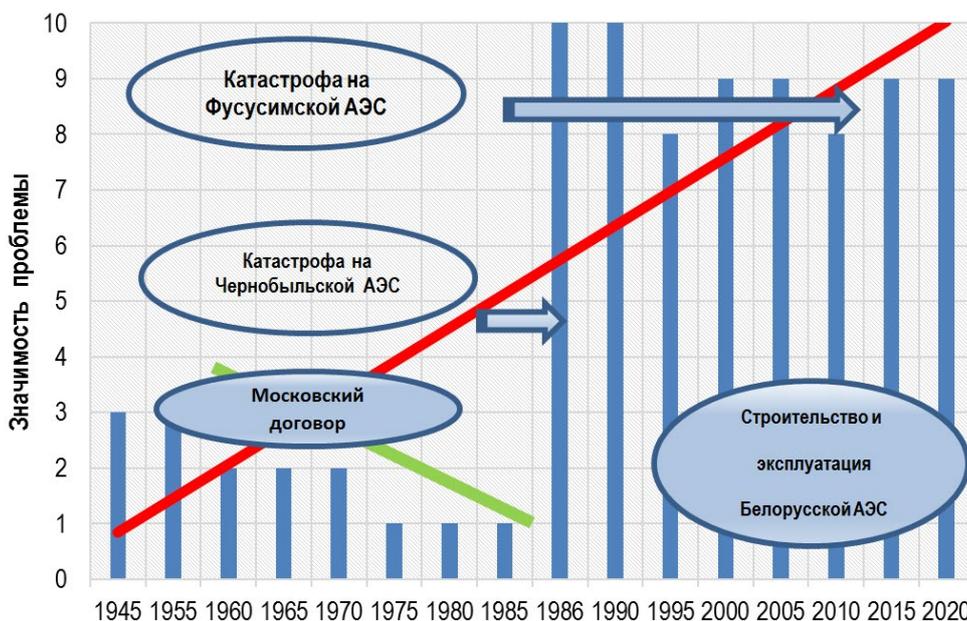
В этом контексте следует признать, что перед человечеством задача обеспечения радиационной безопасности впервые встала в 1945 году после глобального бомбового радиоактивного загрязнения биосферы вследствие испытаний и применения ядерного оружия.

Анализ диаграммы показывает, что в целом на протяжении 80 лет наблюдается ярко выраженный тренд роста актуальности проблем радиационной безопасности, связанных с радиоактивным загрязнением биосферы. Можно выделить временной промежуток, приблизительно в 20 лет, когда действие Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в трех природных сферах: атмосфере, космическом пространстве и под водой (1963 год), снизило напряженность восприятия проблем радиационной безопасности в связи с уменьшением рисков глобального радиоактивного загрязнения за счет проведения таких испытаний, однако даже в это время проблемы ОРБ оставались актуальными.

К сожалению, этот Договор не распространяется на наземные и подземные испытания, что не позволяет говорить об устранении в полном объеме рисков радиоактивного загрязнения биосферы при использовании атомной энергии в военных целях.

Разумеется, проблемы бомбового и аварийного радиоактивного загрязнения окружающей среды существовали и до катастрофы на Чернобыльской АЭС, достаточно вспомнить последствия ядерных бомбардировок Японии в августе 1945 года, а также значительные аварии на АЭС в Уинскеддейле (Великобритания, 1957 год) или на ПО «Маяк» (СССР, 1957 год). Однако значимость этих событий имела локальный характер и не требовала формирования стратегий защиты и обеспечения безопасности человека и биосферы в масштабах страны или континента.

Начиная с 1986 года, после катастрофы на Чернобыльской АЭС, спектр угроз и рисков в сфере ОРБ значительно расширился за счет аварийного радиоактивного загрязнения биосферы и в настоящее время для Республики Беларусь достаточно хорошо известен, идентифицирован и описан на вербальном уровне. Кроме того, следует отметить, что в составе уже известных угроз и рисков в сфере ОРБ отмечена еще одна негативная тенденция: увеличение потенциального и фактического масштаба воздействия опасностей, например, последствия радиационных аварий или радиологического и ядерного терроризма. При этом следует иметь в виду, что из-за особенностей физической природы радиоактивных веществ, негативное влияние радиоактивного загрязнения, в том числе, долгоживущими радионуклидами, например цезием-137, стронцием-90 и изотопами плутония, будет сохраняться на неопределенно долгий период (сотни и тысячи лет).



**Рисунок 1** – Значимость<sup>13</sup> и тренды актуальности проблем обеспечения радиационной безопасности (на примере Республики Беларусь)

Тренды актуальности проблем  
 за период 1945–2020 гг.      за период 1963–1985 гг.

<sup>13</sup> Значимость проблемы оценивается экспертным методом в относительных единицах от 0 до 10



Достоверность и полнота информации обеспечивается научно-организационными (международные стандарты безопасности, национальная нормативная правовая и нормативная правовая техническая база: законы, государственные и иные программы мониторинга, постановления, методики проведения измерений, программы подготовки и переподготовки кадров др.) и техническими решениями (измерительное и вычислительное оборудование, лаборатории, базы данных, системы управления качеством, а также моделирование и применение компьютерных кодов безопасности др.).

Продолжим изучение механизмов управления рискам и обратимся к источникам неопределенности при деятельности в ситуациях риска, как это предусматривает элемент (С). В общем случае, сущность неопределенности заключается в том, что оценка вероятности многих из возможных событий невозможна по причине отсутствия способов ее измерения и оценки качества.

Для разрешения этой проблемы в таблице 1 в общем виде описаны основные источники неопределенности, которые могут понизить качество информации в момент принятия решений по ОПБ в ситуации риска. Такой подход способствует выявлению критически важных источников неопределенности и предпринимать превентивные меры по ее снижению.

Источником неопределенности может стать неполная и (или) недостоверная информация, например, от системы мониторинга чрезвычайных ситуаций о самом факте реализации угрозы (например, какая из АЭС вокруг границ Беларуси находится в аварийном (предаварийном) состоянии), а также о месте, времени и иных характеристиках угрозы, например, угрозы радиологического терроризма. При этом понятно, что система радиационного мониторинга окружающей среды является эффективным способом снижения неопределенностей в части информации о радиоактивном загрязнении биосферы в различных ситуациях облучения (фаза III).

Отметим, что качество информации наиболее значимо и, в тоже время, его наиболее трудно обеспечить в условиях угрозы и наступления ситуации аварийного облучения. В этом случае основные требования к системе радиационного мониторинга должны быть предусмотрены при планировании защитных мероприятий при ядерной / радиационной аварии.

**Матрица оценки степени рисков в сфере ОПБ (RR – Матрица)**

Согласно действующим руководящим документам в области технического нормирования и стандартизации для оценки RR используется матрица оценок степени риска, которая включает в себя качественные/полукачественные и количественные (квантифицированные) оценки. Как правило, выделяют пять градаций событий, при этом RR изменяется от «считается, что явного риска нет» до «крайне высокой» (далее – RR5 Матрица). Важно отметить, что априори воздействие от источников угроз и рисков неявным образом рассматривается как возможное/потенциальное/вероятное.

Однако логико-исторический анализ практики в сфере ОПБ как в Беларуси, так и во всем мире показывает, что такой подход явно недостаточен, поскольку негативное воздействие на человека и биосферу глобального радиоактивного загрязнения вследствие испытаний ядерного оружия и катастроф на Чернобыльской и Фукусимской АЭС в настоящее время остаются действующей угрозой в сфере ОПБ, причем сам момент фактической реализации угрозы, которая уже стала историческим событием, находится в прошлом.

В связи с этим представляется целесообразным ввести RR5 Матрицу дополнительное событие, назовем его «состоявшимся и действующим» (вероятность 100%). При этом качественная оценка RR изменяется в том же диапазоне от «явного риска нет» до «крайне высокой», в этом случае RR5 Матрица переходит в RR6 Матрицу (таблица 2).

Количественная оценка RR вычисляется по формуле согласно [3]:

$$RR = IR \cdot LR,$$

где IR – воздействие риска;

LR – вероятность риска.

С применением расширенной RR6 Матрицы для Беларуси в случае Чернобыльской катастрофы количественную оценку степени риска можно оценить как  $RR \gg 25$ , а в случае глобального бомбового радиоактивного загрязнения, в том числе ядерной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки в 1945 году или катастрофы на Фукусимской АЭС как  $\leq 1$  (таблица 2).

Для Японии эти оценки можно представить в следующем виде: от воздействия катастрофы на Чернобыльской АЭС  $RR < 1$ , от прямого бомбового радиационного воздействия в 1945 году и после катастрофы на Фукусимской АЭС в 2011 году  $RR \gg 25$ .

**Таблица 2 – Матрица определения качественных/полукачественных и количественных (квантифицированных) оценок степени риска RR (RR6 Матрица)**

Вероятность события (LR): Баллы / %		Степень воздействия/воздействие (IR), баллы				
		Крайне высокая 5	Высокая 4	Средняя 3	Низкая 2	Ничтожная << 1
Действующее	Баллы > 5 / % 100	Крайне высокая RR >> 25	Крайне высокая RR = 20 ÷ 25	Высокая RR = 15 ÷ 19	Средняя RR = 10 ÷ 14	Низкая RR < 5
Неизбежное / крайне вероятное	Баллы 5 / % 80–99	Крайне высокая RR = 25	Высокая RR = 20 ÷ 24	Высокая RR = 15 ÷ 19	Средняя RR = 10 ÷ 14	Низкая RR < 5
Вполне вероятное	Баллы 4 / % 60–79	Высокая RR = 20	Высокая RR = 16 ÷ 19	Средняя RR = 12 ÷ 15	Низкая RR = 8 ÷ 11	Ничтожная RR < 4
Достаточно вероятное	Баллы 3 / % 20–59	Средняя RR = 15	Средняя RR = 12 ÷ 14	Низкая RR = 9 ÷ 11	Низкая RR = 6 ÷ 8	Ничтожная RR < 3
Маловероятное	Баллы 2 / % 1–19	Низкая RR = 10	Низкая RR = 8 ÷ 9	Ничтожная RR = 6 ÷ 7	Ничтожная RR = 4 ÷ 5	Считается, что явного риска нет RR < 2
Ничтожное	Баллы 1 / % < 1	Низкая RR = 5	Очень низкая RR = 4	Очень низкая RR = 3	Считается, что явного риска нет RR << 2	Считается, что явного риска нет RR << 1

Такая разница в оценке RR имеет свое объяснение на методическом уровне: при установлении контекста проблемы в части оценки уязвимости и выбора объекта защиты (элемент В) определяющую роль играют идентификация значимости угроз и рисков на национальном и региональном уровнях через обмен информацией и консультирование на уровне государственных регуляторов в сфере ОПБ (элемент А), а также на междугородном уровне, например, через Конвенцию об оперативном оповещении о ядерной аварии, которая была принята Генеральной конференцией Международного агентства по атомной энергии на ее специальной сессии 26 сентября 1986 года (далее – Конвенция). Следует обратить внимание, что Конвенция принята, в том числе, с учетом глобального масштаба последствий Чер-

нобыльской катастрофы, и является важнейшим механизмом противодействия рискам в сфере ОПБ, в том числе организационным.

Далее представляется важным описать значимость предложенного методического приема калибровки RR путем введения диапазонов для последующего ранжирования угроз по степени их опасности. С одной стороны, использование такого подхода отражает объективную сущность проблемы – вероятностный характер природы формирования и реализации угроз и рисков и вариабельность процессов в сфере ОПБ. С другой стороны, с использованием апостериорного анализа деятельности по ОПБ во время Чернобыльской катастрофы выделенные диапазоны детализируют оценки RR различных угроз и рисков при сравнении и ранжировании.

Введение диапазонов *RR* позволяет эффективно использовать метод сценарного подхода (негативный – реалистичный – благоприятный сценарий), когда на вербальном уровне можно принять, что верхняя граница диапазона соотносится с негативным сценарием, а нижняя – с благоприятным.

Используя предложенный эмпирический подход для квантифицированной оценки *RR*, появляется возможность формализации верхних и нижних границ диапазонов внутри выделенных шести градаций событий. Как следует из *RR6* Матрицы при квантификации шаг диапазонов меняется следующим образом: 5 → 4 → 3 → 2 → 1, при этом, чем более негативный сценарий рассматривается, чем большая неопределенность ситуации, тем шаг квантификации *RR* больше и, соответственно, при благоприятном сценарии, близком к ситуации определенности с минимальным воздействием шаг квантификации опускается до 1 (таблица 2). Реалистичный уровень *RR* может быть определен либо экспертным путем, либо методами машинного ранжирования (*learning of rank*), моделирования, вероятностного анализа и др.

**Идентификация и категоризация угроз и рисков, важных для ОРБ**

Идентификация и категоризация угроз и рисков в сфере ОРБ основывается на оценке их источников, характера и масштаба негативного воздействия, природе происхождения, а также социальных аспектов способов их реализации и последствий (элементы А и В в фазах I и II). Как показано выше, идентификация и категоризация угроз и рисков выполняется во временном и пространственном контексте и должна постоянно актуализироваться на национальном и региональном уровнях. Отметим, что, согласно теории риска, в рассмотрение включаются только «чистые» риски, которые являются объективным свойством сферы ОРБ.

В соответствии с элементом А в фазе I с использованием логико-исторического подхода, на основании анализа рекомендаций МАГАТЭ и МКРЗ, а также практики ОРБ в Республике Беларусь, начиная с 1945 года, в том числе в «чернобыльский», «постчернобыльский» периоды и в период строительства и эксплуатации Белорусской АЭС и иных ОИАЭ, идентифицированы основные 15 видов угроз и рисков (таблица 3), которые являются определяющими для ОРБ человека и окружающей среды и предложена схема их категоризации.

Угрозы и риски в сфере ОРБ по их основным свойствам были разделены на следующие шесть категорий:

- действующие (Д) / потенциальные (П);
- прямые /непрямые (косвенные);
- внутренние /внешние;
- радиологические (радиозоологические) /нерадиологические;
- природные (ПР) / техногенные (Т);
- производственные / социальные, в том числе, финансовые, организационные, информационные, иные.

Начнем с анализа основных действующих и потенциальных рисков и экспертной оценки их степени опасности, представленных в таблице 3, которые можно одновременно классифицировать как радиологические / радиозоологические прямые техногенные.

В общем случае, к радиологическим/радиозоологическим угрозам, важным для Беларуси, относятся прежде всего угрозы и риски, источником которых, как правило, являются объекты использования атомной/ядерной энергии (далее – ОИАЭ), или деятельность, в том числе незаконная / несанкционированная, с применением или использованием атомной энергии. Кроме того, источником радиологических угроз может служить радиоактивное загрязнение окружающей среды вследствие испытаний ядерного оружия и аварий на ОИАЭ, например известные действующие угрозы Д 1 и Д 2.

К действующим угрозам и рискам в Республике Беларусь также относятся фактические угрозы, о существовании которых известно, например 4 АЭС вокруг границ Республики Беларусь и Белорусская АЭС (Д 3, Д 4).

К потенциальным угрозам и рискам в сфере ОРБ относится планируемая деятельность с использованием ядерной энергии (П 1, П 2, П 3, П 5), которая является управляемой, когда заранее выбрана стратегия обработки рисков (снижение/минимизация, передача рисков в виде превентивных мер, например, мероприятий по аварийной готовности, страхования рисков), а также деятельность неуправляемая, например, трансграничный перенос (П 8) или несанкционированная / незаконная (П 4, П 6, П 7), причем в этом случае стратегии

обработки рисков должны включать в себя, помимо стратегий снижения / минимизации и передачи, стратегии удержания риска в случае перехода угрозы из потенциальной в действующую, как это было в случае Чернобыльской катастрофы (П 8 → Д 2).

**Таблица 3 – Действующие и потенциальные угрозы и риски в сфере ОРБ на территории Республики Беларусь**

	<b>Действующие</b>	<b>Диапазон степени риска, RR</b>
Д 1	Глобальное («бомбовое») загрязнение после применения и испытаний ядерного оружия	<1
Д 2	«Чернобыльское» загрязнение первый острый период катастрофы в ситуации аварийного облучения в ситуации существующего облучения	>> 25
		20 ÷ 25
	«Фукусимское» загрязнение	≤1
Д 3	Белорусская АЭС (первый и второй блок), хранилища РАО, другие действующие ОИАЭ	6 ÷ 14
Д 4	Чернобыльская АЭС (1977 г.), Ровенская АЭС (1980 г.), Смоленская АЭС (1982 г.), Игналинская АЭС (1983 г.)	6 ÷ 11
Д 5	ГНУ «ОИЭЯИ-СОСНЫ», пункты захоронения отходов дезактивации на «чернобыльских» территориях, КУП «Экорес» и др.	6 ÷ 11
Д 6	Источники ионизирующего излучения, используемые в организациях, действующих на территории страны	6 ÷ 11
Д 7	Обнаруженные ранее утерянные источники ионизирующего излучения (orphan source)	4 ÷ 8
	<b>Потенциальные</b>	
П 1	Планируемые к строительству ОИАЭ и объекты по обращению с РАО	4 ÷ 8
П 2	Строительство хранилищ радиоактивных отходов на промплощадках Игналинской АЭС при выводе станции из эксплуатации	4 ÷ 8
П 3	Транспортировка радиоактивных материалов через территорию Республики Беларусь	4 ÷ 5
П 4	Незаконное использование радиоактивных материалов и источников ионизирующего облучения (ИИИ)	4 ÷ 8
П 5	ИИИ, санкционированно перевозимые по территории страны	4 ÷ 5
П 6	Радиологический/ядерный терроризм	4 ÷ 8
П 7	Утерянные источники ионизирующего излучения	4 ÷ 6
П 8	Трансграничный перенос загрязняющих веществ на территорию Республики Беларусь воздушными и водными потоками, в том числе в аварийной ситуации	6 ÷ 11

Основными внешними источниками угроз и рисков в сфере ОРБ являются:

- трансграничный перенос загрязняющих веществ на территорию Республики Беларусь воздушными и водными потоками (П 8);
- международный радиологический терроризм (П 6);
- перемещение через территорию страны радиоактивных материалов, в том числе несанкционированное (П 3);
- размещение вблизи границ Беларуси крупных радиационно-опасных объектов и угроза возникновения на них ядерной или радиологической аварийной ситуации (Д 2, Д 5, П 2, П 8), например АЭС вокруг границ Республики Беларусь (рисунок 2);
- объекты хранения/захоронения ядерных отходов на сопредельных территориях (Д 5, П 2, П 8).



**Рисунок 2** – Внешние источники угроз и рисков вокруг границ Республики Беларусь (100-км зоны влияния Игналинской, Ровенской, Чернобыльской и Смоленской АЭС)

Основными внутренними источниками угроз и рисков являются [7]:

- эксплуатация Белорусской АЭС, строительство новых ОИАЭ (Д 3, П 1);

- радиоактивное загрязнение окружающей среды, в том числе вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС (Д 1, Д 2);

- незаконное использование радиоактивных материалов и ИИИ, а также утерянные источники (П 4, П 7);

- ИИИ, санкционированно перевозимые по территории страны (П 5);

- объекты захоронения радиоактивных отходов на территории страны, в том числе, ГНУ "ОИЗЯИ-СОСНЫ", пункты захоронения отходов дезактивации на «чернобыльских» территориях, КУП «Экорес», пункты захоронения отходов дезактивации на территориях «чернобыльского» загрязнения и др. (Д 5).

Продолжим анализ угроз и рисков в сфере ОРБ, среди которых важны природные и техногенные угрозы и риски, как это показано в таблице 4. К природным, в том числе, относятся угрозы и риски нерadioлогического характера, которые или создают угрозы выбросов/сбросов радиоактивных веществ в окружающую среду или усугубляют последствия реализации техногенных угроз и рисков, или создают условия для трансфера радионуклидов в биосфере (ПР 2, ПР 3, П 8), как это показано в таблице 3.

Для целей ОРБ имеют значения такие природные риски как опасные гидрометеорологические явления (ветры и ураганы, экстремальные температуры и осадки, наводнения высокий уровень грунтовых вод, природные пожары, гололед и обледенения, а также молнии и сопровождающее их сильное электромагнитное излучение) и сейсмические явления (землетрясения, обвалы, просадки и оседания грунта), которые могут воздействовать на целостность и надежность защитных конструкций и функционирование вспомогательных систем и коммуникаций на ядерно- и радиационно-опасных объектах (ПР 2). Примером такого воздействия может служить катастрофа на Фукусимской АЭС в 2011 году (Д 2 + ПР 2), для которой источником реализованных угроз и рисков стало природное явление сейсмического характера – цунами.

Другим примером природных рисков гидрометеорологического характера являются явления, способствующие возрастанию радиоактивного загрязнения в отдельных элементах окружающей среды, в том числе в почвах или донных отложениях.

Геофизические явления могут иметь значение с точки зрения повышения дозы естественной облучения от ПРФ, например, повышение удельной активности радионуклидов «космического генезиса» (бериллия-7, углерода-14, трития и др.) вследствие увеличения солнечной активности. Также можно говорить об увеличении удельной активности радионуклидов «террогенного генезиса» (радионуклидов уран-ториевого ряда, в первую очередь радона-226 в почвенном воздухе, например вследствие увеличения сейсмической активности).

Следует отметить, что в выделенных категориях рисков отсутствует свойство взаимной компенсации последствий и ущербов при их воздействии, напротив, возможно усугубление при их одновременном присутствии. Можно отметить закономерность: чем большее количество чистых рисков или категорий чистых рисков будет оказывать влияние на процессы изменения радиационной обстановки, тем более будет усугубляться негативные последствия для объектов радиационной защиты.

#### **Общий алгоритм управления рисками в сфере ОРБ**

Для достижения целей ОРБ при аварийном облучении или при угрозе его возникновения, а так же в условиях ситуации существующего облучения возникает необходимость перевода ситуации риска / ситуации неопределенности в стадию ситуации достоверности, что требует, как это показано выше, достаточного объема информации надлежащего состава и качества, а также выбора стратегии обработки риска и ее последующей реализации.

Предлагаемый общий алгоритм управления рисками основывается на адаптированных к сфере ОРБ подходах, описанных выше и представленных в виде основных элементов (А–F), которые, в том числе, предусматривают выбор стратегии обработки риска.

Таблица 4 – Природные и техногенные угрозы и риски в сфере ОРБ на территории Республики Беларусь

	Источник угрозы (опасности)	Угроза (опасность)	Риски (ущербы)	
			Прагматический подход	Комплексный биосферный подход
<b>Природные риски</b>				
ПР 1	Естественная радиоактивность в окружающей среде	Облучение от ПРФ	Дозовые нагрузки на население от ПРФ (учитываются как фоновые)	отсутствуют
ПР 2	Природные явления, в т. ч. стихийные бедствия, с созданием ЧС природного характера: геологические, метеорологические гидрологические	Воздействие на потенциально-опасные объекты с созданием ЧС техногенного характера	Дозовые нагрузки на население	Загрязнение окружающей среды и дозовые нагрузки на биоту
ПР 3	Природные явления, в т. ч. стихийные бедствия, с созданием ЧС природного характера: геологические, метеорологические гидрологические	Воздействие на существующее радиоактивное загрязнение природной среды, создающее условия для масштабного переноса радионуклидов в окружающей среде	Дополнительные к существующим дозовые нагрузки на население	Дополнительное загрязнение окружающей среды и дозовые нагрузки на биоту
ПР 4	Метеорологические, гидрологические и иные процессы переноса вещества и энергии в окружающей среде	Воздействие на аварийное и существующее радиоактивное загрязнение природной среды, создающее условия для масштабного переноса радионуклидов в окружающей среде	Дополнительные к существующим дозовые нагрузки на население	Дополнительное загрязнение окружающей среды и дозовые нагрузки на биоту
<b>Техногенные риски</b>				
Т 1	Испытания и применение (1945 г.) ядерного оружия в окружающей среде	Поступление радиоактивных материалов в окружающую среду и их распределение по резервуарам биосферы	Дозовые нагрузки на население	Загрязнение окружающей среды и дозовые нагрузки на биоту
Т 2	Эксплуатация ядерно-опасных объектов, ОИАЭ (Д 3, Д 4, Д 5, Д 6)	Штатные (технологические) выбросы радиоактивных материалов в окружающую среду	Дозовые нагрузки на персонал, и, возможно, население	Загрязнение окружающей среды и дозовые нагрузки на биоту
Т 3	Нарушения требований обращения с ИИИ при их использовании в научных исследованиях, технологических процессах, медицине, в строительстве и т. д. (Д 5, Д 6)	Поступление радиоактивных материалов в окружающую среду и их распределение по резервуарам биосферы	Дозовые нагрузки на персонал и, возможно, население	Загрязнение окружающей среды и дозовые нагрузки на биоту
Т 4	Аварии ОИАЭ с выбросом (угрозой выброса) радиоактивных веществ (Д 3, Д 4)	Поступление радиоактивных материалов в окружающую среду и их распределение по резервуарам биосферы	Дозовые нагрузки на персонал и население	Загрязнение окружающей среды и дозовые нагрузки на биоту
Т 5	Пропажа или кража ИИИ, в т. ч. радиоактивных отходов (П 7)	Поступление радиоактивных материалов в окружающую среду и их распределение по резервуарам биосферы	Дозовые нагрузки на персонал, население	Загрязнение окружающей среды и дозовые нагрузки на биоту
Т 6	Незаконный оборот и использование радиоактивных материалов и источников ионизирующего облучения (ИИИ) (П 4)	Поступление радиоактивных материалов в окружающую среду и их распределение по резервуарам биосферы	Дозовые нагрузки на население	Загрязнение окружающей среды и дозовые нагрузки на биоту
Т 7	Аварии при транспортировке радиоактивных материалов (П 5)	Поступление радиоактивных материалов в окружающую среду и их распределение по резервуарам биосферы	Дозовые нагрузки на персонал и население	Загрязнение окружающей среды и дозовые нагрузки на биоту
Т 8	Радиологический / ядерный терроризм (П 6)	Поступление радиоактивных материалов в окружающую среду и их распределение по резервуарам биосферы	Дозовые нагрузки на население	Загрязнение окружающей среды и дозовые нагрузки на биоту

Анализ практической деятельности с использованием атомной / ядерной энергии показывает, что применительно к сфере ОРБ стратегия отказа (от деятельности), принятия и исключения риска в условиях существующей или планируемой деятельности неприменимы по определению, так как угрозы и риски возникают естественным образом, как только в процессе такой деятельности планируется и создается ОИАЭ/ИИИ как источник угроз и рисков, что само по себе является объективным свойством мира.

Механизмы управления рисками в виде необходимых действий, сформированных в блоки с указанием последовательности выполнения и действующих обратных связей, представлены в виде общего алгоритма управления рисками в сфере ОРБ (рисунок 3).

Выше подробно представлена информация по блокам I, II и III, которые соответствуют элементам А, В и F, причем последний (F) в фазе IV, реализуется в том числе через обратные связи в системе.

Согласно предложенному алгоритму, на первых этапах (блоки I, II и III) дается общая оценка уровня радиационной безопасности на основании анализа существующей и планируемой деятельности в сфере ОРБ, например, эксплуатация Белорусской АЭС и проектирование объектов хранения и захоронения РАО, выявляются уязвимые объекты и т. д. Отметим, что оценка уязвимости должна выполняться систематически с учетом результатов деятельности в сфере ОРБ, планируемой деятельности и анализа динамики угроз и рисков в фазах I и II.

С точки зрения ОРБ и обеспечения эффективного функционирования системы радиационного мониторинга наиболее интересным представляется элемент (С) и, соответственно, блок IV. Именно на этом этапе осуществляется идентификация и категоризация действующих и потенциальных угроз и рисков с оценкой диапазона степени риска RR (таблицы 2, 3 и 4).

Отметим, что для целей ОРБ можно использовать следующие стратегии обработки рисков (элемент D): снижение/минимизация, удержание и передача риска (блок V).

Стратегию «снижения риска» для ОРБ можно рассматривать как превентивные действия, которые должны обеспечиваться комплексом мер (блок VI), направленных на снижение уязвимости объектов защиты: управленческих, нормативных, административных, организационных и технических и технологических мероприятий. К таким механизмам в сфере ОРБ относится, в том числе, аварийное планирование, и в настоящее время в Республике Беларусь действует План защитных мероприятий при радиационной аварии на Белорусской атомной электростанции (Внешний аварийный план), утвержденный постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 22 марта 2018 № 211.

Особого внимания заслуживает механизм «удержания риска», который определяется, прежде всего, финансовой и социально-политической приемлемостью степени риска для страны. Финансовая приемлемость риска оценивается в каждой конкретной ситуации в конкретном временном периоде и, в свою очередь, связана с его социальной приемлемостью. Механизм «удержания риска» является основным в условиях преодоления последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС и в Беларуси и реализуется через многолетние государственные и иные программы по ликвидации и минимизации ее последствий.

Механизм «удержания риска» предполагает, что основные потери и ущербы от реализованных рисков и угроз, в данном случае, катастрофы на Чернобыльской АЭС, определены, оценены и находятся в стадии ликвидации и (или) минимизации, когда *RR* находится в диапазоне 15–20 и стремится к диапазону 10–14.

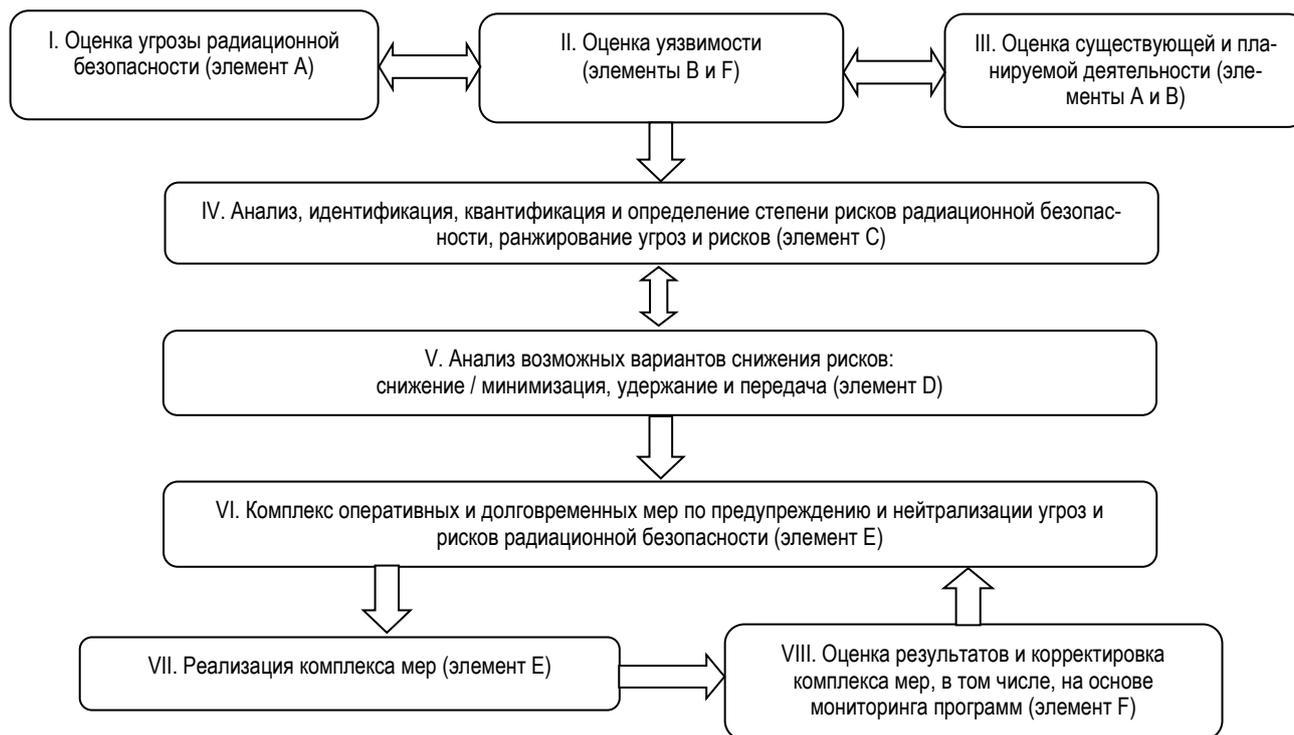


Рисунок 3 – Общий алгоритм управления рисками радиационной безопасности

Кроме того, должны быть выполнены прогнозные оценки будущих рисков, в том числе, для окружающей среды, которые могут трансформироваться в ущербы, например, увеличение территорий, загрязненных америцием-241, а также проведены оценки стоимости реализации государственных программ по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС с учетом текущих и прогнозных оценок ущербов и рисков. В такой ситуации механизм «удержания риска» должен обеспечивать негативное воздействие действующих и потенциальных угроз и рисков от идентифицированного источника – радиоактивного загрязнения окружающей среды Республики Беларусь на уровне, не большем, чем на момент начала реализации программ, при этом обеспечивая их постепенное снижение.

Финансовая приемлемость рисков обеспечивается за счет оптимизации мероприятий программ защиты в текущем периоде путем применения максимально возможной защиты, исходя из критерия ее достижимости (выполнимости) в технико-технологическом и социально-экономическом смысле. Отметим, что такой подход соответствует принципу оптимизации ALARA (as low as reasonably achievable), применяемому в практике ОРБ, которые предполагают обеспечение максимального уровня защиты, например, поддержание индивидуальных доз на возможно низком и достижимом уровне, с учетом экономических и социальных факторов и возможностей страны или ALAP, принятом в менеджменте риска, который предполагает, согласно [3], что возможность ущерба при высоких рисках должна быть снижена до того уровня, когда затраты на дальнейшее

снижение не станут «явно непропорциональными полученным преимуществам в безопасности».

Важно напомнить, что фазе IV блок VI, помимо других мер, например, мероприятий по аварийному реагированию, включает в себя систему мониторинга и прогноза радиационной обстановки в окружающей среде. Используя метод обратной связи, по результатам реализации комплекса мер (блок VII) можно оценить эффективность действующей системы ОРБ и системы радиационного мониторинга на разных этапах проводимой деятельности и корректировать ее (блоки VIII и блок VI).

Именно такие системные корректирующие действия, реализуемые в Республике Беларусь с 1987 года, позволили привести систему радиационного мониторинга окружающей среды в состояние, когда представляемая информация о радиоактивном загрязнении окружающей среды в условиях «чернобыльского» радиоактивного загрязнения, а также в условиях строительства и эксплуатации Белорусской АЭС, позволяет достичь социально приемлемого уровня ОРБ.

#### Заключение

Рассмотрены и адаптированы к сфере ОРБ общие подходы к управлению рисками, связанными с радиоактивным загрязнением окружающей среды.

Представлена адаптированная к целям ОРБ модель деятельности по обеспечению безопасности, состоящая из четырех фаз, установлены и описаны взаимосвязи между составом деятельности в различных фазах и элементами управления радиэкологическими.

Идентифицированы и описаны 15 основных действующих и потенциальных, природных и техногенных угроз и рисков применительно к сфере ОРБ Республики Беларусь.

С применением логико-исторического анализа показано, что из-за расширения деятельности за использованием ядерной энергии состав действующих и потенциальных угроз и рисков постоянно увеличивается, в связи с чем актуальность проблем в сфере ОРБ имеет устойчивую тенденцию к возрастанию. Для Республики Беларусь оценки степени риска *RR* идентифицированных на настоящее время угроз и рисков изменяются от 4 до 19.

Представлены и описаны шесть основных категорий угроз и рисков, важных для ОРБ, при этом выявлено, что социальные риски являются равнозначными наряду с остальными рисками и способствуют возникновению проблемных ситуаций.

Предложена логическая структура универсальной модели состава и качества информации в условиях реализации прагматического и комплексного биосферного подходов для задач радиационного мониторинга окружающей среды позволяет оценить источники таких неопределенности и уменьшить сами неопределенности через механизмы управления рисками в сфере ОРБ.

Разработана и предложена расширенная и калиброванная матрица оценок степени риска *RR* (*RR6* Матрица) с введением новой градации «реализованного события – действующего источника риска», в которую включены оценки верхних и нижних границ диапазонов *RR*.

Показано, что вероятностная природа рисков в сфере ОРБ отражается в уменьшении шага квантификации внутри диапазонов от большего к меньшему (5 → 4 → 3 → 2 → 1): от ситуации с высокой неопределенностью (ситуации высокого риска/негативный сценарий) к ситуации достоверности (ситуации отсутствия явного риска / благоприятный сценарий).

Научно обоснованы и описаны основные механизмы управления рисками в сфере ОРБ в виде структуры и элементов модели деятельности (А – F) и общего алгоритма управления рисками с заданными обратными связями. Показано, что стратегия «удержания риска» является основной в условиях преодоления последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС и в Беларуси реализована через многолетние государственные и иные программы по ликвидации и минимизации ее последствий, а стратегия «минимизации риска» рассматривается как превентивные действия, например, План защитных мероприятий при радиационной аварии на Белорусской атомной электростанции.

Полученные результаты будут использованы для комплексной оценки риска и повышения социальной приемлемости уровня ОРБ человека и объектов окружающей среды через совершенствование механизмов управления рисками, в том числе путем мониторинга и прогноза радиационной обстановки в окружающей среде и создания программно-аппаратного комплекса для:

- формирования реестра рисков в сфере ОРБ для их последующей обработки и ранжирования;
- мониторинга радиационной обстановки, в том числе с использованием технических систем (АСКРО и др.);
- прогноза радиационной обстановки при различных типах ситуаций облучения и сценариев реализации рисков.

*Работа выполнена в рамках задания НИР 1 «Оценка и прогноз радиоактивного загрязнения окружающей среды вокруг радиационно опасных объектов на основе экспериментальных и расчетных методов (моделирование)» в рамках задания 3.05 «Развитие информационного и методического обеспечения мониторинга, аудита, сертификации и реабилитации природно-территориальных комплексов», №ГР20211720 подпрограммы «Радиация и биологические системы» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы.*

#### Список цитируемых источников

1. Международный стандарт ISO 31000:2018 «Risk management – Guidelines» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/ru/iso-31000-risk-management.html>. – Дата доступа: 15.02.2024.

2. «General Safety Guide No. GSG-10 IAEA Safety Standards for Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1819\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1819_web.pdf). – Дата доступа: 15.02.2024
3. Менеджмент риска. Техники оценки риска : СТБ IEC 31010-2022. – Введ. 01.08.2023. – Минск : Госстандарт, 2023. – 116 с.
4. Руководящие принципы мониторинга и оценки трансграничных озер. Рабочая группа Европейской экономической комиссии по мониторингу и оценке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://unece.org/DAM/env/water/publications/assessment/Lakesguidelines\\_A\\_B\\_russian.pdf](https://unece.org/DAM/env/water/publications/assessment/Lakesguidelines_A_B_russian.pdf). – Дата доступа: 15.02.2024.
5. О радиационной безопасности [Электронный ресурс] : Закон Республики Беларусь от 18.06.2019 N 198-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 26.06.2019, 2/2636. – Режим доступа: [https://pravo.by/upload/docs/op/H11900198\\_1561496400.pdf](https://pravo.by/upload/docs/op/H11900198_1561496400.pdf). – Дата доступа: 15.02.2024.
6. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. «Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты» / IAEA – SPI/PUB/1290: IAEA, VIENNA, 2007. – 303 p.
7. Герменчук, М. Г. Научные основы радиационного мониторинга окружающей среды и роль гидрометеорологической службы в его организации на примере катастрофы на ЧАЭС / М. Г. Герменчук, О. М. Жукова // Экологический вестник. – Минск : МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, 2014. – № 4. – С. 12–25.
8. Герменчук, М. Г. Радиационный мониторинг окружающей среды : учебное пособие / М. Г. Герменчук. – Минск : Вышэйшая школа, 2021. – 278 с.
9. Сосунова, И. А. Методология и методы современной социальной экологии / И. А. Сосунова. – М. : МНЭПУ, 2010. – 400 с.

#### References

1. Mezhdunarodnyj standart ISO 31000:2018 «Risk management – Guidelines» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.iso.org/ru/iso-31000-risk-management.html>. – Data dostupa: 15.02.2024.
2. «General Safety Guide No. GSG-10 IAEA Safety Standards for Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1819\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1819_web.pdf). – Data dostupa: 15.02.2024
3. Menedzhment riska. Tekhniki ocenki riska : STB IEC 31010-2022. – Vved. 01.08.2023. – Minsk : Gosstandart, 2023. – 116 s.
4. Rukovodyashchie principy monitoringa i ocenki transgranichnyh ozer. Rabochaya gruppa Evropejskoj ekonomicheskoj komissii po monitoringu i ocenke [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [https://unece.org/DAM/env/water/publications/assessment/Lakesguidelines\\_A\\_B\\_russian.pdf](https://unece.org/DAM/env/water/publications/assessment/Lakesguidelines_A_B_russian.pdf). – Data dostupa: 15.02.2024.
5. O radiacionnoj bezopasnosti [Elektronnyj resurs] : Zakon Respubliki Belarus' ot 18.06.2019 N 198-Z // Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus', 26.06.2019, 2/2636. – Rezhim dostupa: [https://pravo.by/upload/docs/op/H11900198\\_1561496400.pdf](https://pravo.by/upload/docs/op/H11900198_1561496400.pdf). – Data dostupa: 15.02.2024.
6. Glossarij MAGATE po voprosam bezopasnosti. «Terminologiya, ispol'zuemaya v oblasti yadernoj bezopasnosti i radiacionnoj zashchity» / IAEA – SPI/PUB/1290: IAEA, VIENNA, 2007. – 303 p.
7. Germenchuk, M. G. Nauchnye osnovy radiacionnogo monitoringa okruzhayushchej sredy i rol' gidrometeorologicheskoy sluzhby v ego organizacii na primere katastrofy na CHAES / M. G. Germenchuk, O. M. Zhukova // Ekologicheskij vestnik. – Minsk : MGEI im. A. D. Saharova BGU, 2014. – № 4. – S. 12–25.
8. Germenchuk, M. G. Radiacionnyj monitoring okruzhayushchej sredy : uchebnoe posobie / M. G. Germenchuk. – Minsk : Vyshejschaya shkola, 2021. – 278 s.
9. Sosunova, I. A. Metodologiya i metody sovremennoj social'noj ekologii / I. A. Sosunova. – M. : MNEPU, 2010. – 400 s.

*Материал поступил 12.03.2024, одобрен 18.03.2024, принят к публикации 18.03.2024*

УДК 334.021

## СОЦИАЛЬНЫЙ КАПИТАЛ УНИВЕРСИТЕТОВ КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ТРОЙНОЙ СПИРАЛИ\*

**В. А. Клименко<sup>1</sup>, Н. А. Мотько<sup>2</sup>, В. А. Казанцева<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Д. социол. н., профессор, советник Исполнительный комитет СНГ, Минск, Беларусь, e-mail: vak\_@tut.by

<sup>2</sup> Старший преподаватель кафедры «Экономика и право» УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: motko\_n@mail.ru

<sup>3</sup> Студент УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: v.kazantsava@yandex.by

### Реферат

В статье раскрывается значение социального капитала университетов как фактора развития их взаимодействия с промышленными предприятиями на основе модели тройной спирали в контексте современной технологической модернизации, выявляются экономические противоречия этого процесса и роль государства в их преодолении.

**Ключевые слова:** технологическая модернизация, модель тройной спирали, университеты, промышленные предприятия, социальный капитал, инновационное развитие.

## THE SOCIAL CAPITAL OF UNIVERSITIES AS A FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF THEIR INTERACTION WITH INDUSTRIAL ENTERPRISES BASED ON THE TRIPLE HELIX MODEL

**V. A. Klimenko, N. A. Matsko, V. A. Kazantsava**

### Abstract

The article reveals the importance of the social capital of universities as a factor in the development of their interaction with industrial enterprises based on the triple helix model in the context of modern technological modernization, discovers the economic contradictions of this process and the role of the state in overcoming them.

**Keywords:** technological modernization, triple helix model, universities, industrial enterprises, social capital, innovative development.

### Введение

В настоящее время национальные экономики сталкиваются с такими процессами, как усиление влияния глобализации, переход к инновационной цифровой экономике, повышение открытости экономических систем и усиление конкурентоспособности, особенно в области высоких технологий. Под влиянием данных процессов обостряется необходимость реформирования системы мирового и национального хозяйствования и формирования новых моделей инновационного развития. Один из подходов построения инновационной экономической системы и заключается во взаимодействии университетов, предприятий и государства, т. е. модели тройной спирали. Г. Ицкович, объясняя необходимость перехода к модели тройной спирали, справедливо подчеркивает: «Если раньше путь от открытий до технологических прорывов занимал целые поколения, то сейчас этот цикл происходит в сроки, позволяющие изобретателям участвовать как в исследовательском процессе, так и на этапе внедрения инноваций. Это явление – главный аргумент для более глубокого вовлечения институтов, генерирующих знания, в инновационный процесс» [1, с. 23]. Тезис тройной спирали заключается в том, что потенциал инноваций и экономического развития в обществе знаний заключается в более заметной роли университета и в объединении университета, промышленности и правительства для создания новых институциональных и социальных форматов для производства, передачи и применения знаний. На начальном этапе генерации знаний взаимодействуют власть и научные организации, затем в ходе трансфера технологий они сотрудничают с бизнесом, а на рынок продукт выводится совместно с властью и бизнесом.

Социальный капитал представляет собой специфическую форму капитала. В отличие от экономического капитала, который по справедливому утверждению П. Бурдьё, «образует основу всех других форм капитала. И хотя последние полностью к нему не сводятся, они оказывают свое воздействие лишь в той мере, в какой скрывают наличие в своей основе экономического капитала, которые желает

оставаться неузнанным» [2, р. 106]. В соответствии с этим подходом, значение социального капитала университетов как фактора развития их взаимодействия с промышленными предприятиями на основе модели тройной спирали в контексте современной технологической модернизации должно рассматриваться, прежде всего, через призму получения дополнительных положительных экономических эффектов от названного взаимодействия. При этом необходимо учитывать, что точная количественная оценка влияния социального капитала университетов на их взаимодействие с промышленными предприятиями невозможна. Вместе с тем эта зависимость однозначно существует, но проявляется не как жесткая детерминационная связь, а как синергетическое явление. И дело здесь в специфике социального капитала.

### Социальный капитал в контексте развития взаимодействия университетов и промышленных предприятий на основе модели тройной спирали: понятие и сущность

Актуализация такого сложного социально-экономического феномена в экономической науке как доверие начинается по второй половине прошлого века и во многом связано с введением в научный оборот категории «социальный капитал». Этот процесс неразрывно связан с П. Бурдьё, Дж. Коулманом, представителями кембриджской и оксфордской экономических школ, многими другими западными исследователями. Советские, а позднее и постсоветские, экономисты по целому комплексу причин долгое время не исследовали эту категорию. В СССР и восточно-европейских социалистических странах это было связано с тем, что понятие социального капитала не вписывалось в закостеневшую советскую политическую экономию брежневской эпохи. В постсоветский период (в 1990-е гг.) научное сообщество было настолько занято освоением упрощенных догм рыночной экономики, что попросту не обратило внимание на сложную институциональную природу развитых рынков.

Р. Патнем определил социальный капитал как «характеристики социальной жизни – сети, нормы и доверие, – которые побуждают участников к более эффективному совместному действию по достижению общих целей» [3, р. 66]. По существу, здесь речь идет о том, что взаимное доверие позволяет значительно экономить транзакционные издержки и таким образом повышает экономическую эффективность множества хозяйственных взаимодействий. Российский экономист В. В. Радаев, внесший значительный вклад в выявление феноменологической природы социального капитала, пишет: «...формируют (социальный капитал – прим. авт.) сети социальных связей, которые используются для транслирования информации, экономии ресурсов, взаимного обучения правилам поведения, формирования репутаций. На основе социальных сетей, которые часто имеют тенденцию к относительной замкнутости, складывается институциональная основа социального капитала – принадлежность к определенному социальному кругу, или членство в группе» [4, с. 27]. П. Бурдьё, говоря об особенностях социального капитала, указывал, что межсубъектные взаимодействия в рамках этой формы капитала являются «необходимыми и выбранными, которые предполагают длительные субъективно-эмоциональные обязательства (чувства благодарности, уважения, дружбы и т. д.)» [5, р. 249–250].

Избирательный характер названного взаимодействия, характерный для социального капитала, а также его неравномерное распределение между университетами, промышленными предприятиями, взаимодействующими с этими университетами и бизнес-структурами, позволяет увидеть механизмы и значение социального капитала университетов как фактора развития их взаимодействия с промышленными предприятиями на основе модели тройной спирали в контексте современной технологической модернизации.

Пальма первенства в исследовании категории социального капитала в Республике Беларусь принадлежит С. Ю. Солодовникову. Им дается следующее определение этому феномену: «Социальный капитал – это сумма выгод, получаемых субъектами от взаимных определенных информационных действий (как совокупности межличностных отношений, снижающих транзакционные издержки) с целью взаимовыгодного сотрудничества, достигаемого путем информационного обмена и позволяющих получить осязаемую социально-экономическую выгоду» [6, с. 43]. Названный автор также сумел доказать, что «по критерию экономической эффективности социальный капитал может быть сопоставим только с такими факторами производства как человеческий капитал и наука» [7, с. 10]. При этом рассмотрение способов накопления социального потенциала и механизмов его капитализации позволило С. Ю. Солодовникову сделать вывод, имеющий существенное значение для нашего исследования, о том, что «самый важный фактор накопления социального капитала – образование. Указанная переменная значима во всех возможных измерениях социального капитала. Организация местных сообществ, посещение церкви, уровень доверия, восприятие честности – все эти зависимые переменные зависят от уровня образования индивида в большей степени, чем каким-либо от других факторов» [7, с. 10]. Последнее соображение позволяет сделать вывод, что в рамках концепции тройной спирали университеты обладают значительными преимуществами по сравнению с другими субъектами по возможностям быстрого наращивания социального капитала и, соответственно, по условиям для его последующего превращения в финансовый капитал. Это связано с тем, что очень значительная доля руководящих и инженерных кадров промышленных предприятий учились именно в тех университетах, с которыми в последующем они взаимодействуют в рамках реализации модели тройной спирали. По справедливому замечанию С. Ю. Солодовникова, «...уровень образования является основной переменной, определяющей накопление социального капитала и, следовательно, набор институциональных альтернатив, доступных каждому обществу...» [8, с. 34]. Действительно, именно в университете происходит рост социального потенциала, который в дальнейшей трудовой деятельности может быть капитализирован. За время учебы в университете у выпускников не только формируется уважение к университету в целом, но и профессиональная солидарность и взаимопонимание со своими однокурсниками (будущими друзьями, коллегами и деловыми партнерами), уважение к своим учителям, а также выра-

батывается лучшее представление о том, как усовершенствовать учебный процесс в университете, что может дать университетская наука производству, что и как здесь можно улучшить. Выпускники университетов больше склонны оказывать спонсорскую и иную помощь вузу, в котором учились, больше доверяют его преподавателям и руководителям, некоторые из них могли быть в прошлом и их однокурсниками, чем иным университетам.

Рациональная и качественная организация системы образования (что также подразумевает организацию взаимодействия с предприятиями, в том числе, и промышленными в рамках модели тройной спирали), в свою очередь, служит основой для устойчивого экономического развития страны и международных отношений. Как подчеркивают В. А. Скворцова и Л. Е. Шарыпина, «ключевая роль образования и знаний в экономическом развитии общества объясняется вступлением экономики в инновационную стадию развития, которая характеризуется наукоемкостью и новым структурированием производства, в связи с чем, образовательная деятельность становится важной компонентой экономического развития» [9, с. 566]. Человеческий капитал, под которым, согласно Т. Шульцу, понимаются приобретенные человеком ценные качества, которые могут быть усилены соответствующими вложениями [10], является основным фактором производства и экономического роста страны, а, как справедливо замечает В. В. Богатырева, «важнейшим фактором роста человеческого капитала является повышение образования его носителя» [11, с. 222].

### Социальный капитал как способ конкурентной борьбы

Для раскрытия значения социального капитала университетов как фактора развития их взаимодействия с промышленными предприятиями на основе модели тройной спирали в контексте современной технологической модернизации важным является и то обстоятельство, что социальный капитал хозяйствующими субъектами используется не только для сокращения производственных издержек в процессе экономической деятельности, но и в конкурентной борьбе, в том числе и для причинения репутационного и иного ущерба своим конкурентам. В таком случае действие социального капитала может быть направлено не на рост производительности общественного труда, а на подрыв экономического потенциала конкурентов. В рамках названной логики представляет определенный исследовательский интерес следующее замечание С. Ю. Солодовникова по поводу особенностей социального капитала: «Специфическим свойством социального капитала является то, что его совокупное количество в обществе не является суммой "социальных капиталов" всех его субъектов. Это происходит не только потому, что существуют некоторые проявления социального капитала только на уровне всего социума, но и в связи с тем, что этот капитал социально-классовыми и хозяйственными субъектами может использоваться (и используется) не только на благо всего общества (или в производственных целях), но и с целью эгональной оптимизации своей социально-экономической жизни, что вступает в противоречие с интересами других классов и групп, государства и социума» [8, с. 32].

Таким образом, представляется правомерным вывод, что социальный капитал университетов как фактор развития их взаимодействия с промышленными предприятиями на основе модели тройной спирали в контексте современной технологической модернизации обладает двойственной политико-экономической природой. В случае, когда исследователи этого явления рассматривают идеальную модель этого взаимодействия как союз между властью, бизнесом и университетом, которые являются ключевыми элементами инновационной системы любой страны, то картина представляется предельно простой, не замечающей тех реальных внутренних экономических и политико-экономических противоречий, которые характерны для протекания всех социально-экономических процессов в обществе.

### Заключение

Тезис о союзе между властью, бизнесом и университетом, воплощенном в тройной спирали, кажется бесспорным только в том случае, когда мы рассматриваем это явление вне реального исторического контекста. Во-первых, без учета конкуренции между университетами и бизнесом за государственную поддержку. Это явление хорошо описано экономистами в рамках теории поиска ренты [12, 13].

Дж. М. Бьюкенен характеризует поиск ренты как понятие, используемое для «описания поведения в институциональной среде, где индивидуальные усилия максимизировать ценность порождают общественные потери, а не прибавку для общества» [14, р. 4]. Г. Таллоку отмечает: «Поиск ренты: использование ресурсов с целью получения ренты, где рента проистекает из нечто такого, что имеет негативную общественную ценность» [15, р. 79]. П. А. Янович так резюмировал результаты своих исследований экономических воззрений на теорию поиска ренты: «Во всех определениях присутствует указание на затраты, которые понесло общество, вместо выгод, которые оно могло бы иметь, в случае, если ресурсы, использованные на получение ренты, были бы применены производительно» [16, с. 88]; во-вторых без учета конкуренции между университетами за получение экономических преимуществ при сотрудничестве с бизнесом вообще и промышленными предприятиями в частности; в-третьих, без учета конкуренции бизнеса с бизнесом за получение экономических преимуществ при сотрудничестве с университетами и промышленными предприятиями; в-четвертых, без учета того, что бизнес всегда стремится к максимизации прибыли, а это может быть достигнуто как за счет роста производительности труда и экономической эффективности (игра с ненулевым результатом), так и за счет уменьшения доходов контрагентов, например, университетов (игра с нулевым результатом).

В реальных экономических системах для повышения позитивного значения (т. е. такого, которое будет способствовать росту общественного и индивидуального благосостояния) социального капитала университетов как фактора развития их взаимодействия с промышленными предприятиями на основе модели тройной спирали в контексте современной технологической модернизации необходима активная роль государства в направлении опережающего роста социального прогресса в обществе, сопровождаемого увеличением социальной ответственности бизнеса. В противном случае действие названного фактора может вести к негативным для инновационного развития страны и общественного благополучия последствиям, причем последнее не исключает роста прибыли бизнеса на фоне технологической стагнации промышленных предприятий и отставания университетов от требований научно-технической революции.

\* Работа выполнена при поддержке БРФФИ (договор с БРФФИ № G21MH-002 от 01.07.2021 г.).

#### Список цитированных источников

- Ицковиц, Г. Тройная спираль. Университеты – предприятия – государство. Инновации в действии / Г. Ицковиц. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэл., 2010. – 238 с.
- Bourdieu, P. The Forms of Capital / P. Bourdieu. – New York : Greenwood Press, 1986.
- Putnam, R. Who Killed Civic America? / R. Putnam // Prospect. – March, 1996.
- Радаев, В. В. Понятие капитала, формы капиталов и их конвертация / В. В. Радаев // Экономическая социология. – 2002. – № 2.
- Bourdieu, P. Forms of Capital / P. Bourdieu. – Handbook of Theory and Research for the Sociology of Education / Ed. by J. G. Richardson. – N. Y., 1983.
- Солодовников, С. Ю. Политико-экономический анализ влияния социального капитала на экономическую безопасность в контексте экономики рисков / С. Ю. Солодовников // Вестник Института экономики НАН Беларуси. – 2020. – Вып. 1. – С. 40–49.
- Солодовников, С. Ю. Перспективы и механизмы развития и капитализации социального потенциала Республики Беларусь / С. Ю. Солодовников // Экономическая наука сегодня. – 2013. – Вып. 1. – С. 5–33.
- Солодовников, С. Ю. Социальный капитал как фактор экономического роста / С. Ю. Солодовников // Экономика и банки. – 2015. – № 1. – С. 32–41.
- Скворцова, В. А. Роль образования в экономике: становление системы категорий / В. А. Скворцова, Л. Е. Шарыпина // Известия ПГПУ им. В. Г. Белинского. – 2012. – № 28. – С. 566–568.
- Шульц, Т. Инвестиции в человеческий капитал / Т. Шульц. – М. : Изд-во ВШЭ, 2012. – 522 с.
- Богатырева, В. В. Управление человеческим капиталом в инновационной экономике / В. В. Богатырева // ЭВД. – 2013. – № 1. – С. 221–235.
- Клименко, В. А. Теория поиска ренты: теоретическое осмысление / В. А. Клименко, Ю. В. Карпович // Экономическая наука сегодня. – 2020. – Вып. 11. – С. 37–42.
- Клименко, В. А. Гносеологический потенциал теории поиска ренты / В. А. Клименко, Ю. В. Карпович // Право. Экономика. Психология. – 2020. – № 4 (20). – С. 55–60.
- Buchanan, J. M. Rent Seeking and Profit Seeking / J. M. Buchanan // Toward a Theory of the Rent Seeking Society. College Station: Texas A&M University Press, 1980.
- Tullock, G. The Economics of Special Privilege and Rent Seeking / G. Tullock. – Boston & Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers 1989.
- Янович, П. А. Основы теории поиска ренты / П. А. Янович // Экономическая наука сегодня. – 2017. – Вып. 5. – С. 87–94.

#### References

- Ickovic, G. Trojnaya spiral'. Universitety – predpriyatiya – gosudarstvo. Innovacii v dejstvii / G. Ickovic. – Tomsk : Izd-vo Tomsk. gos. un-ta sistem upr. i radioel., 2010. – 238 s.
- Bourdieu, P. The Forms of Capital / P. Bourdieu. – New York : Greenwood Press, 1986.
- Putnam, R. Who Killed Civic America? / R. Putnam // Prospect. – March, 1996.
- Radaev, V. V. Ponyatie kapitala, formy kapitalov i ih konvertaciya / V. V. Radaev // Ekonomicheskaya sociologiya. – 2002. – № 2.
- Bourdieu, P. Forms of Capital / P. Bourdieu. – Handbook of Theory and Research for the Sociology of Education / Ed. by J. G. Richardson. – N. Y., 1983.
- Solodovnikov, S. Yu. Politiko-ekonomicheskij analiz vliyaniya social'nogo kapitala na ekonomicheskuyu bezopasnost' v kontekste ekonomiki riskov / S. Yu. Solodovnikov // Vestnik Instituta ekonomiki NAN Belarusi. – 2020. – Vyp. 1. – S. 40–49.
- Solodovnikov, S. Yu. Perspektivy i mekhanizmy razvitiya i kapitalizacii social'nogo potentsiala Respubliki Belarus' / S. YU. Solodovnikov // Ekonomicheskaya nauka segodnya. – 2013. – Vyp. 1. – S. 5–33.
- Solodovnikov, S. Yu. Social'nyj kapital kak faktor ekonomicheskogo rosta / S. Yu. Solodovnikov // Ekonomika i banki. – 2015. – № 1. – S. 32–41.
- Skvorcova, V. A. Rol' obrazovaniya v ekonomike: stanovlenie sistemy kategorij / V. A. Skvorcova, L. E. SHarypina // Izvestiya PGPU im. V. G. Belinskogo. – 2012. – № 28. – S. 566–568.
- Shul'c, T. Investicii v chelovecheskij kapital / T. SHul'c. – M. : Izd-vo VSHE, 2012. – 522 s.
- Bogatyreva, V. V. Upravlenie chelovecheskim kapitalom v innovacionnoj ekonomike / V. V. Bogatyreva // EVD. – 2013. – № 1. – S. 221–235.
- Klimenko, V. A. Teoriya poiska renty: teoreticheskoe osmyslenie / V. A. Klimenko, YU. V. Karpovich // Ekonomicheskaya nauka segodnya. – 2020. – Vyp. 11. – S. 37–42.
- Klimenko, V. A. Gnoseologicheskij potencial teorii poiska renty / V. A. Klimenko, Yu. V. Karpovich // Pravo. Ekonomika. Psihologiya. – 2020. – № 4 (20). – S. 55–60.
- Buchanan, J. M. Rent Seeking and Profit Seeking / J. M. Buchanan // Toward a Theory of the Rent Seeking Society. College Station: Texas A&M University Press, 1980.
- Tullock, G. The Economics of Special Privilege and Rent Seeking / G. Tullock. – Boston & Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers 1989.
- Yanovich, P. A. Osnovy teorii poiska renty / P. A. Yanovich // Ekonomicheskaya nauka segodnya. – 2017. – Vyp. 5. – S. 87–94.

Материал поступил 09.03.2023, одобрен 15.04.2023, принят к публикации 17.04.2023

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ВОСПОЛНЕНИЯ МОРАЛЬНОГО ВРЕДА ЖИТЕЛЯМ УМНОГО ГОРОДА

Г. Л. Матюшкова<sup>1</sup>, В. А. Савонюк<sup>2</sup>, А. Л. Михняев<sup>3</sup>, О. Ю. Самолюк<sup>4</sup>, А. С. Рыжов<sup>5</sup>,  
В. В. Меленчук<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Научный сотрудник отдела технологий цифровой трансформации государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь, e-mail: matgala@tut.by

<sup>2</sup> Старший преподаватель кафедры интеллектуальных информационных технологий УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: savonuk\_va@tut.by

<sup>3</sup> Старший преподаватель кафедры интеллектуальных информационных технологий УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: mal@bstu.by

<sup>4</sup> Старший преподаватель кафедры интеллектуальных информационных технологий УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: seguardiantrue@mail.ru

<sup>5</sup> Инженер-программист 1 категории РУП «Брестское агентство по государственной регистрации и земельному кадастру», Брест, Беларусь, e-mail: sashar\_93@mail.ru

<sup>6</sup> Старший преподаватель кафедры интеллектуальных информационных технологий УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: bzzzil@gmail.com

### Реферат

В статье рассматриваются проблемы возмещения морального вреда жителям умного города и возможные пути их решения. Описываются основные трудности, связанные со сложностями её решения, как во всём мире, так и в рамках отдельных стран. Они порождаются для всех стран отсутствием формальных методов для её решения и неоднозначными подходами к охране здоровья граждан и охране окружающей среды. В отдельных странах проблема осложняется малыми доходами на душу населения и отсутствием нужных специалистов, чтобы закрывать весь комплекс вопросов. Предлагается возможное решение задачи для случая, когда моральный вред может подтверждаться документами. Вся задача предлагается решать методом мозгового штурма группой компетентных специалистов из разных областей знаний.

**Ключевые слова:** моральный вред, мозговой штурм, хакер, информационная безопасность, интернет-элементы (IoT, IIoT).

### ABOUT THE PECULIARITIES OF COMPENSATION OF MORAL DAMAGE TO THE RESIDENTS OF THE SMART CITY

G. L. Matsiushkova, V. A. Savoniuk, A. L. Mihniayeu, O. Y. Samoliuk, A. S. Ryzov, V. V. Melenchuk

### Abstract

The article deals with the problems of compensation for moral harm to residents of a smart city and possible ways to solve them. The main difficulties associated with the complexities of its solution both around the world and within individual countries are described. They are generated for all countries by the lack of formal methods for its solution and ambiguous approaches to protecting the health of citizens and protecting the environment. In some countries, the problem is complicated by low per capita incomes and the lack of the necessary specialists to cover the whole range of issues. A possible solution to the problem is proposed for the case when moral damage can be confirmed by documents. The whole task is proposed to be solved by the method of brainstorming by a group of competent specialists from different fields of knowledge.

**Keywords:** moral hazard, brainstorming, hacker, information security, internet elements (IoT, IIoT).

### Введение

Безопасность умных городов – новая актуальная тема, требующая исследования. При решении проблемы защиты умного города и его граждан кибернетикам пришлось выйти на необходимость совместного решения задачи с юристами, экономистами и врачами, так как для удовлетворительного решения задачи в рамках одного государства из-за её неформализуемости и расхождений в доходах, иногда отличающихся на несколько порядков, напрашивается метод мозгового штурма рядом опытных специалистов.

Информационная безопасность в системе государственной и муниципальной службы при реализации системы «Умный город» приобретает важное значение [1, 2]. Отчасти это вызвано обеспечением улучшения условий жизни населения в аспектах экологии, медобслуживания, правовых средств и комфортной жизни. Новые технологии способствуют развитию и реализации умных городов. Одна из них – «интернет вещей». Наиболее очевидным и популярным применением этой технологии стал дистанционный мониторинг здоровья или телемедицина. В случаях, когда пациентам нет необходимости посещать учреждения здравоохранения или лечащего врача, данная технология является крайне эффективной. Вместо медицинских работников работу в данном случае выполняют умные устройства совместно с различными приложениями. Врачи используют удаленный мониторинг для получения более полной информации о здоровье пациентов.

Еще одним вариантом применения данной технологии является контроль за медицинским оборудованием. Аппараты жизнеобеспечения, как электроприборы, подвержены рискам перебоев электропитания, а также полного отказа системы в связи с выходом из строя отдельных частей, что оказывает существенную угрозу жизни пациента. Для решения данной проблемы Philips разработала систему e-Alert. Для предотвращения подобных рисков система прогнозирует возможные поломки и оповещает медицинский персонал о возможных неисправностях.

Обеспечение безопасности – одна из задач любого учреждения здравоохранения. В лечебных учреждениях, расположенных в нескольких корпусах, в том числе имеющих отделения в других городах или странах для данных целей используются системы определения местоположения в режиме реального времени [3].

В настоящее время возникает множество проблем при доказывании вреда, причиненного техническими устройствами [4]. Пациент может восстановить свои нарушенные права только из-за неудачных действий врачей, а также получить за это выплаты. Внедрение в медицину роботизированных машин вызовет корректировку законодательства в области регулирования ответственности за причинение вреда техническими устройствами.

Появление умных бытовых приборов, управляемых дистанционно, и аналогичных приборов на предприятиях (индустриальный ин-

тернет) резко повысили число точек искажения и кражи информации хакерами. Появилась ещё одна проблема поиска дистанционных нарушителей, занимающихся кражей и искажением данных.

### Обоснование необходимости задачи и проект её частичного решения

Сложность задачи состоит в том, что моральный вред необходимо оценить в деньгах и справедливо с позиций обиженного и общества, а это можно сделать при чётких нормативах для судей. О фактах больших расхождений их решений Ирина Фаст в своём капитальном исследовании о компенсации морального вреда при причинении вреда жизни и здоровью человека, где она проанализировала несколько тысяч судебных дел по регионам Российской Федерации (РФ) и привела убедительную статистику, когда по близким вопросам суммы в решениях отличались в 10, 50 и более раз, поэтому она как адвокат по моральному праву и гражданин высказалась за разработку чётких нормативов для судей. Научная юридическая литература по вопросу определения разумности и справедливости компенсации морального вреда скудна, и доктрина не предлагает здесь единого мнения. Более того в РФ иногда даже среди судей высказываются мнения об отказе от необходимости её решения. Например, кандидат юридических наук Г. В. Смирнская полагает, что идея введения методики определения компенсации морального вреда является несостоятельной. Поэтому пока предлагается в качестве частичного решения остановиться на случаях, когда моральный вред по текущему состоянию дел может иметь документальное обоснование.

Предлагается за ключевую точку выбрать стоимость жизни человека в данной стране, исходя из её финансовых возможностей. Например, максимальная сумма в авариях со смертельным исходом. На практике, в зависимости от ВВП государства, эти суммы даже в подписанных международных конвенциях за гибель авиопассажира отличаются в разы (по Монреальской – 2000 долларов, по Варшавской – 1000 долларов). Эта сумма одновременно должна ограничивать и возмещение любого морального вреда, который также ограничивается ею сверху. Продемонстрируем это на примере данных из судебной практики и законов РФ на базе материалов из аналитических исследований Ирины Фаст. Одновременно отметим некоторый перегиб в них в пользу человека без учёта возможностей состояния экономики государства. Предлагаемая система резко ограничивает произвол судей (разбегка в суммах компенсаций в разы), но даёт возможность сделать за счёт учёта конкретных обстоятельств поправку конкретно вычисленной суммы до 10 % меньше или больше. Назначение верхнего предела позволяет снять таинство компенсаций при их назначении за вред репутации, упущенную выгоду и т. п. Отметим, что важные шаги в этом направлении предлагались уже давно в работах доктора юридических наук А. М. Эрделевского [5], но из-за сложности системы не нашли применения в юридической практике РФ.

Пока остановимся на позициях морального вреда, имеющих объективную документальную основу по причиненному вреду при наличии оснований (врачебных и иных документов).

Причиненный вред разобьём на две части:

- вред жизни (смертельный исход);
- вред здоровью (с документальными доказательствами).

В первом случае получателями компенсации морального вреда являются родственники пострадавшего (погибшего) в объёме 4 млн руб. (максимальная выплата – М), во втором случае и далее – сам пострадавший.

Далее рассматриваются три возможные степени причинения вреда здоровью согласно постановлению Правительства РФ от 17.08.2007 № 522 «Об утверждении Правил определения степени тяжести вреда, причиненного здоровью человека».

Тяжкий вред здоровью:

- вред, опасный для жизни человека  $0,8 \times M$ ;
- потеря зрения, речи, слуха либо какого-либо органа или утрата органом его функций  $0,7 \times M$ ;
- прерывание беременности и далее  $0,65 \times M$ ;
- психическое расстройство;

- заболевание наркоманией либо токсикоманией;
- неизгладимое обезображивание лица;
- значительная стойкая утрата общей трудоспособности не менее чем на одну треть;
- полная утрата профессиональной трудоспособности все –  $0,65 \times M$ .
- Вред здоровью средней тяжести:
- длительное расстройство здоровья –  $0,6 \times M$ ;
- значительная стойкая утрата общей трудоспособности – не менее чем на одну треть.
- Легкий вред здоровью:
- кратковременное расстройство здоровья  $0,2 \times M$ ;
- незначительная стойкая утрата общей трудоспособности  $0,2 \times M$ .

Однако остаётся без решения вопрос о назначении денежной компенсации для морального вреда без возможности опоры для отыскания его денежного размера. Предлагается его ликвидировать с учётом имеющихся разработок по анализу практической деятельности судов России и Беларуси. В частности, интересны предложения кандидата юридических наук Е. В. Мосиной, которая предложила ряд документов с готовыми образцами текстов: приложение № 1. Соглашение о компенсации морального вреда, приложение № 2. Виды критериев определения размеров компенсации морального вреда, приложение № 3. Размеры требуемой и присуждаемой компенсации морального вреда [6].

Интересны предложения адвоката по моральному праву Ирины Фаст из РФ исчислять сумму за моральный вред (её размер) в минимальных зарплатах, чтобы избежать поправок на инфляцию в судебной практике. Полезна также её аналитическая работа, подтверждающая необходимость улучшения законов.

Собранные Ириной Фаст данные показывают размеры присужденных компенсаций морального вреда по 2236 делам, среди которых 1653 дела со смертельным исходом, где моральный вред взыскивался в пользу родственников, 256 дел, где здоровью пострадавшего был причинен тяжкий вред, 266 дел, где пострадавший получил вред здоровью средней тяжести и 61 дело с легким вредом здоровью пострадавшего. Предлагаемый вариант в какой-то мере исправляет ситуацию.

Однако ответ на вопрос о справедливости предлагаемых решений остаётся, так как понятие юристами толкуется двояко: для выбора пути разумности и справедливости необходимо сначала разграничить два подхода к компенсации морального вреда. В чём цель компенсации: 1) обеспечить комфорт и утешение или же 2) компенсировать утраченную ценность? Хотя данные подходы характерны для системы общего права (Канада, Великобритания), они описывают именно ту дилемму, которая возникает вокруг компенсации морального вреда.

Первый подход – это так называемый функциональный подход («functional» approach), согласно которому компенсация морального вреда (его сумма) предназначена для обеспечения комфорта и утешения потерпевшему с тем, чтобы он смог заменить свою потерю, а вовсе не для того, чтобы компенсировать сам вред, поскольку это невозможно. Например, такой подход был принят в Канаде, так как в ближайшее время возможностей прорыва в создании методов оценки морального вреда не ожидается, а жизнь требует решения задачи, остаётся пока для её решения метод мозгового штурма.

Второй подход – установление размера вреда на основе степени «потери ценности» («diminution of value»), согласно которому цель компенсации – придать ценность (оценить) понесенной потерпевшим потере, независимо от того, как / на что он потратит присужденную компенсацию.

Такой подход связывает выплаты с фактическими обстоятельствами (концептуальная составляющая), в частности, с тяжестью причинённого вреда, с одной стороны, а также с индивидуальными особенностями личности (индивидуальная / личностная составляющая) – с другой.

Отметим, что в сложившейся практике в РФ и Республике Беларусь (РБ) используется первый подход и предлагаемый вариант относится к нему.

### Заключение

Наиболее сложной частью для выработки предложений являются по состоянию дел на сегодня такие позиции, как моральный вред, влияние на имидж человека, разглашение семейной и личной тайны, упущенной выгоды и т. п.

Характерной чертой для них является невозможность в принципе собрать доказательную базу, чтобы вычислить вред в деньгах. С ростом числа символов кодовой последовательности увеличивается скорость передачи информации, однако это увеличение конструктивно ограничивается шириной полосы пропускания частот радиосигналов оборудования системы связи [7]. Решение задачи может идти с привлечением юристов, финансистов, врачей и кибернетиков (все должны иметь опыт практической работы: юристы по рассмотрению аналогичных дел, финансисты в распределении средств на выплаты различных компенсаций в районе или городе, врачи в комиссиях по фиксации состояния здоровья человека, кибернетики в алгоритмизации медицинских задач. Один из методов компенсаций может идти по западному образцу: опираться на таблицы под условия РФ или РБ, но с назначением желательного для каждой позиции верхних и нижних пределов, тогда система останется свободной от больших разбежек в решении судей. Неожиданно этот вопрос стал полезным в задаче развития умных городов, в частности, при использовании переносных электронных медицинских приборов, влияние на имидж и т. д. Специфика вопроса состоит в том, что для обвинения хакера можно предъявить только электронные документы, по-видимому, встанет вопрос и о конфискации средств преступления.

В итоге отметим большую сложность решения вопроса, так как отсутствует во всех странах общепризнанный подход к её решению, но намечился общий подход к определению границ всех видов компенсаций. В частности, в США и Японии установили верхнюю границу, в Англии и Германии используют специальные таблицы, некоторые страны создали таблицы, в которых перечислены виды морального вреда с суммой компенсации по отбору членов комиссии и приданию результатов её работы силы закона.

### Список цитируемых источников

1. Цифровая безопасность умных городов / Д. Н. Панин [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2019. – № 11–1 (89). – С. 31–33.
2. Павлов, А. А. Применение информационных технологий в муниципальном управлении / А. А. Павлов // Вестник Воронежского института экономики и социального управления. – 2018. – № 2. – С. 91–94.
3. Промышленный интернет вещей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://investmoscow.ru/media/3340535/03-promyshlennyj-internet-veshchey.pdf>. – Дата доступа: 18.02.2023.
4. Манько, О. В. Гражданско – правовая ответственность за вред, причиненный роботизированными медицинскими устройствами / О. В. Манько, И. Е. Абрамова, В. Е. Кузьмина // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 6–5 (108). – С. 96–98.
5. Эрделевский, А. М. Моральный вред и компенсация за страдания / А. М. Эрделевский. – М.: Издательство ВЕК, 1998. – 188 с.
6. Мосина, Е. В. Компенсация морального вреда: трудовая правовая аспекты / Е. В. Мосина // Библиотечка журнала «Юрист». Право и бизнес. – 2009. – № 10 (34). – 68 с.
7. Матюшков, А. Л. Оценка скорости передачи информации по каналу космической связи с робототехнического комплекса, находящегося на поверхности Марса / А. Л. Матюшков, О. Ю. Войцехович, А. Л. Михняев // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2019. – № 5 : Физика, математика, информатика. – С. 35–37.

### References

1. Cifrovaya bezopasnost' umnyh gorodov / D. N. Panin [i dr.] // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. – 2019. – № 11–1 (89). – S. 31–33.
2. Pavlov, A. A. Primenenie informacionnyh tekhnologij v municipal'nom upravlenii / A. A. Pavlov // Vestnik Voronezhskogo instituta ekonomiki i social'nogo upravleniya. – 2018. – № 2. – S. 91–94.
3. Promyshlennyj internet veshchey [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://investmoscow.ru/media/3340535/03-promyshlennyj-internet-veshchey.pdf>. – Data dostupa: 18.02.2023.
4. Man'ko, O. V. Grazhdansko – pravovaya otvetstvennost' za vred, prichinennyj robotizirovannymi medicinskimi ustrojstvami / O. V. Man'ko, I. E. Abramova, V. E. Kuz'mina // Mezhdunarodnyj nauchno issledovatel'skij zhurnal. – 2021. – № 6–5 (108). – S. 96–98.
5. Erdelevskij, A. M. Moral'nyj vred i kompensaciya za stradaniya / A. M. Erdelevskij. – M.: Izdatel'stvo VEK, 1998. – 188 s.
6. Mosina, E. V. Kompensaciya moral'nogo vreda: trudopravovoj aspekt / E. V. Mosina // Bibliotечka zhurnala «YUrist». Pravo i biznes. – 2009. – № 10 (34). – 68 s.
7. Matyushkov, A. L. Ocenka skorosti peredachi informacii po kanalu kosmicheskoy svyazi s robototekhnicheskogo kompleksa, nahodyashchegosya na poverhnosti Marsa / A. L. Matyushkov, O. YU. Vojcekhovich, A. L. Mihnyaev // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2019. – № 5 : Fizika, matematika, informatika. – S. 35–37.

Материал поступил 14.03.2023, одобрен 23.05.2023, принят к публикации 22.01.2024

УДК 656.96:656.025:004:33.330.3

## КОНЪЮНКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕВОЗОК ГРУЗОВОГО ТРАНСПОРТА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Д. Н. Месник<sup>1</sup>, А. К. Ходас<sup>2</sup>

<sup>1</sup> К. э. н., доцент, доцент кафедры экономики и логистики УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: mesnikd308@gmail.com

<sup>2</sup> К. э. н., доцент, доцент кафедры экономической политики УО «Белорусский государственный экономический университет», Минск, Беларусь, e-mail: hannyshka@mail.ru

### Реферат

Главная задача грузовых перевозок состоит в доставке груза в нужное место в кратчайшие сроки выгодным маршрутом с минимальными рисками и финансовыми затратами.

Грузоперевозки эффективно применяются, используя преимущества задействованных видов транспорта, однако более полный потенциал преимуществ раскрывается, когда условия конъюнктуры рынка благоприятствуют коммерческому успеху, когда спрос и предложение, тарифы и конкуренция соответствуют позиции перевозок больших объемов грузов за относительно короткий интервал времени.

В данной статье предлагаются результаты исследования потребности в смешанных, мультимодальных, интермодальных грузовых перевозках, которая вызвана интересом экономической выгоды в получении добавленной стоимости либо достижении положительного сальдо экспорта/импорта транспортно-логистической системой Республики Беларусь.

**Ключевые слова:** экспорт, импорт, грузовые перевозки, транспорт, стоимость услуг, логистика.

## CONJUNCTURAL FEATURES OF CARGO TRANSPORTATION TRANSPORT OF THE REPUBLIC OF BELARUS

D. N. Mesnik, A. K. Khodas

### Abstract

The main task of cargo transportation is to deliver cargo to the right place in the shortest possible time by a profitable route with minimal risks and financial costs.

Cargo transportation is effectively applied using the advantages of the modes of transport involved, however, a fuller potential of advantages is revealed when market conditions favor commercial success, when demand and supply, tariffs and competition correspond to the position of transportation of large volumes of goods in a relatively short time interval. This article presents the results of a study of the need for mixed, multimodal, intermodal freight transportation, which is caused by the interest of economic benefits in obtaining added value, or achieving a positive balance of exports/imports by the transport and logistics system of the Republic of Belarus.

**Keywords:** export, import, cargo transportation, transport, cost of services, logistics.

### Введение

В настоящее время международные логистические потоки перестраиваются на новые каналы, которые ориентированы на рынки стран Индии, Турции, Ирана, Африки и СНГ. Международный транспортный коридор «Север – Юг», входящий в проект «Один пояс, один путь», вместе с сооружением евразийского транспортного каркаса позволяет значительно нивелировать для Республики Беларусь последствия высоких транспортных издержек. Логистика грузовых перевозок направлена на преодоление ряда сложностей, таких как отсутствие единого документа на перевозку груза несколькими видами транспорта; ограничение провозных либо дефицит пропускных возможностей по отдельным участкам логистической цепочки перевозок; отсутствие альтернативных вариантов по уровням развитости инфраструктурного сопровождения стран, через территории которых проложен маршрут транспортирования груза; несовершенство законодательной базы стран-участниц транспортно-логистических цепочек.

Каждому региональному каркасу свойственно образование магистральных потоков товаров, узловых транспортных переходов, точек синергетических эффектов. Международное пространство, охваченное сетью коридоров по перевозкам грузов разными видами транспорта, образует структурный каркас региональных сообщений между странами (рисунок 1). Происходящие сегодня изменения в геополитике, в перестроении логистических потоков участниками внешнеэкономической деятельности, находящимися под внешним санкционным давлением, предоставляют новые возможности экономического роста для предприятий транспортно-логистической системы Республики Беларусь.

Сопряжение с широтным международным транспортным коридором «Север – Юг» транспортных каналов Беларуси открывает новые возможности внешнеэкономической деятельности и задействует потенциал роста торговли достижением «бесшовности» транспортных маршрутов и использования инновационных технологий. Однако при построении маршрутов перевозки в международном сообщении из одной географической точки в другую необходимо учитывать существование нескольких альтернативных вариантов перевозок. Например, отличие по протяженности маршрутов движения Минск – Варшава через пограничные переходы Козловичи, Берестовица и Брузги не превышает 10 км. В таком случае необходимо определиться по территориям и дорогам каких стран эффективнее всего осуществлять транспортировку груза между корреспондирующими пунктами. При этом выбор необходимо сделать с учетом всех возможных ограничений на дорогах, чтобы итоговое расстояние перевозки, время и затраты на её осуществление были минимальными. Многие перевозчики обращают внимание только на критерий минимальной длины маршрута, где часто не учитываются дорожные условия движения, число пограничных переходов и режим контроля на них. Такой подход к составлению маршрута может привести к высоким материальным и временным издержкам.

**Основная часть. Исследование торгового баланса грузовых перевозок Республики Беларусь в разрезе различных видов транспорта**

Стоимостное выражение экспорта транспортно-логистических услуг свидетельствует о реализации услуг по перевозкам грузов, а также вспомогательных и дополнительных транспортных услуг в соответствии с международными требованиями, оказанных резидентами страны по договорам и контрактам нерезидентам.

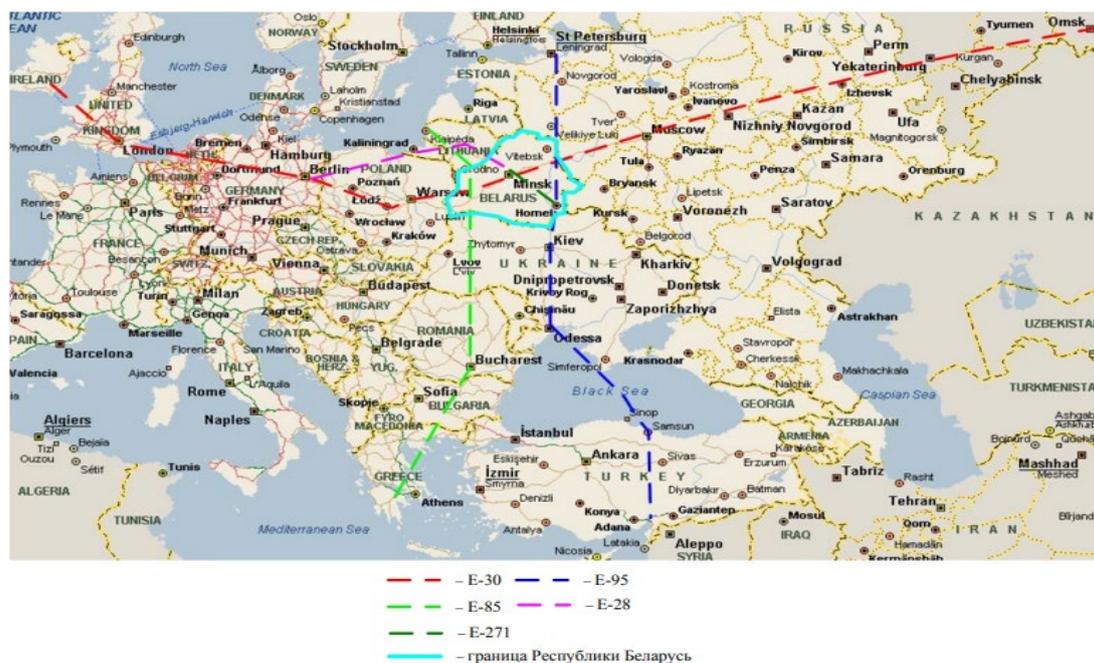


Рисунок 1 – Дороги в международном сообщении, проходящие через территорию Республики Беларусь  
Примечание – Источник: [1]

К категории вспомогательных и дополнительных транспортных услуг относят те, которые сопутствующим образом предоставлены передвижным транспортным средствам в портах, ангарах, аэропортах, автостанциях и железнодорожных станциях, грузовых терминалах, при проведении погрузочно-разгрузочного характера работ, службой эксплуатации взлетно-посадочных полос, железнодорожных путей, автомобильных дорог и магистралей, туннелей, мостов, а также службами диспетчерского управления движением, экспедирования и сопровождения грузовых перевозок, занятых регистрацией, техосмотром и ежедневным поддержанием чистоты транспортных средств, спасательными операциями, безопасностью.

Общепринято, что потребление транспортными предприятиями-резидентами услуг третьих лиц, занимающихся обеспечением материально-техническими запасами и средствами, топливом и смазочными материалами, ремонтом автомагистралей и дорог железнодорожного транспорта, строительством сооружений и конструкций в морских портах и портах воздушных транспортных средств, обеспечением борт-питанием и другими товарами внешней торговли, арендованием транспортных средств без экипажа (или занимающихся предоставлением операционного лизинга), техническим обслуживанием и ремонтом транспортных средств (подвижного состава, машин, оборудования), не относят к транспортным услугам. Однако стоимость этих услуг включается в стоимость оказания транспортных услуг, и в стоимостном выражении может рассматриваться промежуточным потреблением продукции отечественного либо импортного производства.

Экспорт транспортных услуг охватывает статистическую информацию внешней торговли относительно сведений:

- оказанных грузовых перевозок нерезидентам страны;
- произведенных вспомогательных и дополнительных услуг согласно заключенным договорам (контрактам) с нерезидентами страны (постановление Национального статистического комитета Республики Беларусь № 81 от 07.07.2014 г.);
- о выполнении сопутствующих транспортным услугам операций на условиях, прописанных содержанием договоров (контрактов) с нерезидентами страны [2, 3].

Экспорт транспортных услуг – это стоимостное выражение объемов транспортных услуг на условиях произведенных оплат покупателями (FOB) за потребленные услуги транспортных предприятий-резидентов страны, вовлеченных в поставки грузов, собственность на которые распространена на резидентов (от таможенной границы страны до пункта назначения) и нерезидентов (в пределах

территории страны), в том числе с распространением на товарные грузы, не отнесенные ни к экспорту, ни к импорту страны (перемещаемые транзитом), и определенных условиями заключенных договоров (контрактов) с нерезидентами.

Отдельно учитываются в экспорте перевозки грузов предприятиями-резидентами иностранным посольствам, консульствам, дипломатическим и иным официальным представительством, размещенным в пределах территории страны. Вспомогательные и дополнительные услуги оказанные резидентами страны по договорам (контрактам) с нерезидентами на пути сопровождения перевозок грузов, относят к экспорту соответствующего вида экономической деятельности.

Исследования показали, что в Республике Беларусь действуют ограничения нижнего порога (предела) стоимости оказываемого объема транспортно-логистических услуг, учитываемой в объемах экспорта либо импорта за отчетный период, пересчитанный по курсу белорусского рубля к доллару США на дату предоставления услуги или подписания определенным договором либо контрактом документа (товарно-транспортных накладных, приемо-сдаточных актов и других). Суммарно по странам – это от 1000 долларов США и более за месяц. Тогда как оказание прочих услуг физическим лицам (код видов услуг 2500) ограничено суммарным объемом в пересчете к доллару США от 50 долларов и выше по конкретной стране (постановление Национального статистического комитета Республики Беларусь № 81 от 07.07.2014 г.). Пересчет национальной валюты в долларах США производится по официальным курсам Национального банка Республики Беларусь. Очевидно, что изменения курса национальной валюты к доллару США (девальвация и ревальвация национальной валюты) непосредственно влияют на объемы экспорта и импорта транспортно-логистических услуг, а также по предоставлению вспомогательных и дополнительных услуг. Если в договоре обязательств сторон предусмотрено оказание сопутствующих видов услуг с прилагаемой к договору сметой, то стоимость каждой услуги отражается по соответствующему коду вида услуги. Исключение составляют транспортные услуги по перевозке груза, предусмотренные условиями поставки товара и определенными контрактом.

Сведения об экспорте и импорте фиксируются по всему разнообразию предоставленных услуг с первого по последнее число отчетного периода (месяца) и отражаются в стоимостном выражении (с разном уровнем информации о нерезидентах по территориальному признаку). Территориальная принадлежность нерезидента тесно связана с распределением объемов транспортных услуг на экспорт и им-

порт. В настоящее время многие малые частные автоперевозчики Республики Беларусь, чтобы уйти от санкционных ограничений их деятельности, прошли процедуру перерегистрации на территории других стран (как правило, стран ЕС), что непосредственно юридически отразилось на белорусском экспорте транспортных услуг. Другой показательный случай, когда транспортное предприятие-резидент Республики Беларусь по договору с нерезидентом Российской Федерации осуществляет перевозку груза из Литвы в Польшу, то стоимость перевозки будет отражена как экспорт транспортных услуг в России.

Подразделение транспортно-логистических услуг на экспорт и импорт накладывает определенный отпечаток на формирование тарифов по перевозкам грузов, основанном на затратном подходе учёта (включения) затрат, относимых на себестоимость производства единицы продукции [4]. Например, если транспортный перевозчик-резидент осуществляет доставку груза на условиях оплаты транспортно-логистических услуг производителем перевозимого товара, то затраты на транспортировку и вспомогательные, дополнительные услуги учитываются в стоимости товара-груза, перемещаемого от места производства до таможенной территории страны

происхождения товара (и, по сути, формируется стоимость услуги). Следуя установленным правилам, если товар вывозится за территориальные пределы страны или ввозится на её территорию, то заполняется таможенная декларация. С заполнением таможенной декларации, предусмотренной договором (контрактом) с заказчиком, из стоимости услуги исключается стоимость изготовления (производства) перевозимой продукции. В статистической отчетности (к учёту экспорта или импорта) отражается отдельно стоимость транспортно-логистической услуги и стоимость производства товаров. В случае, когда передача товара-груза заказчику происходит на территории страны (Республики Беларусь), то есть ещё не представлена декларация на товары в таможенные органы (либо не заполнена статистическая декларация), то к учёту экспорта принимается полная стоимость услуги, которая прописана в договоре (контракте). Не осуществляется деления на стоимость производства вывозимой продукции и стоимость оказания транспортно-логистической услуги, а это создает трудности учёта экспорта транспортных услуг. Приведенную выше информацию стоит иметь в виду, анализируя экспорт грузовых перевозок по видам транспорта Республики Беларусь (рисунок 2).

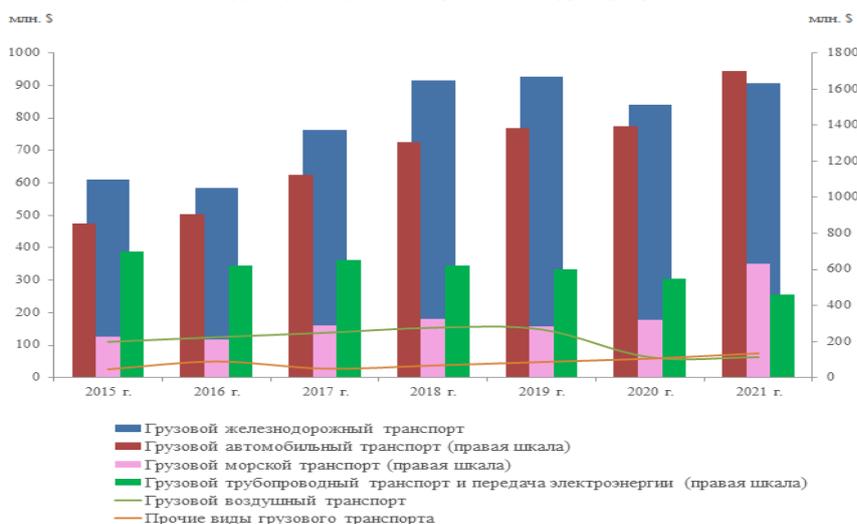


Рисунок 2 – Экспорт грузовых транспортных услуг Республики Беларусь за период 2015–2021 гг., млн \$  
Примечание – Источник: [2]

Проведенный анализ позволяет констатировать, что в 2021 г. экспорт грузовых транспортных услуг продемонстрировал рост в 1,52 раза к 2015 г. По видам грузового транспорта значительный рост экспорта пришёл на прочие виды грузового транспорта – 2,89 раз; морской транспорт – 2,78 раз; автомобильный транспорт – 1,99 раз и железнодорожный – 1,49 раз. Падение объёмов экспорта

за 2015–2021 гг. показали трубопроводный транспорт и передача электроэнергии (минус 34,2 %), а также воздушный транспорт (минус 42,88 %). По видам грузовых перевозок экспорт в 2021 г. продемонстрировал прирост 13,14 % к 2019 г.

Структурные изменения экспорта произошли по видам грузовых транспортных перевозок (рисунок 3).

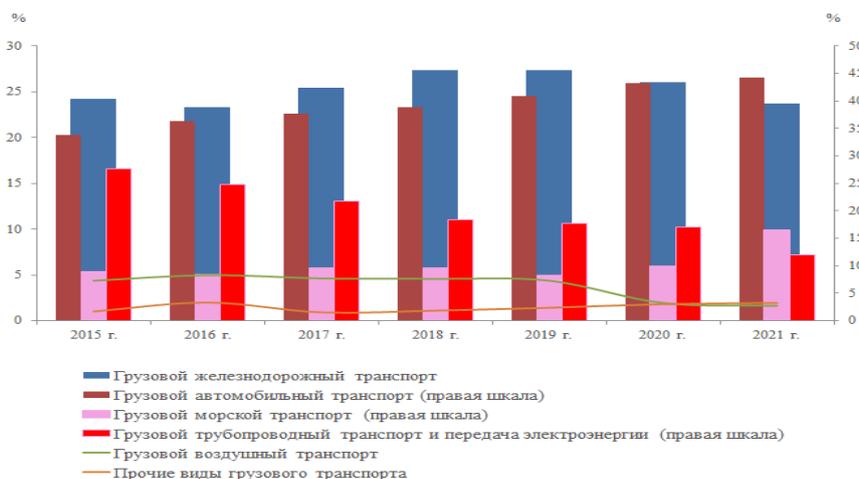


Рисунок 3 – Структура экспорта грузовых транспортных услуг Республики Беларусь за период 2015–2021 гг., %  
Примечание – Источник: [2]

Наибольшая доля экспорта грузовых перевозок за 2015–2021 гг. пришлась на автомобильный транспорт, которым в 2021 г. достигнут уровень 44,29 % (по сравнению с 2015 г. отмечено увеличение на 0,10 п.п.). Трубопроводный транспорт и передача электроэнергии, наоборот, продемонстрировали снижение доли экспорта на 0,16 п.п. Долю в экспорте снизил воздушный транспорт на 0,03 п.п. За рассматриваемый период доля в экспорте грузовых перевозок выросла по морскому виду транспорта на 0,07 п.п., прочему виду грузового транспорта – на 0,01 п.п.

Транспортно-логистические услуги, которые осуществляются нерезидентами по договорам (контрактам) с резидентами страны, независимо от территориального признака их оказания, учитываются импортом. К импорту относятся транспортные расходы, если, находясь в командировке, резидент страны воспользовался услугами транспортных предприятий-нерезидентов (исключение могут составлять расходы по приобретению билетов железнодорожного транспорта). Объёмы импорта по видам грузового транспорта приведены на рисунке 4.

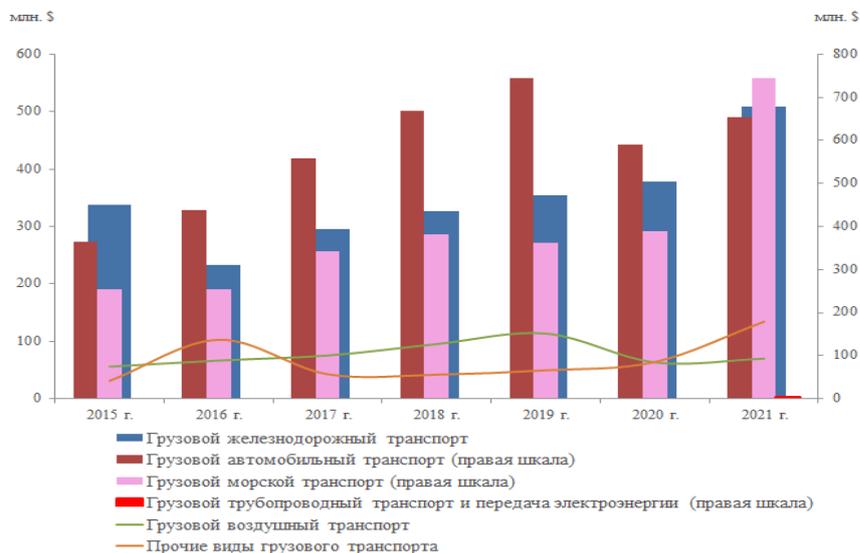


Рисунок 4 – Импорт грузовых транспортных услуг Республики Беларусь за период 2015–2021 гг., млн. \$  
Примечание – Источник: [2]

По объёмам импорта грузовых перевозок наибольший рост в 4,33 раз за 2015–2021 гг. отмечен по прочим видам грузового транспорта. Импорт грузовых поставок автомобильным транспортом продемонстрировал темпы прироста на 79,51 % в 2021 г. к 2015 г., а воздушным транспортом – на 25,09 %. Значительный темп прироста импорта показали железнодорожный транспорт – на 50,77 %, морской транспорт – на 193,2 %. За период 2015–2021 гг. по всем видам грузового транспорта объём импорта вырос в 2,03 раза.

Динамическое изменение структуры импорта грузовых транспортных услуг представлено на рисунке 5. Анализ статистической информации свидетельствует, что в 2021 г. по отношению к 2015 г. отмечается рост доли импорта грузовых перевозок морским транспортом на 0,11 %, прочими видами грузового транспорта – на 0,03 %. Произошло сокращение доли импорта по железнодорожному транспорту на 0,08 %, автомобильному транспорту – на 0,04 %, воздушному транспорту – на 0,02 %.

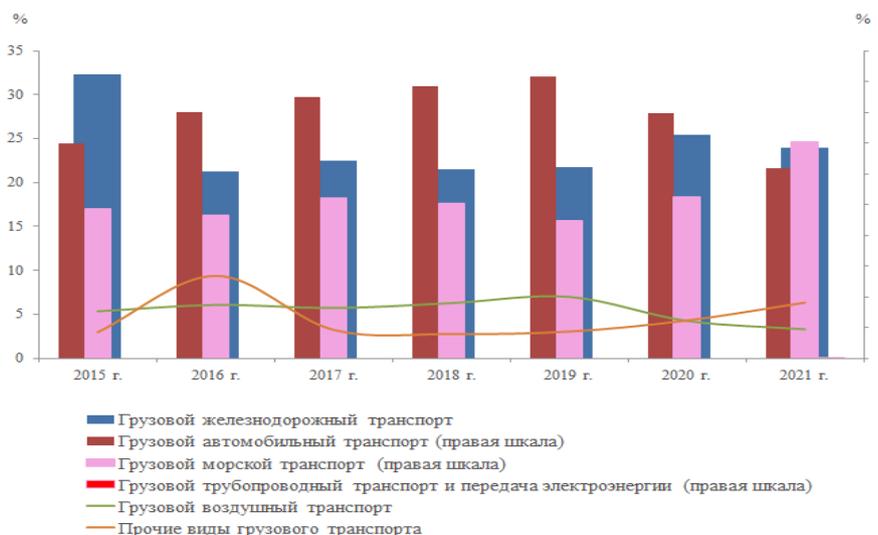


Рисунок 5 – Структура импорта грузовых транспортных услуг Республики Беларусь за период 2015–2021 гг., %  
Примечание – Источник: [2]

Примечательно, что отмечается обратная корреляционная зависимость импортных грузовых услуг морского и автомобильного транспорта, они асинхронны (с ростом доли в структуре грузовых импортных перевозок одного, другой демонстрирует снижение).

За период 2015–2021 гг. сальдо торговых операций транспортных услуг сформировалось положительным и продемонстрировало рост в 2021 г. в 1,16 раз к 2015 г. (рисунок 6).

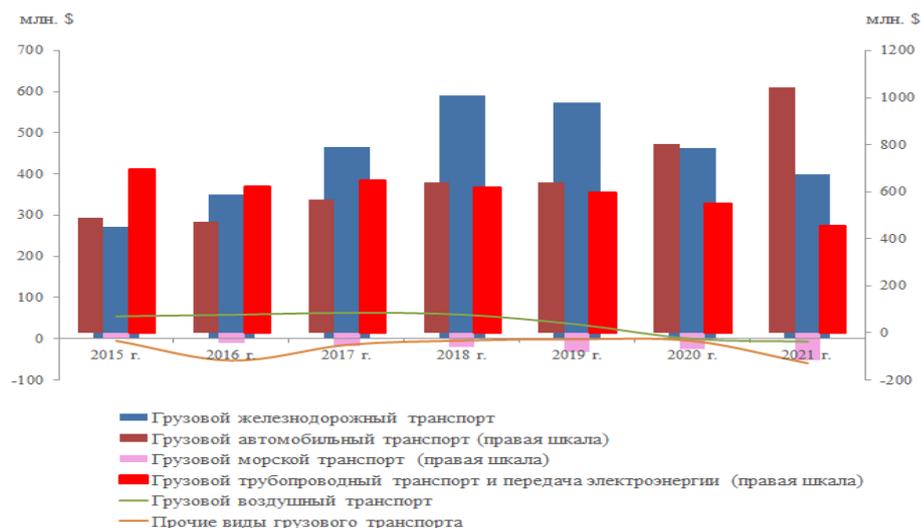


Рисунок 6 – Сальдо торговых операций транспортных услуг Республики Беларусь за период 2015–2021 гг., млн. \$  
Примечание – Источник: [2]

В 2021 г. рост положительного сальдо по грузовым транспортным перевозкам показали: автомобильный (в 2,14 раза); трубопроводный транспорт и передача электроэнергии (в 0,65 раза); железнодорожный (в 1,46 раза). Отрицательное сальдо зафиксировано по таким видам транспорта, как воздушный, морской, прочие виды грузового транспорта, при этом суммарно рост отрицательного сальдо к 2015 г. по этим видам транспорта составил – в 15,89 раз.

#### Заключение

Из-за санкций остаются не в полной мере разрешенными вопросы сокращения доли порожних контейнерных перевозок из стран Европейского Союза. Такое положение делает более привлекательным использование морского вида транспорта в международных перевозках, что не выгодно Республике Беларусь. Однако повышенный спрос на межконтинентальные перевозки морским транспортом отразился на росте стоимости фрахта, усилив стимулы переключения грузоотправителей на услуги железнодорожных и автомобильных транспортных предприятий.

Серьёзное отставание грузового потенциала автомобильного транспорта от железнодорожного и морского создало предпосылки развития производства грузовых автотранспортных средств и соответствующей инфраструктуры. Для экономики Республики Беларусь это новые возможности роста и активизации видов деятельности, которые являются драйверами экономического роста для стран, находящихся на стадии постиндустриального развития.

Исследования показали, что снижение тарифных ставок на получение, подготовку, сдачу документов для пограничного и таможенного контроля на 50,25 долл. США вызвало прирост внешней торговли на 1%. Сокращение времени на таможенное оформление и пересечение границ до 0,83 часа (приблизительно до 50 минут) даст 1% прироста внешней торговли.

Повышение эффективности транспортно-логистической системы страны предусматривает использование коридоров для реализации инфраструктурных проектов в транспортной сфере с переключением транспортных потоков на экологически чистые виды транспорта. Экспертные расчеты объёмов загрязнения окружающей среды выбросами углекислого газа свидетельствуют, что на железнодорожный транспорт приходится в 1,5 раз выше выбросов парниковых газов по сравнению с морским транспортом; почти в два раза ниже в сравнении с речным видом транспорта; более семи раз меньше, чем у автомобильного транспорта и приблизительно в тридцать раз слабее нагрузки на окружающую среду по сравнению с воздушным транспортом. Инвестиционный и технологический потенциалы позволяют предприятиям промышленности и транспорта справиться с технологическим отставанием и изменениями. Заключение в их потенциале ресурсы, знания, навыки жизненно необходимы для

освоения технологий нового поколения, для использования инноваций в совершенствовании транспортных средств перевозки грузов, развития инфраструктуры, что в конечном итоге позволяет предприятиям остаться конкурентоспособными в освоении международных коридоров поставок товаров разными видами транспорта.

#### Список цитируемых источников

1. Дороги в международном сообщении, проходящие через территорию Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.bsut.by/images/MainMenuFiles/Obrazovanie/Kafedry/UAPDD/student/z/mpag\\_1.pdf](https://www.bsut.by/images/MainMenuFiles/Obrazovanie/Kafedry/UAPDD/student/z/mpag_1.pdf). – Дата доступа: 06.05.2023.
2. Статистический ежегодник 2022 / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Минск : Информационно-вычислительный центр Национального статистического комитета Республики Беларусь, 2022. – 374 с.
3. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. / Национальная комиссия по устойчивому развитию Республики Беларусь; редкол: Я. М. Александрович [и др.]. – Минск : Юнипак, 2014. – 132 с.
4. Ходас, А. К. Развитие транспортно-логистических услуг в Республике Беларусь / А. К. Ходас, Д. Н. Месник // Научные труды Белорусского государственного экономического университета. – 2021. – № 14. – С. 475–481.

#### References

1. Dorogi v mezhdunarodnom soobshchenii, prohodyashchie cherez territoriyu Respubliki Belarus' [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: [https://www.bsut.by/images/MainMenuFiles/Obrazovanie/Kafedry/UAPDD/student/z/mpag\\_1.pdf](https://www.bsut.by/images/MainMenuFiles/Obrazovanie/Kafedry/UAPDD/student/z/mpag_1.pdf). – Data dostupa: 06.05.2023.
2. Statisticheskij ezhegodnik 2022 / Nac. stat. kom. Resp. Belarus'. – Minsk : Informacionno-vychislitel'nyj centr Nacional'nogo statisticheskogo komiteta Respubliki Belarus', 2022. – 374 s.
3. Nacional'naya strategiya ustojchivogo social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' na period do 2030 g. / Nacional'naya komissiya po ustojchivomu razvitiyu Respubliki Belarus'; redkol: YA. M. Aleksandrovich [i dr.]. – Minsk : YUnipak, 2014. – 132 s.
4. Hodas, A. K. Razvitie transportno-logisticheskikh uslug v Respublike Belarus' / A. K. Hodas, D. N. Mesnik // Nauchnye trudy Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. – 2021. – № 14. – S. 475–481.

Материал поступил 03.05.2023, одобрен 11.05.2023, принят к публикации 06.07.2023

## ИНВЕСТИЦИИ В ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ КАПИТАЛ КАК ФАКТОР ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА: К ИСТОРИИ ЗАРОЖДЕНИЯ ТЕОРИИ

*Е. Г. Богданович<sup>1</sup>, И. Н. Кандричина<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> К. ист. н., доцент кафедры «Менеджмент» Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: elenabogdanovich@bntu.by

<sup>2</sup> К. соц. н., заместитель декана факультета технологий управления и гуманитаризации Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: ikandrichina@yandex.ru

### Реферат

В статье прослеживается эволюция взглядов на понятие «человеческий капитал» в мировой экономической науке середины XX в. На основании исследования исторических предпосылок формирования понятия и анализа работ основателей теории человеческого капитала авторы уточнили значение понятия «человеческий капитал», а также раскрыли суть инвестиционного подхода к определению человеческого капитала.

**Ключевые слова:** человеческий капитал, теория человеческого капитала, инвестиции в образование, экономический рост.

### INVESTMENTS IN HUMAN CAPITAL AS A FACTOR OF ECONOMIC GROWTH: ON THE HISTORY OF THE ORIGIN OF THE THEORY

*E. G. Bogdanovich, I. N. Kandrichina*

### Abstract

The article traces the evolution of views on the concept of "human capital" in the world economic science of the mid-twentieth century. Based on the study of the historical prerequisites for the formation of the concept and the analysis of the works of the founders of the theory of human capital the authors clarified the meaning of the concept of "human capital", and also revealed the essence of the investment approach to the definition of human capital.

**Keywords:** human capital, theory of human capital, investment in education, economic growth.

### Введение

История формирования понятия «человеческий капитал» восходит к 1776 году, когда Адам Смит упомянул аналогичную концепцию в своей работе «Богатство наций». Хотя Адам Смит не использовал этот термин, он проложил путь к его изучению. Учёный подчеркнул, что приобретенные и используемые навыки отдельных людей являются основным источником национального богатства и экономического развития.

Позже, в 1890 году, английский экономист, основоположник «кембриджской школы» А. Маршалл [1] описал долгосрочный характер инвестиций в человеческий капитал и роль семьи в их осуществлении в своей работе «Принципы экономической науки». Кроме того, А. Маршалл расширил концепцию прибыли, получаемой от человеческого капитала, включив в нее неденежные факторы.

В 1930–1950-е годы исследования человеческого капитала становятся особенно популярными в экономической теории. Данному проблемному полю посвящается огромное количество научных работ, акцентирующих внимание на образовании как главной инвестиции в человеческий капитал. Идея об утилитарной природе образования, его общественной роли и инвестиционном потенциале, безусловно, не была новой. Однако такие понятия, как «человеческий капитал» и «человеческое богатство», для описания экономических и социальных эффектов образования и профессиональной подготовки начали широко использоваться и впоследствии переросли в научно-исследовательскую концепцию только к концу 1950-х годов.

### Основная часть. Развитие теории инвестиций в человеческий капитал в 50–60-е годы XX века

До Второй мировой войны преимущества образования рассматривали исключительно на политическом, культурном и моральном уровнях, а роль образования в получении экономических выгод, накоплении экономических ресурсов и наращивании экономического потенциала игнорировалась. Не отрицая важность образования как системы воспитания и обучения для отдельного человека и общества в целом, ученые тех лет отводили ему второстепенную роль или рассматривали как дополнительный незначительный фактор при анализе экономических явлений и процессов на рынке труда.

В первые послевоенные годы наметился рост исследовательского интереса к проблемному полю человеческого капитала, а в начале 1950-х годов экономическая ценность образования признается научным сообществом. Так, например, новозеландский экономист Аллан Фишер [2] подчеркивал экономический аспект образовательной политики и необходимость рассмотрения образования как инструмента экономической политики. Он считал, что в прошлом прогрессу человечества препятствовало пренебрежение совокупным человеческим капиталом, вследствие ограничений, накладываемых несовершенными системами образования и влекущих за собой нехватку квалифицированной рабочей силы. Основные отрицательные последствия данных обстоятельств приводят к негативным экономическим последствиям. По мнению А. Фишера, образование могло бы сыграть решающую роль в послевоенной реконструкции путем восстановления производственной структуры, если бы больше ресурсов было выделено на оборудование и развитие человеческих ресурсов, и повышение их образовательного уровня. Поскольку образование является долгосрочной инвестицией, выгоды от которой становятся заметны только через некоторое время, приоритеты должны были перенесены на всеобщее начальное образование и профессиональную подготовку работников.

Научный интерес к различным аспектам человеческого капитала еще более возрастает во второй половине 1950-х годов. Здесь следует отметить роль экономического факультета Чикагского университета США. Будущий лауреат Нобелевской премии Т. У. Шульц [3], в то время возглавлявший экономический факультет, рассматривал идею инвестиций в человеческий потенциал как основу экономического развития. Важным вкладом в актуализацию данной проблематики стало его президентское обращение к Американской экономической ассоциации в 1960 году, в котором Т. У. Шульц представил собственную концепцию человеческого капитала, который включал пять основных категорий: здравоохранение, обучение без отрыва от производства, школьное образование, образование взрослых и трудовую миграцию.

В то время Т. У. Шульц был весьма уважаемым специалистом в экономике с прочными связями со многими государственными и частными финансовыми организациями (особенно с фондами Рокфеллера и Форда), и он использовал эти связи для повышения осведомленности о важности инвестиций в человеческий капитал.

Исследования Т. У. Шульца оказали огромное влияние на научную работу другого известного американского экономиста – Г. С. Беккера. Более того, под влиянием Т. У. Шульца Г. С. Беккер обратил свой исследовательский интерес к весьма необычному в то время аспекту – применению экономической теории и её методологии к анализу социальных проблем.

В 1964 году Г. С. Беккер опубликовал монографию «Человеческий капитал», представляющую собой систематизацию теоретических основ и концептуализацию теории человеческого капитала. В ней же он определил человеческий капитал как деятельность, «влияющую на будущий денежный и психический доход посредством увеличения количества ресурсов у людей». [4] В качестве основных форм человеческого капитала ученый рассматривал школьное образование и профессиональную подготовку без отрыва от производства. Наряду с этим Беккер уделил внимание в книге и другим аспектам человеческого капитала – медицинскому обслуживанию, трудовой миграции, ценам и доходам.

Первоначально Г. С. Беккер преследовал одну единственную цель при написании книги, которая заключалась в оценке прибыльности инвестиций в человеческий капитал. Работа должна была иметь чисто эмпирический характер, однако по мере написания она превратилась в научную разработку общей теории инвестиций в человеческий капитал.

Г. С. Беккер разделил человеческий капитал на специфический и общий. Так, работник, обладая личным общим капиталом знаний, может использовать этот капитал не только у своего непосредственного работодателя, но и на другом месте работы. Поскольку обучение общим профессиональным знаниям увеличивает предельный интеллектуальный продукт и потенциал работника, тем самым повышая его востребованность и конкурентоспособность на рынке труда, у организации отсутствует стимул нести какие-либо дополнительные расходы на развитие своего кадрового состава, и она перекладывает их на самих работников. Персонал готов пойти на это, потому что это обучение является своего рода гарантией увеличения доходов в будущем, независимо от места трудоустройства. Следовательно, работник соглашается на более низкую заработную плату, часто не соответствующую его текущему уровню квалификации и компетенций, чтобы покрыть расходы на свое обучение. Это приводит к дифференциации оплаты труда в зависимости от возраста работника, так как в раннем возрасте работник зачастую несет ощутимые расходы на собственное обучение, а извлекает выгоду из этих инвестиций только в зрелом возрасте.

Специфическое обучение способствует повышению уровня производительности и эффективности работника и, как следствие, возрастает его ценность для организации, предоставляющей данные образовательные программы. В этом случае персонал не хочет лично нести расходы на образование, а работодатель готов покрыть большую часть данных затрат, ведь в результате он получает отдачу в виде более высокой производительности труда и эффективности профессиональной деятельности работника. Организации, как правило, компенсируют расходы работникам, прошедшим не общую, а специальную подготовку. Таким образом работодатели стремятся не допустить высокой текучести кадров и, следовательно, избежать потерь, сделанных в обучение персонала инвестиций. Следует признать, что большая часть профессионального обучения на самом деле не является ни полностью специфичной, ни общей, и поэтому затраты, как правило, распределяются между работником и организацией в зависимости от других факторов, таких как обеспеченность кадрами, уровень текучести кадров на предприятии, эффективность работы предприятия в целом, и др.

Г. С. Беккер также предложил свою методику оценки нормы отдачи от инвестиций в человеческий капитал. В соответствии с этой методикой стоимость инвестиций в человеческий капитал следует рассматривать как упущенный доход, а норму капитализации как средне-

взвешенную норму доходности отдельных инвестиций. При таком расчете не учитывается период инвестирования, поскольку и период инвестирования, и затраты, и доходность можно одновременно оценить на основе информации о чистой прибыли. Это позволило Беккеру исследовать эволюцию стимула инвестировать в человеческий капитал в разные периоды и, в частности, установить взаимосвязь между продолжительностью жизни работника и нормой прибыли.

Преимущество подхода Г.С. Беккера [4] заключалось в единой трактовке множества моделей поведения, связанных с человеческим капиталом. Во-первых, это помогло объяснить более длительные периоды обучения, востребованные молодыми поколениями в результате различных стимулов (т. е. более длительные периоды жизни повышали прибыльность этих инвестиций). Во-вторых, это помогло понять, почему люди, переключающиеся между видами деятельности, таким образом, отдавая предпочтение более общей и менее специфической подготовке, ухудшили свои перспективы с точки зрения заработка. В-третьих, в нем высказывалось предположение, что распространение образования было в значительной степени вызвано техническим прогрессом и повышением спроса на квалифицированную рабочую силу за счет воздействия на норму прибыли (измеряемую различиями в заработной плате и издержками). Наконец, пожизненная перспектива помогла оценить трудности с финансированием инвестиций в человеческий капитал и риск недостаточности инвестиций из-за недальновидного поведения молодежи, что долгое время вызывало озабоченность экономистов.

Эмпирический анализ Г. С. Беккера [5], представленный широкой общественности в первом издании монографии «Человеческого капитала», имеет ряд ограничения. Но выводы ученого относительно прибыльности инвестиций в школьное образование и, особенно в обучение в колледже, казались весьма перспективными и коррелировали с работами других исследователей, опубликованными примерно в то же время.

Следует отметить, что с первых дней своего существования исследования человеческого капитала сталкивались со значительным сопротивлением. Сама репутация Г. С. Беккера как инновационного и противоречивого экономиста порождала как энтузиазм, так и резкую критику. Первоначально проблемы касались в основном беккеровской трактовки понятия «человеческий капитал», поскольку для оппонентов ученого она носила дискриминационный характер и акцентировала внимание на эксплуатации труда, низводя людей до уровня машин и неодушевленных предметов.

Многие ученые полагали, что образование является, прежде всего, социализирующей силой, прививающей ценности дисциплины, послушания и мотивации, которые поощрялись также и рынком труда. В некоторых теориях семейное происхождение рассматривалось как ключевая детерминанта уровня оплаты труда и достатка человека; постулировалось, что учащиеся с лучшими стартовыми финансовыми и социальными возможностями будут иметь большие шансы получить высший уровень образования и впоследствии извлечь из него пользу.

Значительная часть экономистов считала, что, хотя человеческие ресурсы широко признаются как фактор, имеющий решающее значение для экономического роста, теории человеческого капитала зашли слишком далеко в аналогии, превратив образование в деловую деятельность и сделав слишком большой акцент на микро-рациональных мотивах, лежащих в основе решений в области образования. Это был, с их точки зрения, обреченный на провал подход, поскольку он ограничивал доверие к человеческому капиталу и ослаблял ценность образования.

В целом реакция научной общественности на «Человеческий капитал» Г. С. Беккера содержала два важных аспекта, которые будут определять последующее развитие исследований человеческого капитала. С одной стороны, аналитическая основа, разработанная в книге, станет краеугольным камнем предстоящего развития исследований человеческого капитала, при этом значительный объем работы будет посвящен уточнению нескольких ее концепций и разработке эмпирической поддержки. С другой стороны, для многих экономистов и неэкономистов человеческий капитал все больше ассоциировался с Беккером и его подходом к экономике, а не просто

как теория, пытающаяся объяснить определенные важные последствия образования и профессиональной подготовки для рынка труда и экономики в целом.

Заметим, что отождествлять зарождение научной теории человеческого капитала исключительно с Г. С. Беккером (и его подходом к экономике) не верно, с научной точки зрения. Складывание концепции человеческого капитала на протяжении 1960-х годов происходило благодаря коллективным усилиям Т. У. Шульца [3, 5, 6], Дж. Минсера [7], Г. С. Беккера [4] и их более молодых коллеги учеников. Каждый из них внёс свой особый вклад, придал анализу человеческого капитала глубину и размах, которые способствовали его последующему развитию и применению к решению множества актуальных социальных проблем.

#### Заключение

Таким образом, человеческий капитал был популяризирован в середине 1960-х годов как социально-экономическая теория. Эта теория подчеркивает взаимный характер отношений между работником и работодателем. Инвестиционный подход в теории человеческого капитала утверждает, что развитие людей окупается большей производительностью. Когда «богатство» человеческого капитала накапливается, компания процветает. Недостаточное инвестирование в человеческий капитал может привести к его обесцениванию и банкротству компаний.

Человеческий ресурс относится к работающему населению страны с точки зрения присущих ему производственных навыков и умений. Без человеческого капитала земля, труд и физический капитал не имеют смысла. Когда население приобретает знания и навыки для работы, это становится человеческим капиталом.

Когда осуществляются инвестиции в человеческий капитал через образование и профессиональную подготовку, это приносит высокую отдачу из-за более высокой производительности более образованных людей.

В свою очередь, более широкое использование человеческих навыков увеличивает национальный доход страны, и развитие страны происходит более быстрыми темпами.

Главный же вывод родоначальников инвестиционного подхода в теории человеческого капитала заключается в том, что люди инвестируют в человеческий капитал по тем же причинам, по которым предприятия инвестируют в физический капитал, а частные лица – в финансовые активы – они надеются получить доход.

#### Список цитированных источников

1. Маршалл, Альфред. Принципы экономической науки / Альфред Маршалл. – М.: Прогресс, 1993. – 312 с.
2. Фишер, Аллан Г. Б. Образование и экономические перемены / Аллан Г. Б. Фишер. – Южная Австралия: W.E.A. Press, 1946. – 35 с.
3. Шульц, Т. В. Инвестиции в человеческий капитал / Т. В. Шульц // Американское экономическое обозрение. – № 1 (март, 1961). – Том 51. – С. 1–17.
4. Беккер, Г. С. Человеческий капитал / Г. С. Беккер. – Нью-Йорк: Издательство Колумбийского университета, 1964. – 187 с.
5. Шульц, Т. В. Экономическая ценность образования / Т. В. Шульц. – Нью-Йорк, Лондон: Издательство Колумбийского университета, 1963. – 123 с.
6. Шульц, Т. В. Инвестиции в человеческий капитал: роль образования и научных исследований / Т. В. Шульц. – Нью-Йорк: Свободная пресса, 1971. – 321 с.
7. Минсер, Дж. Инвестиции в человеческий капитал и распределение личных доходов / Джейкоб Минсер // Журнал политической экономии. – 1958. – № 4. – С. 281–302.

#### References

1. Marshall, Alfred. Principy ekonomicheskoj nauki / Alfred Marshall. – M.: Progress, 1993. – 312 s.
2. Fisher, Allan G. B. Obrazovanie i ekonomicheskie peremeny / Allan G. B. Fisher. – YUzhnaya Avstraliya: W.E.A. Press, 1946. – 35 s.
3. SHul'c, T. V. Investicii v chelovecheskij kapital / T. V. SHul'c // Amerikanskoe ekonomicheskoe obozrenie. – № 1 (mart, 1961). – Tom 51. – S. 1–17.
4. Bekker, G. S. Chelovecheskij kapital / G. S. Bekker. – N'yu-Jork: Izdatel'stvo Kolumbijskogo universiteta, 1964. – 187 s.
5. SHul'c, T. V. Ekonomicheskaya cennost' obrazovaniya / T. V. SHul'c. – N'yu-Jork, London: Izdatel'stvo Kolumbijskogo universiteta, 1963. – 123 s.
6. SHul'c, T. V. Investicii v chelovecheskij kapital: rol' obrazovaniya i nauchnyh issledovanij / T. V. SHul'c. – N'yu-Jork: Svobodnaya pressa, 1971. – 321 s.
7. Minser, Dzh. Investicii v chelovecheskij kapital i raspredelenie lichnyh dohodov / Dzhejkob Minser // Zhurnal politicheskoy ekonomii. – 1958. – № 4. – S. 281–302.

*Материал поступил 21.08.2023, одобрен 30.10.2023, принят к публикации 30.10.2023*

УДК 330.341.1+338.45.01

## РОБОТИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КАК ДРАЙВЕР ПЕРЕХОДА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ К УСТОЙЧИВОМУ ЭКОНОМИЧЕСКОМУ РОСТУ В УСЛОВИЯХ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОЭКОНОМИЧЕСКИХ РЕАЛИЙ<sup>1</sup>

**Т. В. Сергиевич**

К. э. н., доцент, доцент кафедры «Экономика и право» Белорусского национального технического университета, Минск, Республика Беларусь, e-mail: serhiyevich@bntu.by

### Реферат

Статья посвящена выявлению взаимосвязи роботизации промышленности и перехода Республики Беларусь к устойчивому экономическому росту в условиях новых технологических и геоэкономических реалий. Установлено, что промышленная политика, ориентированная на стимулирование роботизации высокотехнологичного сектора и на обновление материальной базы традиционных отраслей, стимулирует внутренний спрос на технологические инновации, соответствующие услуги промышленного характера, высококвалифицированных специалистов, тем самым создавая долгосрочные предпосылки для перехода к устойчивому экономическому росту. Показана роль государства в этих процессах.

**Ключевые слова:** устойчивый экономический рост, институты, роботы, роботизация экономики, машиностроение, модернизация промышленности.

### ROBOTIZATION OF INDUSTRY AS A DRIVER OF THE TRANSITION OF THE REPUBLIC OF BELARUS TO STABLE ECONOMIC GROWTH IN THE CONTEXT OF NEW TECHNOLOGICAL AND GEO-ECONOMIC REALITIES

**T. V. Serhiyevich**

### Abstract

The article is devoted to identifying the relationship between robotization of the industry and the transition of the Republic of Belarus to stable economic growth in the context of new technological and geo-economic realities. It has been established that industrial policy aimed at stimulating the robotization of the high-tech sector and updating the material base of traditional industries stimulates domestic demand for technological innovation, relevant industrial services, and highly qualified specialists, thereby creating long-term prerequisites for the transition to stable economic growth. The role of the state in these processes is shown.

**Keywords:** stable economic growth, institutions, robots, robotization of the economy, mechanical engineering, industrial modernization.

### Введение

Обострившиеся сегодня политико-экономические противоречия порождают возникновение новых рисков и угроз устойчивому экономическому росту Республики Беларусь. В этих условиях, сопровождаемых повышением неустойчивости мировой экономики, нарушением функционирования ее экономических институтов, обострением социально-классовых противоречий, деградацией системы рыночного капитализма в целом [1], устойчивый экономический рост может быть обеспечен благодаря реализации промышленной политики, определяющей принципы, приоритеты, направления и инструменты модернизации промышленности Республики Беларусь, подчиненные стратегической задаче создания сверхиндустриальной экономики, обладающей высокой степенью устойчивости, адаптивности, относительной автономности, технологической независимости и механизмами обеспечения экономической безопасности. Такой подход позволяет внутренне субординировать кратко- и долгосрочные цели модернизации экономики, обеспечивая приоритет последних при реализации промышленной политики и значительно ограничивая применение принципов «стихийности рынка». Современная модернизация промышленности невозможна без расширения производства и использования роботов [2], что в условиях новых технологических и геоэкономических реалий может стать драйвером перехода Республики Беларусь к устойчивому экономическому росту. Установление этой взаимосвязи и служит целью написания данной статьи.

### Взаимосвязь роботизации промышленности и перехода Республики Беларусь к устойчивому экономическому росту

Как подчеркивает С. Губанов, «место в современном мире определяется уровнем индустриализации производительных сил – таков непреложный закон нашей эпохи» [3, с. 24]. В свою очередь, «уровень индустриализации производительных сил» характеризуется не только развитием материально-вещественной базы производ-

ства, но и расширением применения организационно-управленческих инноваций. Модернизация производительных сил, осуществляемая с долгосрочными целями развития экономики, требует отказа от применения принципов «стихийности рынка» в пользу планомерного и системного государственного регулирования этих процессов. Российский опыт показывает: «В 2000-х гг. <...> выдвигались весьма насущные, жизненно важные для России проблемы структурной диверсификации, технической модернизации, инновационного развития, импортозамещения. Они выполнялись лишь частично, – пишет Р. Зяблюк. – <...> Достигнуты успехи в оборонно-промышленном комплексе на основе государственных заказов <...>. Модернизацию, инновацию, структурную диверсификацию представляли действию рыночных сил, постоянно усиливая их приватизацией. Результаты неутешительны» [4, с. 20–21]. Е. Б. Ленчук так описывала сложившуюся ситуацию: «Проводимая в стране (в России – прим. Т. С.) неолиберальная политика практически изолировала инновационную политику от индустриального развития. Сложилась парадоксальная ситуация, когда формирование национальной инновационной системы проходило при полном отрицании промышленной политики» [5, с. 34], что не позволяло реализовывать системную модернизацию несырьевого сектора, ориентированную на обеспечение долгосрочного устойчивого экономического роста. В результате сегодня Российская Федерация вынуждена прикладывать значительные усилия для восстановления своего технологического и экономического суверенитета, проводя активную промышленную политику.

От деиндустриализации, охватившей реальный сектор экономик постсоветских стран, промышленность Республики Беларусь также пострадала, хотя и в меньшей мере. Недопущение масштабной приватизации, осторожный подход к рекомендациям международных экономических организаций, активное государственное регулирование экономики, экспортная ориентация промышленности и импортозамещение, социальная ориентация государства на обеспечение

«высокого уровня и качества жизни для всех слоев общества» [6, с. 12] стали основой для становления уникальной белорусской экономической модели, где промышленность остается ее фундаментом. Несмотря на это сегодня, когда обе страны – как Россия, так и Беларусь, – в силу новых технологических и геоэкономических реалий стоят перед необходимостью проведения активной модернизации промышленного сектора, в нашей стране интенсивность ее мероприятий при благоприятных стартовых условиях в ряде случаев отстает от российских темпов. Во многом это связано с ограниченностью финансовых резервов белорусской экономики для проведения модернизации – речь идет не только о несопоставимых масштабах экономик, но и о том, что в нашей стране цели промышленной политики по-прежнему не довлеют над целями и инструментами денежно-кредитной политики. Кроме того, долгое время белорусская экономика остается подверженной валютным рискам. При стимулировании производства «предоставлением кредитов только тем организациям, которые имеют реальные возможности для развития производства и создания дополнительного ВВП» [7, с. 24], на конечных результатах такой модернизации сказывается внешняя технологическая зависимость – «в большинстве случаев технологическое обновление производства требует закупки импортного оборудования за иностранную валюту» [7, с. 24]. Как итог, кредитное финансирование проведения технологического обновления средств производства становится для реального сектора становится более рискованным и дорогим.

Вместе с тем сегодня драйвером развития технологического импортозамещения становится санкционное давление на Республику Беларусь и Российскую Федерацию, включая ограничение высокотехнологичного экспорта в наши страны, что в конечном итоге приведет либо к деградации промышленности Союзного государства, либо к воссозданию собственного технологического суверенитета и обеспечению устойчивого экономического роста. Последнее зависит от того, сможем ли мы локализовать НИОКР и высокотехнологичное производство для обеспечения собственной промышленности средствами производства (в особенности для производства средств производства), в том числе на основе роботизации. Такая постановка задачи обуславливает и выбор приоритетов в промышленной политике. Развитие соответствующих целям реализации новой промышленной политики сфер критического импортозамещения послужит мощным драйвером роста платежеспособного спроса в национальной экономической системе. Для того чтобы роботизация как технологическое обновление средств производства стало не просто драйвером экономического роста, но и способствовало достижению его устойчивости, необходима трансформация институциональной среды роботизации. Как отмечается в литературе, «институциональная среда общества неопределенности и риска (*сегодняшняя стадия развития общества и экономики справедливо может быть охарактеризована как экономика рисков* [8] – *прим. Т. С.*) может становиться более далекой от "совершенного" состояния и менее устойчивой. А это означает снижение способности институтов обеспечивать устойчивость обменов между людьми» [9, с. 12]. В результате происходит снижение ожиданий по поводу эффективности тех или иных институтов роботизации экономики – как уже сложившихся, так и вновь формируемых и тем более заимствованных из вне (экономических систем другого уровня, масштаба, специфики) институтов. Например, инновационные фонды как институт, направленный на финансирование реализации инновационных проектов, могут оказаться не столь эффективны для проектов в сфере роботизации, поскольку специфика робототехнической отрасли предполагает более сложный переход от штучного к серийному производству, требует длительных периодов окупаемости и является более рискованной. Другой пример – международный обмен научно-техническим опытом в ряде случаев приводит к вымыванию уникальных компетенций из отечественной экономики, что может нивелировать потенциальные положительные эффекты от такого обмена. Чаще всего импорт и интеграция готовых робототехнических решений дешевле, чем возращение собственной робототехнической отрасли, что приводит к подголке специалистов, функционально направленных на импорт и интеграцию готовых робототехнических решений. Сегодня наша страна столкнулась с тем, что к зарубежным готовым технологиче-

ским решениям доступ перекрыт или затруднен, что вынуждает быстро искать пути повышения технологического суверенитета в сфере робототехники, развивая, а по ряду направлений и возрождая, отечественные инженерные школы. Последнее, при всей целесообразности и назревшей необходимости, на практике затруднено. Помимо финансовых вложений, перераспределяющих средства из других сфер (всегда возникает обоснованный вопрос – каких?) в пользу отечественной науки, в том числе инженерной, требуется и изменение сложившихся неформальных институтов, воспроизводящих участие Беларуси и России «в мировой системе разделения труда в качестве экспортеров простых, преимущественно энергетических и сырьевых товаров, выступая импортерами высокотехнологичной продукции западных корпораций» [10, с. 77]. Это – необходимость институциональной трансформации национальной экономики для обеспечения устойчивого экономического роста – еще раз подтверждает тот факт, что «без мощной государственной активности в решении задач инновационного развития не обойтись» [5, с. 35].

При реализации промышленной политики всегда возникает вопрос приоритетности задач модернизации и выбора реципиентов государственной поддержки. В основу этого выбора могут быть положены различные критерии – социальная значимость отрасли, экономические интересы отдельных финансово-промышленных групп, вклад предприятия в обеспечение национальной безопасности и другие. «Важнейший пункт технологического прорыва заключается в концентрации материальных и людских ресурсов на развитие системообразующих отраслей, – пишут российские ученые по этому поводу. – Цифровизация орудий труда, технологий, систем управления во всем производстве предполагает опережающее развитие микроэлектроники <...>. Технический прогресс всех отраслей определяется машиностроением, прежде всего станкостроением – основой всей промышленности» [4, с. 21]. Распределение финансов, которые могут быть использованы в целях стимулирования технологического обновления средств производства, включая роботизацию, основано на системе институтов доступа к инвестициям – инновационные фонды разных уровней, доступ к кредитным средствам на общих и особых условиях, выполнение проектов в рамках государственной программы или в форме государственно-частного партнерства, реализация международных инвестиционных, в т. ч. кредитных договоренностей и т. д. Так, например, 16 ноября 2022 г. было подписано соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Беларусь о предоставлении Правительству Республики Беларусь государственного финансового кредита на сумму 105 млрд российских рублей для реализации импортозамещающих кооперационных проектов. Все они планируются к реализации в сфере машиностроения, станкостроения и электроники, а импортозамещающий потенциал охватывает Союзное государство в целом. Одним из первых в рамках данного соглашения реализуется проект по модернизации ОАО «Гомсельмаш». Причем государственные инвестиции в машиностроение, учитывая основополагающее значение этой отрасли в экономике нашей страны, должны вызвать положительные мультипликационные макроэффекты. Ориентация целей импортозамещающих проектов на Союзное государство свидетельствует о прогрессе в формировании единой промышленной политики интеграционного объединения, институциональным оформлением чего стало заключение 15 февраля 2023 г. межправительственного соглашения о единой промышленной политике между Республикой Беларусь и Российской Федерацией. На фоне усиления экономической интеграции двух стран в конце мая 2023 г. на саммите стран ЕАЭС лидеры государств-членов подписали решение по финансированию проектов промышленной кооперации. Помимо собственно того факта, что эти и другие инициативы означают усиление межстрановой экономической интеграции, можно с уверенностью говорить о потенциале наращивания технологического суверенитета, с проблемой обеспечения которого пришлось столкнуться России и Беларуси, а также о новых формах импортозамещения. Импортозамещение, особенно в ключевых сферах микроэлектроники и машиностроения, начинает носить межгосударственный характер, преследуя интересы Союзного государства как единого субъекта.

Осторожный оптимизм вселяет активизация возрождения отечественных высокотехнологических отраслей промышленности в рамках Союзного государства Беларуси и России, по которым наши страны отстают в мировой технологической гонке. В качестве примера приведем организацию в России «производства микропроцессоров и микропроцессорной техники, т. е. реализации того сценария, который западные эксперты не принимают в расчет, или вообще не допускают его» [11, с. 40]. Микропроцессы широко используются в огромном спектре как предметов потребления, так и средств производства, включая производство роботов, что относит их к числу критически важных компонентов для технологического обновления средств производства, а проблема их дефицита приобретает стратегический характер. «Производство микропроцессоров является базисным условием технологического суверенитета» [11, с. 24], – пишет С. Губанов. И далее: «Вопреки убогим мифологемам о "свободном рынке", рынок высоких технологий вообще и рынок микропроцессоров в особенности – это рынок продавца, а не покупателя» [11, с. 25]. Именно поэтому сегодня США предпринимают все возможные меры, чтобы не допустить развертывания микроэлектронной промышленности, где бы то ни было, помимо самих США, «стремясь запустить микропроцессорную дубинку, исключив в то же время ее появление у своих главных конкурентов – России и КНР» [12, с. 22] и продвигая так называемый проект «союза 4-х», предполагающего «экономическое подчинение наиболее конкурентоспособных полупроводниковых компаний Южной Кореи, Японии и Тайваня американскому капиталу и американской юрисдикции» [12, с. 21]. В то же время, как отмечает А. Белоусов, «если для США производство микропроцессоров – это вопрос мировой гегемонии, то для России их производство – это вопрос выживания» [12, с. 23].

О том, как развивать микроэлектронику в России, есть ли в этой микропроцессорной революции место для реализации белорусского потенциала, ученые ведут дискуссии. А. Белоусов считает, что микроэлектронная промышленность является сферой совпадения интересов России и КНР и местом для реализации кооперационного потенциала обеих стран: «Перспективная возможность видится в микропроцессорном союзе России и КНР <...>, поскольку в нынешней геополитической обстановке они имеют общие интересы» [12, с. 23]. С. Губанов видит перспективы развития этой сферы в интеграции науки и производства при условии мощной государственной поддержки: «Повсюду, где свершилась микропроцессорная революция, – пишет названный ученый, – ее движущей силой выступали вертикально-интегрированные корпорации, эффективно интегрирующие науку и производство в единой цепочке создания добавленной стоимости. <...> Чтобы организовать производство микропроцессоров, Россия должна создать интегрированные корпорации, которые станут звеньями общенациональной цепочки производства микропроцессоров различного назначения и микропроцессорных устройств» [11, с. 45]. Как и во всем мире, в России и Беларуси эволюционно, без воли и активного государственного управления «микропроцессорную революцию» совершить невозможно. Европейские эксперты прямо заявляют, что «хотя полупроводниковая промышленность инвестирует больше, чем любая другая отрасль, в НИОКР и капитальное оборудование, риски, связанные с инвестициями, и их очень долгосрочная отдача в сочетании со стратегической значимостью полупроводниковых технологий означают, что этот сектор всегда пользовался государственной поддержкой» (цит. [13, с. 22] по [14]). Кроме того, описывая механизмы развития микропроцессорной отрасли, европейские эксперты подчеркивают зависимость частных инвестиций от уровня государственных: «Европа должна и может мобилизовать беспрецедентный уровень инвестиций, учитывая высокие положительные побочные эффекты, которые этот сектор оказывает на экономику и многие области, представляющие общественный интерес. Крупные государственные инвестиции будут необходимы для обеспечения высокого уровня частных инвестиций» (цит. [13, с. 27] по [14]). Таким образом, идея «свободного рынка» как механизма обеспечения технологического и экономического суверенитета для обеспечения устойчивого экономического роста, связанного с масштабными высокотехнологичными проектами, требующими десятки миллиардов долларов многолетних инвестиций (в некоторых странах, например, Южной Кореи, Китае, инвестиции в микро-

электронную промышленность исчисляются сотнями миллиардов долларов), нежизнеспособна. Соответственно, реализация подобных проектов нуждается в жестком государственном планировании и фактически ручном управлении. «Процесс формирования таких корпораций следует вести в плановом порядке, – продолжает С. Губанов, – для чего необходим общегосударственный план, построенный на началах вертикальной интеграции, концентрации и централизации промышленного капитала, предназначенного обществом для производства микропроцессоров и электронно-компонентной базы» [11, с. 45]. Учитывая сохраняющуюся научно-техническую и производственную базу микроэлектронной промышленности в Республике Беларусь, дальнейшая локализация на территории Союзного государства не только разработки, но и производства микроэлектронных компонентов не просто целесообразна, но необходима, что помимо всего прочего, будет способствовать снижению рисков функционирования критической информационной инфраструктуры, а также формировать внутренний рынок компонентов робототехники.

Республика Беларусь должна и может сократить разрыв между разработкой новых решений в области робототехники и их серийным производством, используя свои институциональные преимущества – наличие инженерных школ в области робототехники; развитый машиностроительный комплекс как основной потребитель (при наличии производства – и производитель) промышленных роботов; быстрая скорость прохождения информационного сигнала в национальной экономической системе, способной быстро переходить фактически в режим ручного управления. Для этого необходимо выработать системный подход к разработке и реализации направлений и мероприятий в области роботизации промышленности; обеспечить объем финансирования, соответствующий поставленным задачам и поддержанию ожидаемого роста; усилить взаимодействие всех участников рынка робототехники, мобилизуя субъектов рынка со стороны спроса и предложения, ученых, государство, устраняя институциональные ограничения этого взаимодействия; формировать новые ниши рынков робототехники; активизировать международное сотрудничество в области научно-технического и инвестиционного сопровождения проектов в области роботизации с дружественными нам странами; продолжать формирование позитивной национальной экономической идеологии.

### Заключение

В условиях новых технологических и геоэкономических реалий роботизация экономики может выступить мощным драйвером перехода Республики Беларусь к устойчивому экономическому росту. Поскольку роботизация экономики характеризуется высокой капиталоемкостью, необходимостью принятия революционных управленческих решений, противоречиями между целями кратко- и долгосрочной эффективности, социально-трудовыми экстерналиями, высоким уровнем ответственности и рисков, необходимо активное организационно-управленческое и финансовое участие в нем государства – прежде всего, в роботизации национального машиностроительного комплекса. При этом масштабы инвестиций в технологическое обновление средств производства должны быть достаточными для поддержания ожидаемого роста в будущем. Промышленная политика, ориентированная не только на стимулирование роботизации высокотехнологического сектора, но и на обновление материальной базы традиционных отраслей, стимулирует внутренний спрос на технологические инновации, соответствующие услуги промышленного характера, высококвалифицированных специалистов, тем самым создавая долгосрочные предпосылки для перехода к устойчивому экономическому росту.

### Список цитированных источников

1. Социализация капитализма: потенциал, противоречия, пределы / А. В. Бузгалин [и др.] ; под общ. ред. А. В. Бузгалина // Альтернативы. – 2018. – № 4. – С. 33–67.
2. Сергиевич, Т. В. Факторы роботизации экономики в условиях новых технологических и геоэкономических реалий / Т. В. Сергиевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D. Экономические и юридические науки. – 2023. – № 1 (63). – С. 83–87.

3. Губанов, С. Технологический суверенитет России: правда и демагогия / С. Губанов // Экономист. – 2022. – № 6. – С. 23–29.
4. Зяблюк, Р. Экономическое определение природы современной промышленной революции / Р. Зяблюк // Экономист. – 2020. – № 1. – С. 8–24.
5. Ленчук, Е. Б. Формирование инновационной модели развития в России: работа над ошибками / Е. Б. Ленчук // Вестник Института экономики Российской академии наук. – 2018. – № 1. – С. 27–39.
6. Гурский, В. Л. Устойчивая социально-экономическая модель Беларуси – основа национальной экономической безопасности / В. Л. Гурский // Стратегия развития экономики Беларуси : вызовы, инструменты реализации и перспективы : сборник научных статей : в 2 т. / Национальная академия наук Беларуси, Институт экономики НАН Беларуси; редкол.: Д. В. Муха [и др.]. – Минск : Право и экономика, 2022. – Т. 1. – С. 11–16.
7. Лученок, А. И. Теоретические подходы к согласованию макроэкономических интересов в целях стимулирования экономического роста / А. И. Лученок // Вестник Института экономики НАН Беларуси. – 2021. – Вып. 3. – С. 22–33.
8. Солодовников, С. Ю. Экономика рисков / С. Ю. Солодовников // Экономическая наука сегодня : сб. науч. ст. / БНТУ. – Минск, 2018. – Вып. 8. – С. 16–55.
9. Коломиец, А. Общество неопределенности и риска: противоречивость институциональных трансформаций / А. Коломиец // Общество и экономика. – 2022. – № 8. – С. 5–17.
10. Байнев, В. Ф. Технологическая компонента национальной безопасности Союзного государства Беларуси и России / В. Ф. Байнев // Экономист. – 2022. – № 8. – С. 76–86.
11. Губанов, С. О чем говорит зависимость ОПК России от западной электроники? / С. Губанов // Экономист. – 2022. – № 8. – С. 40–45.
12. Белоусов, А. Микропроцессоры правят миром, а не нефть / А. Белоусов // Экономист. – 2022. – № 9. – С. 20–25.
13. ЕС и гонка микропроцессоров: Закон о чипах для Европы – коммюнике Еврокомиссии // Экономист. – 2022. – № 2. – С. 20–42.
14. A Chips Act for Europe // Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. – Brussels, 8.2.2022. COM (2022) 45 final.
9. Kolomicz, A. Obszeczestwo neopredelennosti i riska: protivorechivost' institucional'nyh transformacij / A. Kolomicz // Obszeczestwo i ekonomika. – 2022. – № 8. – С. 5–17.
10. Bajnev, V. F. Tekhnologicheskaya komponenta nacional'noj bezopasnosti Soyuznogo gosudarstva Belarusi i Rossii / V. F. Bajnev // Ekonomist. – 2022. – № 8. – С. 76–86.
11. Gubanov, S. O chem govorit zavisimosť OPK Rossii ot zapadnoj elektroniki? / S. Gubanov // Ekonomist. – 2022. – № 8. – С. 40–45.
12. Belousov, A. Mikroprocessory pravjat mirom, a ne neft' / A. Belousov // Ekonomist. – 2022. – № 9. – С. 20–25.
13. ES i gonka mikroprocessorov: Zakon o chipah dlya Evropy – kommyunike Evrokomissii // Ekonomist. – 2022. – № 2. – С. 20–42.
14. A Chips Act for Europe // Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. – Brussels, 8.2.2022. COM (2022) 45 final.

Материал поступил 26.09.2023, одобрен 28.11.2023, принят к публикации 28.11.2023

#### References

1. Socializaciya kapitalizma: potencial, protivorechiya, predely / A. V. Buzgalin [i dr.]; pod obshch. red. A. V. Buzgalina // Alternativy. – 2018. – № 4. – С. 33–67.
2. Sergievich, T. V. Faktory robotizacii ekonomiki v usloviyah novyh tekhnologicheskikh i geoeconomicheskikh realij / T. V. Sergievich // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya D. Ekonomicheskie i yuridicheskie nauki. – 2023. – № 1 (63). – С. 83–87.
3. Gubanov, S. Tekhnologicheskij suverenitet Rossii: pravda i demagogiya / S. Gubanov // Ekonomist. – 2022. – № 6. – С. 23–29.
4. Zyablyuk, R. Ekonomicheskoe opredelenie prirody sovremennoj promyshlennoj revolyucii / R. Zyablyuk // Ekonomist. – 2020. – № 1. – С. 8–24.
5. Lenchuk, E. B. Formirovanie innovacionnoj modeli razvitiya v Rossii: rabota nad oshibkami / E. B. Lenchuk // Vestnik Instituta ekonomiki Rossijskoj akademii nauk. – 2018. – № 1. – С. 27–39.
6. Gurskij, V. L. Ustojchivaya social'no-ekonomicheskaya model' Belarusi – osnova nacional'noj ekonomicheskoy bezopasnosti / V. L. Gurskij // Strategiya razvitiya ekonomiki Belarusi : vyzovy, instrumenty realizacii i perspektivy : sbornik nauchnyh statej : v 2 t. / Nacional'naya akademiya nauk Belarusi, Institut ekonomiki NAN Belarusi; red. kol.: D. V. Muha [i dr.]. – Minsk : Pravo i ekonomika, 2022. – Т. 1. – С. 11–16.
7. Luchenok, A. I. Teoreticheskie podhody k soglasovaniyu makroekonomicheskikh interesov v celyah stimulirovaniya ekonomicheskogo rosta / A. I. Luchenok // Vestnik Instituta ekonomiki NAN Belarusi. – 2021. – Вып. 3. – С. 22–33.
8. Solodovnikov, S. YU. Ekonomika riskov / S. YU. Solodovnikov // Ekonomicheskaya nauka segodnya : sb. nauch. st. / BNTU. – Minsk, 2018. – Вып. 8. – С. 16–55.

УДК 336.62

## ФИНАНСОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ АГРАРНОГО БИЗНЕСА БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ: РЕСУРСНЫЙ ПОДХОД

**М. П. Самоховец**

*К. э. н., доцент, докторант кафедры налогов и налогообложения УО «Белорусский государственный экономический университет», Минск, Беларусь, e-mail: samkhvec@rambler.ru*

### Реферат

Статья посвящена исследованию финансового потенциала аграрного бизнеса Брестской области с использованием ресурсного подхода. Проведен количественный анализ ресурсов сельскохозяйственных организаций Брестской области на основе анализа статистических данных (по 5-ти видам ресурсов 16-ти районов). В результате сделаны выводы и даны рекомендации, которые могут учитываться при принятии управленческих решений по развитию аграрного сектора Брестской области.

Перспективным видится повышение функциональности имеющихся ресурсов сельскохозяйственных организаций для дальнейшего улучшения финансовых показателей аграрного бизнеса; увеличение объема инвестиций для улучшения состава и качества ресурсов сельскохозяйственного производства; формирование кооперационно-интеграционных структур на финансово взаимовыгодных для субъектов аграрного бизнеса началах для рационального использования имеющихся ресурсов.

**Ключевые слова:** финансовый потенциал, ресурсный потенциал, ресурсный подход, аграрный бизнес, Брестская область.

## FINANCIAL POTENTIAL OF THE AGRICULTURAL BUSINESS BREST REGION: RESOURCE APPROACH

**M. P. Samakhavets**

### Abstract

The article is devoted to the study of the financial potential of agricultural business in the Brest region using the resource approach.

A quantitative analysis of the resources of agricultural organizations in the Brest region was carried out based on the analysis of statistical data (for 5 types of resources in 16 districts). As a result, conclusions were drawn and recommendations were given that can be taken into account when making management decisions on the development of the agricultural sector of the Brest region.

It seems promising to increase the functionality of the existing resources of agricultural organizations to further improve the financial performance of agricultural business; increasing investment to improve the composition and quality of agricultural production resources; the formation of cooperation and integration structures on financially mutually beneficial principles for agricultural business entities for the rational use of available resources.

**Keywords:** financial potential, resource potential, resource approach, agricultural business, Brest region.

### Введение

Стратегической целью развития аграрного бизнеса должно стать его прибыльное функционирование и реализация его финансового потенциала наряду с классическими задачами по обеспечению населения продовольствием и перерабатывающей промышленности сырьем, экспортными поставками. Реализованный финансовый потенциал аграрного бизнеса подразумевает эффективность использования финансового потенциала, способность сельскохозяйственных организаций генерировать доход за счет принятия финансовых решений. Об эффективности использования финансового потенциала позволяют судить результаты сравнения входящих и выходящих денежных потоков: если выходящие денежные потоки больше, чем входящие денежные потоки, то можно говорить о реализованном финансовом потенциале аграрного бизнеса [1]. В конечном итоге реализация финансового потенциала аграрного бизнеса является одним из важных аспектов социально-экономического развития Брестской области.

Финансы на уровне организаций «все чаще ... рассматриваются в контексте ресурсной концепции» через понимание их как «работающих денег организации» [2, с. 123]. Денежные средства становятся финансовыми ресурсами, когда организация распоряжается ими, вкладывает в оборот для простого и расширенного воспроизводства. Финансовые ресурсы необходимы для организации и осуществления производственной деятельности и составляют одну из групп экономических ресурсов наряду с природными, материальными, трудовыми [2, с. 73]. Ресурсный подход является широко распространенным подходом (имеется также результативный подход) к изучению потенциала организаций. Большинство исследователей потенциала организаций остаются сторонниками этого ресурсного подхода (Е. Р. Витун [3]; Н. В. Калинин [4]; Т. Г. Смирнова, С. А. Селякова, Е. Н. Кожина [5]; А. Н. Гридюшко [6]; О. А. Николаевская [7]; А. И. Голубева, В. И. Дорохова, А. В. Коновалов, Ю. В. Шуматбаева, К. В. Павлов [8]; А. А. Хомякова, А. Г. Кайгородов [9] и другие).

При ресурсном подходе понимание финансового потенциала сводится к финансовым ресурсам либо ко всем активам, которыми владеет организация. Финансовый потенциал организаций служит базой для производства «материальных благ, для финансирования воспроизводственных процессов» [9]. В аграрном бизнесе используется совокупность земельных, трудовых, материальных, природных, финансовых, инновационных и т. д. ресурсов, которые используются для производства сельскохозяйственной продукции [10]. Состав ресурсов может быть охарактеризован по составу, количеству и качественно. Дополнительные денежные вложения в ресурсы за счет финансовых ресурсов (финансирование) приводит к изменению (как правило, увеличению) количества и качества имеющихся у экономического субъекта ресурсов.

Финансовый потенциал является выражением производственно-хозяйственного потенциала субъекта, который, в свою очередь, зависит от ресурсов [1, 11]. Положительные изменения в ресурсах приводят к усилению функциональности ресурсов, повышая ресурсный потенциал (потенциал ресурсов) экономического субъекта. Повышение функциональности каждого ресурса в определенной степени ведет к увеличению производственно-хозяйственного потенциала экономического субъекта, т. е. к улучшению результатов деятельности экономического субъекта в целом. Следовательно, через корректировку ресурсов при формировании адекватных входящих денежных потоков [12] можно оказывать управляемое влияние на финансовый потенциал экономического субъекта и его выходящие денежные потоки.

Управление финансовым потенциалом аграрного бизнеса может рассматриваться в контексте управления региональным развитием, с учетом дифференциации по административно-территориальным единицам (районам). В этом смысле механизм управления финансовым потенциалом аграрного сектора выступает составной частью механизма регионального управления, представляет собой совокупность организационно-экономических рычагов и методов, определяется исходя из тенденций развития района, объема доходов местного бюджета, конкурент-

ной среды, экологической обстановки и т. п. факторов [13]. Реализация финансового потенциала сельскохозяйственных организаций, расположенных на территории административно-территориальных единиц (отдельного района), может выступить драйвером развития всего региона.

**Количественный анализ ресурсов аграрного бизнеса Брестской области**

Проведен количественный анализ ресурсов сельскохозяйственных организаций 16-ти районов Брестской области Республики Беларусь (Барановичский, Березовский, Брестский, Ганцевичский, Дрогичинский, Жабинковский, Ивановский, Ивацевичский, Каменецкий, Кобринский, Лунинецкий, Ляховичский, Малоритский, Пинский, Пружанский, Столинский) с учетом возможностей использования имеющейся статистической информации в открытом доступе [14, 15] по 5-ти выделенным элементам с оценкой по 14-ти индикаторам [16]:

1. Земельные ресурсы (га): общая посевная площадь.
2. Техника и оборудование (наличие, штук): тракторы, грузовые автомобили, зерноуборочные комбайны, кормоуборочные комбайны, доильные установки и агрегаты, зерноочистительные машины.
3. Биологические активы:

- в животноводстве – сельскохозяйственные животные (поголовье, голов): крупный рогатый скот (КРС), свиньи, птица;
- в растениеводстве – посевная площадь сельскохозяйственных культур (га): зерновых и зернобобовых культур, кормовых культур.
- 4. Трудовые ресурсы (человек) – численность сельского населения.
- 5. Финансовые ресурсы (тыс. рублей) – расходы местного бюджета на сельское хозяйство.

Сельскохозяйственная деятельность предполагает биотрансформацию, т. е. получение продуктов (сельскохозяйственной продукции) от биологических активов (живущие животные и растения) [17]. Внедрение новых высокоурожайных сортов и гибридов растений в растениеводстве и создание высокого генетического потенциала животных – важные направления инновационного развития сельского хозяйства. Модернизация технико-технологической базы сельского хозяйства на основе новейших разработок науки позволяет сельскохозяйственным организациям увеличивать объемы производства и производительность труда [18].

В таблице 1 представлена оценка ресурсов сельскохозяйственных организаций Брестской области в разрезе 16 районов.

**Таблица 1 – Ресурсы сельскохозяйственных организаций Брестской области**

Показатели	Минимальное значение по Брестской области / по Республике Беларусь	Максимальное значение по Брестской области / по Республике Беларусь	В среднем на 1 район по Брестской области / по Республике Беларусь
<b>1. Земельные ресурсы</b>			
Общая посевная площадь, га	27995 Ганцевичский / 12579 Россонский	82937 Пинский / 97499 Слуцкий	55449 / 44900
<b>2. Машины и оборудование</b>			
Наличие тракторов, штук	184 Ганцевичский / 50 Наровлянский	659 Пинский / 929 Гродненский	413 / 315
Наличие грузовых автомобилей, штук	50 Ганцевичский / 11 Наровлянский	389 Пружанский / 545 Гродненский	228 / 142
Наличие зерноуборочных комбайнов, штук	44 Ганцевичский / 13 Наровлянский	135 Пружанский / 137 Гродненский	86 / 70
Наличие кормоуборочных комбайнов, штук	26 Жабинковский / 7 Наровлянский	78 Пинский / 78 Пинский	47 / 34
Наличие доильных установок и агрегатов, штук	51 Жабинковский / 7 Наровлянский	190 Столинский / 217 Слуцкий	117 / 86
<b>3. Биологические активы</b>			
Поголовье крупного рогатого скота (КРС), голов	19411 Ганцевичский / 6328 Наровлянский	98984 Пинский / 98984 Пинский	54 151 / 35596
Поголовье свиней, голов	2 Барановичский / 1 Чаусский	118 322 Каменецкий / 118526 Гродненский	35 547 / 28420
Поголовье птицы, голов	69 519 Ивановский / 9 Мядельский	4 698 820 Барановичский / 5434136 Могилевский	951 970 / 796261
Посевная площадь зерновых и зернобобовых культур, га	13 349 Ганцевичский / 4223 Россонский	39 883 Барановичский / 39883 Барановичский	24 405 / 20054
Посевная площадь кормовых культур, га	12 213 Ганцевичский / 5 585 Краснопольский	42983 Пинский / 42983 Пинский	25 231 / 20170
<b>4. Трудовые ресурсы</b>			
Численность сельского населения, человек	10377 Жабинковский / 2241 Наровлянский	45330 Столинский / 237296 Минский	23659 / 17108
<b>5. Финансовые ресурсы</b>			
Расходы местного бюджета на сельское хозяйство, тыс. рублей	966 Жабинковский / 242 Россонский	3157 Пинский / 30984 Оршанский	2053 / 2519

Примечание – Источник: рассчитано автором по данным официальной статистики по 16 районам Брестской области за 2021 год

По данным таблицы 1 видно, что средний размер общей посевной площади, приходящейся на 1 район Брестской области, составляет 55 449 га (по республике – 44 900 га), средняя численность сельского населения – 23 659 человек (17 108 человек), расходов местного бюджета на сельское хозяйство – 2053 тыс. руб. (2 519 тыс. руб.). В среднем на 1 район Брестской области (по республике) приходится машин и оборудования (штук): тракторов – 413 (315), грузовых автомобилей – 228 (142), зерноуборочных комбайнов – 86 (70), кормоуборочных комбайнов – 47 (34), доильных установок и агрегатов – 117 (86). Биологические активы (голов) представлены следующим образом: КРС – 54 151 (35 596), свиньи – 35 547 (28 420), пти-

ца – 951 970 (796 261), посевная площадь зерновых и зернобобовых культур – 24 405 (20 054) га, посевная площадь кормовых культур – 25 231 (20 170).

По общей посевной площади в Брестской области лидирует Пинский район 82 937 га (по республике – Слуцкий район 97499 га), по численности трудовых ресурсов – Столинский район 45 330 (Минский район – 237 296 человек), по финансовым ресурсам – Пинский район 3157 тыс. руб. (Оршанский район – 30984 тыс. руб.). Больше всего тракторов, грузовых автомобилей, зерноуборочных комбайнов в Брестской области находится в Ганцевичском районе; кормоуборочных комбайнов, доильных установок и агрегатов – в Жабинков-

ском районе. Наибольшим поголовьем КРС отмечается Пинский район (он же является лидером и по республике), свиней – Каменецкий район, птицы – Барановичский район; посевной площадью зерновых и зернобобовых культур – Барановичский район (он же явля-

ется лидером и по республике), кормовых культур – Пинский район (он же является лидером и по республике).

В таблицах 2–4 представлены группировки районов Брестской области по земельным, трудовым и финансовым ресурсам.

**Таблица 2** – Группировка районов Брестской области по земельным ресурсам (общей посевной площади сельскохозяйственных организаций)

Показатели	Группы районов по земельным ресурсам			III гр. к I гр.
	I (до 40 тыс. га)	II (40–70 тыс. га)	III (св. 70 тыс. га)	
Количество районов в группе	4	8	4	–
<b>1. Земельные ресурсы</b>				
Общая посевная площадь, га	32691	54576	79955	в 2,5 р.
<b>2. Машины и оборудование</b>				
Наличие тракторов, штук, в среднем в районе	237	409	597	в 2,5 р.
Наличие грузовых автомобилей, штук, в среднем в районе	126	217	351	в 2,8 р.
Наличие зерноуборочных комбайнов, штук, в среднем в районе	53	87	119	в 2,2 р.
Наличие кормоуборочных комбайнов, штук, в среднем в районе	33	45	64	в 1,9 р.
Наличие доильных установок и агрегатов, штук, в среднем в районе	68	124	150	в 2,2 р.
<b>3. Биологические активы</b>				
Поголовье крупного рогатого скота (КРС), голов, в среднем в районе	28392	55246	77719	в 2,7 р.
Поголовье свиней, голов, в среднем в районе	25116	53752	22557	0,9
Поголовье птицы, голов, в среднем в районе	–	500057	1403884	–
Посевная площадь зерновых и зернобобовых культур, га, в среднем в районе	14569	24150	34752	в 2,4 р.
Посевная площадь кормовых культур, га, в среднем в районе	14437	24888	36711	в 2,5 р.
<b>4. Трудовые ресурсы</b>				
Численность сельского населения, человек	11169	27198	29071	в 2,6 р.
<b>5. Финансовые ресурсы</b>				
Расходы местного бюджета на сельское хозяйство, тыс. рублей	1986	1947	2331	в 1,2 р.

Примечание – Источник: рассчитано автором по данным официальной статистики по 16 районам Брестской области за 2021 год

Данные таблицы 2 свидетельствуют, что имеется прямая взаимосвязь между размером общей посевной площади сельскохозяйственных организаций района и остальными показателями ресурсного потенциала (за исключением поголовья свиней). Так, с увеличением

общей посевной площади в 3-й группе по сравнению с 1-й в 2,5 раза – количество тракторов увеличивается в 2,5 раза, поголовье КРС в 2,7 раза и т. д. Наибольшее количество районов (8) оказалось во 2-й группе со средним размером общей посевной площади 54576 га.

**Таблица 3** – Группировка районов Брестской области по трудовым ресурсам (по численности сельского населения)

Показатели	Группы районов по трудовым ресурсам			III гр. к I гр.
	I (до 20 тыс. чел.)	II (20–40 тыс. чел.)	III (св. 40 тыс. чел.)	
Количество районов в группе	4	10	2	–
<b>1. Трудовые ресурсы</b>				
Численность сельского населения, человек	11169	24410	44884	в 4,0 р.
<b>2. Земельные ресурсы</b>				
Общая посевная площадь, га	32691	64506	55687	в 1,7 р.
<b>3. Машины и оборудование</b>				
Наличие тракторов, штук, в среднем в районе	237	466	497	в 2,1 р.
Наличие грузовых автомобилей, штук, в среднем в районе	126	263	255	в 2,0 р.
Наличие зерноуборочных комбайнов, штук, в среднем в районе	53	98	96	в 1,8 р.
Наличие кормоуборочных комбайнов, штук, в среднем в районе	33	52	50	в 1,5 р.
Наличие доильных установок и агрегатов, штук, в среднем в районе	68	130	146	в 2,1 р.
<b>4. Биологические активы</b>				
Поголовье крупного рогатого скота (КРС), голов, в среднем в районе	28392	61799	67428	в 2,4 р.
Поголовье свиней, голов, в среднем в районе	25116	31509	84671	в 3,4 р.
Поголовье птицы, голов, в среднем в районе	–	970472	896465	–
Посевная площадь зерновых и зернобобовых культур, га, в среднем в районе	14569	28631	22949	в 1,6 р.
Посевная площадь кормовых культур, га, в среднем в районе	14437	29047	27740	в 1,9 р.
<b>5. Финансовые ресурсы</b>				
Расходы местного бюджета на сельское хозяйство, тыс. рублей	1986	2092	1990	1,0

Примечание – Источник: рассчитано автором по данным официальной статистики по 16 районам Брестской области за 2021 год

В соответствии с данными таблицы 3, наибольшее количество районов (10) оказалось во 2-й группе со средней численностью сель-

ского населения 24 410 человек. Все элементы ресурсного потенциала показали прямую взаимосвязь.

Таблица 4 – Группировка районов Брестской области по финансовым ресурсам (по объему расходов бюджета на сельское хозяйство)

Показатели	Группы районов по финансовым ресурсам			III гр. к I гр., %
	I (до 2 млн руб.)	II (2–3 млн руб.)	III (св. 3 млн руб.)	
Количество районов в группе	7	8	1	–
<b>1. Финансовые ресурсы</b>				
Расходы местного бюджета на сельское хозяйство, тыс. рублей	1583	2326	3157	в 2,0 р.
<b>2. Земельные ресурсы</b>				
Общая посевная площадь, га	52184	54871	82937	в 1,6 р.
<b>3. Машины и оборудование</b>				
Наличие тракторов, штук, в среднем в районе	386	406	659	в 1,7 р.
Наличие грузовых автомобилей, штук, в среднем в районе	231	210	350	в 1,5 р.
Наличие зерноуборочных комбайнов, штук, в среднем в районе	85	83	120	в 1,4 р.
Наличие кормоуборочных комбайнов, штук, в среднем в районе	39	50	78	в 2,0 р.
Наличие доильных установок и агрегатов, штук, в среднем в районе	100	126	163	в 1,6 р.
<b>4. Биологические активы</b>				
Поголовье крупного рогатого скота (КРС), голов, в среднем в районе	46899	54891	98984	в 2,1 р.
Поголовье свиней, голов, в среднем в районе	46775	26253	16583	0,35
Поголовье птицы, голов, в среднем в районе	1625261	344227	82038	0,05
Посевная площадь зерновых и зернобобовых культур, га, в среднем в районе	25113	22609	33823	в 1,3 р.
Посевная площадь кормовых культур, га, в среднем в районе	21210	26531	42983	в 2,0 р.
<b>5. Трудовые ресурсы</b>				
Численность сельского населения, человек	21456	23545	39987	в 1,9 р.

Примечание – Источник: рассчитано автором по данным официальной статистики по 16 районам Брестской области за 2021 год

Исходя из данных таблицы 4, можно сделать вывод о том, дифференциация расходов местного бюджета на сельское хозяйство в меньшей степени, нежели дифференциация земельных или трудовых ресурсов

коррелирует с техническим оснащением сельскохозяйственных организаций и наличием биологических активов. На рисунке 1 представлена динамика трудовых ресурсов Брестской области с 1990 по 2022 годы.



Рисунок 1 – Динамика численности населения в сельской местности Брестской области

Примечание – Источник: собственная разработка автора

Как видно из рисунка 1, численность населения в сельской местности Брестской области имеет выраженную тенденцию к уменьшению (сокращение на 40 % в 2022 году по сравнению с 1989 годом).

В конечном итоге эффективность использования ресурсов сельскохозяйственных организаций и эффективность реализации их финансового потенциала находит свое выражение в финансовых показателях субъектов аграрного бизнеса (таблицах 5–7).

Таблица 5 – Показатели прибыли в аграрном бизнесе

Показатель	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Прибыль от реализации продукции, товаров, работ, услуг, млн руб., 2014–2015 гг. – млрд руб.							
Брестская область	1 131,6	491,8	66,2	182,8	165,9	205,1	250,8
Республика Беларусь	4 597,7	466,3	215,9	707,8	434,5	500,6	676,0
Удельный вес, %	24,6	105,5	30,7	25,8	38,2	41,0	37,1
Прибыль, убыток (–) до налогообложения, млн руб., 2014–2015 гг. – млрд руб.							
Брестская область	1 384,1	757,8	113,0	194,7	170,4	252,0	229,8
Республика Беларусь	5 000,1	–518,6	227,2	705,5	501,1	887,5	795,0
Удельный вес, %	27,7	–	49,7	27,6	34,0	28,4	28,9
Чистая прибыль, убыток (–), млн руб., 2014–2015 гг. – млрд руб.							
Брестская область	1 386,3	754,8	111,8	193,4	170,8	251,9	227,9
Республика Беларусь	4 979,8	–533,3	219,8	698,2	496,9	881,2	793,2
Удельный вес, %	27,8	–	50,9	27,7	34,4	28,6	28,7

Примечание – Источник: собственная разработка автора на основании [19]

Таблица 6 – Основные показатели рентабельности аграрного бизнеса

Показатель	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Рентабельность реализованной продукции, товаров, работ, услуг, %							
Брестская область	8,8	3,4	4,2	10,5	8,7	9,4	10,1
Республика Беларусь	6,5	0,6	2,5	7,7	4,3	4,5	5,5
Рентабельность продаж, %							
Брестская область	7,2	2,9	3,6	8,5	7,1	7,7	8,2
Республика Беларусь	5,5	0,5	2,2	6,4	3,7	3,9	4,7

Примечание – Источник: собственная разработка автора на основании [19]

Таблица 7 – Основные показатели убыточных организаций аграрного бизнеса

Показатель	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Количество убыточных организаций, единиц							
Брестская область	21	44	48	22	25	23	17
Республика Беларусь	198	502	437	219	246	239	177
Удельный вес, %	10,6	8,8	11,0	10,0	10,2	9,6	9,6
Удельный вес убыточных организаций в общем количестве организаций, %							
Брестская область	8,4	18,3	17,6	8,8	10,6	9,1	7,5
Республика Беларусь	13,3	34,9	27,9	15,7	17,9	16,5	13,3
Сумма чистого убытка убыточных организаций, млн руб., 2014–2015 гг. – млрд руб.							
Брестская область	166,3	234,4	24,1	21,7	17,6	14,6	39,8
Республика Беларусь	1 893,1	4 687,6	394,2	222,5	284,6	237,4	307,4

Примечание – Источник: собственная разработка автора на основании [19]

Динамика финансовых показателей, представленная в таблицах 5–7 за 2014–2020 годы, свидетельствует, что Брестская область демонстрирует наилучшие показатели прибыли среди всех областей Республики Беларусь. На долю сельскохозяйственных организаций Брестской области приходится от всей полученной в Республике Беларусь: прибыли от реализации продукции, товаров, работ, услуг – от 24,6 % до 41,0 %; прибыли до налогообложения – от 27,6 % до 49,7 %; чистой прибыли – от 27,7 % до 50,9 %.

Рентабельность реализованной продукции, товаров, работ, услуг в сельскохозяйственных организациях Брестской области в 2020 году составила 10,1 % (по республике – 5,5 %); рентабельность продаж – 8,2 % (по республике – 4,7 %).

В Брестской области в 2020 году насчитывалось 17 убыточных сельскохозяйственных организаций (по республике – 177) или 7,5 % в общем количестве организаций. Сумма чистого убытка убыточных организаций Брестской области составила 39,8 млн руб.

Дальнейшее развитие аграрного бизнеса может быть направлено на современном этапе не только на выполнение традиционных задач по производству сельскохозяйственной продукции для обеспечения продовольственной безопасности, но и повышение конкурентоспособности и улучшение финансовых показателей отрасли.

Проведенный нами количественный анализ ресурсов сельскохозяйственных организаций Брестской области по выделенным индикаторам позволил сформулировать следующие выводы:

1. Определены характеристики типичного района Брестской области по ресурсам сельскохозяйственного производства (средние значения). В размер общей посевной площади – 55 449 (по республике – 44900 га); численность сельского населения – 23 659 (по республике – 17108 человек); расходы местного бюджета на сельское хозяйство – 2 053 (по республике – 2519 тыс. руб.) В структуре посевной площади значительная доля приходится на зерновые и зернобобовые культуры и кормовые культуры. Среди биологических активов в животноводстве – КРС, свиньи, птица. Машины и оборудование представлены преимущественно тракторами и грузовыми автомобилями.

2. Большинство районов во всех группировках по выделенным 3-м элементам ресурсов попадает во II-ю группу: по земельным ресурсам (8 районов) – от 40 до 70 тыс. га, по трудовым ресурсам (10 районов) – от 20 до 40 тыс. человек, по финансовым ресурсам (8 районов) – от 2 до 3 млн руб. Субъекты аграрного бизнеса именно этих районов могут составить основную целевую группу, на которую можно ориентироваться при разработке предложений по повышению конкурентоспособности Брестского региона за счет реализации ресурсного и финансового потенциала аграрного бизнеса.

3. Имеются ярко выраженные районы-лидеры по ресурсам сельскохозяйственного производства (Пружанский район – по наличию грузовых автомобилей и зерноуборочных комбайнов; Пинский район – по размеру посевных площадей кормовых культур, наличию кормоуборочных комбайнов, поголовью КРС; Барановичский район –

по поголовью птицы и посевной площади зерновых и зернобобовых культур; Столинский район – по численности сельского населения, количеству доильных установок и агрегатов) и районы-аутсайдеры (например, Ганцевичский район по 7-ми индикаторам из 14-ти, Жабинковский район – по 4-м индикаторам из 14-ти). Это вызывает необходимость дифференцированного подхода и неодинаковых рекомендаций для реализации ресурсного и финансового потенциала аграрного бизнеса в этих районах.

4. Выявлена прямая зависимость отдельных ресурсов друг от друга. Например, чем больше общая посевная площадь сельскохозяйственных организаций, тем больше численность трудовых ресурсов, техническая оснащенность и наличие биологических активов. При этом основу сельскохозяйственного производства составляют крупнотоварные сельскохозяйственные организации (как и в целом по Республике Беларусь) [20].

5. Вывозом для развития аграрного сектора становится сокращение трудового потенциала на селе. Вместе с тем, современное сельскохозяйственное производство все больше характеризуется процессами повышения уровня технологичности и автоматизации производственных процессов, наращиванию темпов цифровизации сельского хозяйства, внедрению достижений биотехнологий и т. д. Поэтому не только и не столько количественные параметры, но особенно качество трудовых ресурсов в сельском хозяйстве получает особое значение и должно неуклонно повышаться в соответствии с текущими потребностями этой отрасли [21].

Обозначим предложения по реализации финансового потенциала аграрного бизнеса Брестской области с позиций ресурсного подхода.

Во-первых, повышение функциональности имеющихся ресурсов сельскохозяйственных организаций для дальнейшего улучшения финансовых показателей аграрного бизнеса.

Результаты ранее проведенных исследований свидетельствуют [22, с. 510], что наибольшую предельную производительность среди всех ресурсов в сельском хозяйстве показывает капитал – увеличение инвестиций на 1 % приводит к увеличению объема выпуска сельскохозяйственной продукции на 0,8–0,9 %. Наблюдались устойчивая тенденция снижения значимости земельных ресурсов и роста производительности труда. За последние 25 лет совокупная факторная производительность в сельском хозяйстве Республики Беларусь возросла почти в 4 раза [22, с. 511].

Сельское хозяйство «должно стать сферой реального бизнеса, реализации предпринимательских интересов предприятий и трудовых коллективов» [23, с. 140]. Основным источником инвестиций должна выступить прибыль, которая является «единственным источником устойчивого экономического развития» [24, с. 8] и служит индикатором целесообразности производства. Основным фактором изменения объема прибыли сельского хозяйства являлось изменение уровня эффективности использования ресурсов (динамика затрат) и эффективности продаж (динамика цен) [25, с. 18].

Во-вторых, увеличение объема инвестиций для улучшения состава и качества ресурсов сельскохозяйственного производства.

Конкурентоспособное сельскохозяйственное производство невозможно без повышения инвестиционной привлекательности отрасли [26], внедрения новейших научных достижений и увеличения технического уровня производства. Обновление основных фондов сельскохозяйственного производства должно учитывать взаимосвязанную потребность в увеличении оборотных средств.

Оптимизация инвестиционных затрат и получение оптимальных результатов сельскохозяйственного производства должна стать актуальной задачей развития сельского хозяйства. При недостатке собственных средств имеются различные каналы формирования входящих денежных потоков в аграрном бизнесе [12].

В-третьих, формирование кооперационно-интеграционных структур на финансово взаимовыгодных для субъектов аграрного бизнеса началах для рационального использования имеющихся ресурсов.

Кооперация может рассматриваться как вынужденное (рациональное) следствие конкуренции для получения максимального результата. Исследованиями установлено, что формы кооперативно-интеграционного взаимодействия, объективно взаимообусловлены конкуренцией [27]. Формирование интегрированных структур в АПК с позиций финансового менеджмента дает преимущества по рациональному использованию имеющихся ресурсов (в частности, трудовых ресурсов, имеющих тенденцию к уменьшению), достижению запланированных финансовых параметров развития, использованию незадействованных резервов роста и извлечению высокой прибыли.

Интегрированные формирования в АПК обладают большим финансовым потенциалом в сравнении с отдельными разрозненными предприятиями за счет более эффективного использования земельных, трудовых и других видов ресурсов, а также по сравнению со средними и малыми предприятиями. Формирование интегрированных структур по технологической цепи – от производства сырья до реализации готового высококачественного продовольствия – с позиций управления финансами дает возможность поддерживать нерентабельные предприятия, достигать запланированных параметров развития, задействовать неиспользуемые резервы роста и извлекать высокую (маржинальную) прибыль.

Управление финансовым потенциалом субъектов аграрного бизнеса (в особенности крупнотоварных кооперационно-интегрированных структур в АПК) как новым объектом управления в системе финансового менеджмента становится актуальной задачей научно-методологического поиска и практической реализации.

### Заключение

Формирование эффективного механизма управления финансовым потенциалом сельскохозяйственных производителей (с учетом оценки отдельных ресурсов по конкретным индикаторам) можно рассматривать в контексте управления региональным развитием. Реализация финансового потенциала аграрного бизнеса Брестской области с позиций ресурсного подхода видится возможной путем повышения производительности имеющихся ресурсов для дальнейшего улучшения финансовых показателей аграрного бизнеса; увеличения объема инвестиций для улучшения состава и качества ресурсов сельскохозяйственного производства; формирования кооперационно-интеграционных структур на финансово взаимовыгодных для субъектов аграрного бизнеса началах для рационального использования имеющихся ресурсов.

Рассмотрение финансового потенциала с позиций ресурсного подхода позволило получить результаты на основе ограниченного набора абсолютных нефинансовых и финансовых показателей, но без выявления характера устойчивых взаимосвязей между ресурсами и финансовыми показателями. Преодолеть это можно, если использовать симбиоз ресурсного и результативного подходов к изучению финансового потенциала, что является перспективным направлением исследований автора.

### Список цитированных источников

1. Богатырёва, В. В. Финансовый потенциал как новая экономическая категория в финансовой науке / В. В. Богатырёва, Д. А. Панков, М. П. Самоховец // Бухгалтерский учет и анализ. – 2022. – № 2. – С. 10–22.
2. Современная политэкономия : учебное пособие / В. Г. Гусаков [и др.] ; под ред. В. Г. Гусакова. – Минск : РИВШ, 2022. – 464 с.

3. Витун, Е. Р. Экономическая сущность ресурсного потенциала. Классификация производственных ресурсов: лекция для студентов / Е. Р. Витун. – Гродно, 1993. – 15 с.
4. Калинин, Н. В. Ресурсный потенциал аграрной сферы региона и повышение эффективности его использования: автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Н. В. Калинин. – Улан-Удэ, 2005. – 18 с.
5. Смирнова, Т. Г. Развитие производственного потенциала сельского района / Т. Г. Смирнова, С. А. Селякова, Е. Н. Кожина ; под ред. Т. В. Усковой. – Вологда : ИСЭРТ РАН, 2010. – 148 с.
6. Гридюшко, А. Н. Ресурсный потенциал сельскохозяйственного производства: формирование и оценка: монография / А. Н. Гридюшко. – Горки: БГСХА, 2018. – 266 с.
7. Николаевская, О. А. Оценка финансового потенциала промышленного предприятия / О. А. Николаевская // УЭКС. – 2013. – № 4 (52).
8. Экономический потенциал и эффективность его использования в сельскохозяйственных предприятиях региона / А. И. Голубева [и др.] // Вестник АПК Верхневолжья. – 2020. – № 1 (49). – С. 59–67.
9. Хомякова, А. А. Методика оценки финансового потенциала экономических систем микроуровня / А. А. Хомякова, А. Г. Кайгородов // Аудит и финансовый анализ. – 2014. – № 3. – С. 167–174.
10. Самоховец, М. П. Подходы к оценке производственного потенциала организаций АПК / М. П. Самоховец // Техника и технология пищевых производств : материалы XV Юбилейной Международной научно-технической конференции, Могилев, 19–20 апреля 2023 г. : в 2 т. / Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий ; редкол.: А. В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев : БГУТ, 2023. – Т. 2. – С. 282–283.
11. Самоховец, М. П. Характеристика денежных потоков экономических субъектов в концепции финансового потенциала / М. П. Самоховец // Право. Экономика. Психология. – 2023. – № 1 (29). – С. 48–52.
12. Самоховец, М. П. Формирование входящих денежных потоков в концепции финансового потенциала аграрного бизнеса / М. П. Самоховец // Белорусский экономический журнал. – 2023. – № 3. – С. 38–52.
13. Самоховец, М. П. Государственное регулирование аграрного бизнеса в современных условиях / М. П. Самоховец // Государственное регулирование экономики и повышение эффективности деятельности субъектов хозяйствования : сб. науч. статей XVII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти профессора С. А. Пелиха, Минск, 20 апреля 2023 г. / Академия управления при Президенте Респ. Беларусь ; редкол.: В. В. Данилович [и др.]. – Минск, 2023. – С. 184–188.
14. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by>. – Дата доступа: 24.10.2023.
15. Министерство финансов Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minfin.gov.by>. – Дата доступа: 24.10.2023.
16. Самоховец, М. П. Количественная оценка ресурсов сельскохозяйственных организаций Республики Беларусь в региональном аспекте / М. П. Самоховец // Право. Экономика. Психология. – 2023. – № 3 (31). – С. 41–47.
17. Самоховец, М. П. Внедрение МСФО в бухгалтерский учет в сельском хозяйстве Республики Беларусь / М. П. Самоховец // Совершенствование учета, анализа и контроля как механизмов информационного обеспечения устойчивого развития экономики : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Махачкала, 20 июня 2017 г. / Дагестанский государственный университет ; Р. Б. Шахбанов [и др.]. – Махачкала, 2017. – С. 273–276.
18. Самоховец, М. П. Развитие финансово-кредитной поддержки модернизации АПК Республики Беларусь / М. П. Самоховец // Стратегия развития экономики Беларуси: факторы формирования и инструменты реализации : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 апреля 2015 г. / Институт экономики НАН Беларуси ; науч.-ред. совет: В. Г. Гусаков [и др.]. – Минск : Право и экономика, 2015. – С. 80–82.
19. Сельское хозяйство Республики Беларусь. Статистический сборник. – Минск, 2021. – 178 с.
20. Самоховец, М. П. Влияние фактора многоукладности на финансирование сельского хозяйства Беларуси / М. П. Самоховец // Вестник Томского государственного университета. Экономика. – 2020. – № 50. – С. 47–55.

21. Самоховец, М. П. Современные условия формирования трудовых ресурсов в сельском хозяйстве Республики Беларусь / М. П. Самоховец // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 74-й Региональной науч.-практ. конф., Витебск, 18 февраля 2022 г. / Витебский государственный университет имени П. М. Машерова ; редкол.: Е. Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.]. – Витебск : ВГУ имени П.М. Машерова, 2022. – С. 390–392.
22. Филиппов, А. М. Совокупная факторная производительность и конкурентоспособность сельского хозяйства / А. М. Филиппов // Научные труды БГЭУ / редкол.: В.Ю. Шутилин (гл. ред.) [и др.] ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. экон. ун-т. – Минск : БГЭУ, 2020. – Вып. 13. – С. 504–512.
23. Гусаков, В. Г. Факторы и методы эффективного хозяйствования. Ч. 2. Кооперация и интеграция субъектов хозяйствования, инвестиции в развитие производства, государственное регулирование АПК, развитие предпринимательства и подготовка кадров / В. Г. Гусаков // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2020. – Т. 58, №2. – С. 135–142.
24. Гусаков, В. Г. Факторы и методы эффективного хозяйствования. Ч. 1. Интенсификация, концентрация, специализация и размещение производства / В. Г. Гусаков // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2020. – Т. 58, № 1. – С. 7–12.
25. Филиппов, А. М. Отраслевая политика экономического развития: методология, теория, практика: автореф. ... докт. экон. наук : 08.00.01 / А. М. Филиппов ; БГЭУ. – Минск, 2019. – 45 с.
26. Чабаткуль, В. В. Теоретические аспекты инвестиционно-инновационного развития агропромышленного производства / В. В. Чабаткуль, А. Н. Русакович, Т. Г. Горустович // Аграрная экономика. – 2023. – № 1. – С. 3–14.
27. Пилипук, А. В. Механизм и модели конкурентного функционирования [Электронный ресурс] / А. В. Пилипук // Современная конкуренция. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru>. – Дата доступа: 24.10.2023.
- References**
1. Bogatyryova, V. V. Finansovyy potencial kak novaya ekonomicheskaya kategoriya v finansovoy nauke / V. V. Bogatyryova, D. A. Pankov, M. P. Samohovec // Buhgalterskij uchët i analiz. – 2022. – № 2. – С. 10–22.
2. Sovremennaya politekonomiya : uchebnoe posobie / V. G. Gusakov [i dr.] ; pod red. V. G. Gusakova. – Minsk : RIVSH, 2022. – 464 s.
3. Vitun, E. R. Ekonomicheskaya sushchnost' resursnogo potentsiala. Klassifikatsiya proizvodstvennykh resursov: lektsiya dlya studentov / E. R. Vitun. – Grodno, 1993. – 15 s.
4. Kalinin, N. V. Resursnyy potencial agrarnoy sfery regiona i povyshenie effektivnosti ego ispol'zovaniya: avtoreferat dis. ... kand. ekon. nauk : 08.00.05 / N. V. Kalinin. – Ulan-Ude, 2005. – 18 s.
5. Smirnova, T. G. Razvitiye proizvodstvennogo potentsiala sel'skogo rajona / T. G. Smirnova, S. A. Selyakova, E. N. Kozhina ; pod red. T. V. Uskovoij. – Vologda : ISERT RAN, 2010. – 148 s.
6. Gridyushko, A. N. Resursnyy potencial sel'skohozyajstvennogo proizvodstva: formirovaniye i ocenka: monografiya / A. N. Gridyushko. – Gorki: BGSKHA, 2018. – 266 s.
7. Nikolaevskaya, O. A. Ocenka finansovogo potentsiala promyshlennogo predpriyatiya / O. A. Nikolaevskaya // UEKS. – 2013. – № 4 (52).
8. Ekonomicheskij potencial i effektivnost' ego ispol'zovaniya v sel'skohozyajstvennykh predpriyatiyakh regiona / A. I. Golubeva [i dr.] // Vestnik APK Verhnevolzh'ya. – 2020. – № 1 (49). – С. 59–67.
9. Homyakova, A. A. Metodika ocenki finansovogo potentsiala ekonomicheskikh sistem mikroovnyya / A. A. Homyakova, A. G. Kajgorodov // Audit i finansovyy analiz. – 2014. – № 3. – С. 167–174.
10. Samohovec, M. P. Podhody k ocenke proizvodstvennogo potentsiala organizatsiy APK / M. P. Samohovec // Tekhnika i tekhnologiya pishchevnykh proizvodstv : materialy HV Yubilejnoj Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Mogilev, 19–20 aprelya 2023 g. : v 2 t. / Belorusskij gosudarstvennyj universitet pishchevnykh i himicheskikh tekhnologij ; redkol.: A. V. Akulich (otv. red.) [i dr.]. – Mogilev : BGUT, 2023. – Т. 2. – С. 282–283.
11. Samohovec, M. P. Harakteristika denezhnykh potokov ekonomicheskikh sub'ektov v koncepcii finansovogo potentsiala / M. P. Samohovec // Pravo. Ekonomika. Psihologiya. – 2023. – № 1 (29). – С. 48–52.
12. Samohovec, M. P. Formirovaniye vkhodyashchih denezhnykh potokov v koncepcii finansovogo potentsiala agrarnogo biznesa / M. P. Samohovec // Belorusskij ekonomicheskij zhurnal. – 2023. – № 3. – С. 38–52.
13. Samohovec, M. P. Gosudarstvennoe regulirovaniye agrarnogo biznesa v sovremennykh usloviyakh / M. P. Samohovec // Gosudarstvennoe regulirovaniye ekonomiki i povyshenie effektivnosti deyatelnosti sub'ektov hozyajstvovaniya : sb. nauch. statej XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. pamyati professora S. A. Peliha, Minsk, 20 aprelya 2023 g. / Akademiya upravleniya pri Prezidente Resp. Belarus' ; redkol.: V. V. Danilovich [i dr.]. – Minsk, 2023. – С. 184–188.
14. Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus' [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.belstat.gov.by>. – Data dostupa: 24.10.2023.
15. Ministerstvo finansov Respubliki Belarus' [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://minfin.gov.by>. – Data dostupa: 24.10.2023.
16. Samohovec, M. P. Kolichestvennaya ocenka resursov sel'skohozyajstvennykh organizatsiy Respubliki Belarus' v regional'nom aspekte / M. P. Samohovec // Pravo. Ekonomika. Psihologiya. – 2023. – № 3 (31). – С. 41–47.
17. Samohovec, M. P. Vnedrenie MSFO v buhgalterskij uchët v sel'skom hozyajstve Respubliki Belarus' / M. P. Samohovec // Sovershenstvovanie ucheta, analiza i kontrolya kak mekhanizmov informacionnogo obespecheniya ustojchivogo razvitiya ekonomiki : materialy III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Mahachkala, 20 iyunya 2017 g. / Dagestanskij gosudarstvennyj universitet ; R. B. SHabbanov [i dr.]. – Mahachkala, 2017. – С. 273–276.
18. Samohovec, M. P. Razvitiye finansovo-kreditnoj podderzhki modernizatsii APK Respubliki Belarus' / M. P. Samohovec // Strategiya razvitiya ekonomiki Belarusi: faktory formirovaniya i instrumenty realizatsii : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 23–24 aprelya 2015 g. / Institut ekonomiki NAN Belarusi ; nauch.-red. sovet: V. G. Gusakov [i dr.]. – Minsk : Pravo i ekonomika, 2015. – С. 80–82.
19. Sel'skoe hozyajstvo Respubliki Belarus'. Statisticheskij sbornik. – Minsk, 2021. – 178 s.
20. Samohovec, M. P. Vliyaniye faktora mnogoukladnosti na finansirovaniye sel'skogo hozyajstva Belarusi / M. P. Samohovec // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika. – 2020. – № 50. – С. 47–55.
21. Samohovec, M. P. Sovremennyye usloviya formirovaniya trudovykh resursov v sel'skom hozyajstve Respubliki Belarus' / M. P. Samohovec // Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike : materialy 74-j Regional'noj nauch.-prakt. konf., Vitebsk, 18 fevralya 2022 g. / Vitebskij gosudarstvennyj universitet im. P. M. Masherova ; redkol.: E. YA. Arshanskij (gl. red.) [i dr.]. – Vitebsk : VGU imeni P.M. Masherova, 2022. – С. 390–392.
22. Filippov, A. M. Sovokupnaya faktornaya proizvoditel'nost' i konkurentosposobnost' sel'skogo hozyajstva / A. M. Filippov // Nauchnye trudy BGEU / redkol.: V.YU. SHutilin (gl. red.) [i dr.] ; M-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Belorus. gos. ekon. un-t. – Minsk : BGEU, 2020. – Vyp. 13. – С. 504–512.
23. Gusakov, V. G. Faktory i metody effektivnogo hozyajstvovaniya. CH. 2. Koopерация i integratsiya sub'ektov hozyajstvovaniya, investitsii v razvitiye proizvodstva, gosudarstvennoe regulirovaniye APK, razvitiye predpriimatel'stva i podgotovka kadrov / V. G. Gusakov // Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. agrar. navuk. – 2020. – Т. 58, № 2. – С. 135–142.
24. Gusakov, V. G. Faktory i metody effektivnogo hozyajstvovaniya. CH. 1. Intensifikatsiya, koncentratsiya, spetsializatsiya i razmeshcheniye proizvodstva / V. G. Gusakov // Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. agrar. navuk. – 2020. – Т. 58, № 1. – С. 7–12.
25. Filippov, A. M. Otrasl'evaya politika ekonomicheskogo razvitiya: metodologiya, teoriya, praktika: avtoref. ... dokt. ekon. nauk : 08.00.01 / A. M. Filippov ; BGEU. – Minsk, 2019. – 45 s.
26. CHabatul', V. V. Teoreticheskie aspekty investitsionno-innovatsionnogo razvitiya agropromyshlennogo proizvodstva / V. V. CHabatul', A. N. Rusakovich, T. G. Gorustovich // Agrarnaya ekonomika. – 2023. – № 1. – С. 3–14.
27. Pilipuk, A. V. Mekhanizm i modeli konkurentnogo funkcionirovaniya [Elektronnyj resurs] / A. V. Pilipuk // Sovremennaya konkurenciya. – Rezhim dostupa: <https://cyberleninka.ru>. – Data dostupa: 24.10.2023.

Материал поступил 22.01.2024, одобрен 29.01.2024, принят к публикации 29.01.2024

## КЛАССИФИКАЦИЯ РИСКОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Э. Э. Ермакова<sup>1</sup>, М. П. Мишкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Магистр экономических наук, старший преподаватель кафедры экономической теории и логистики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ermakova.eleonora@gmail.com

<sup>2</sup> К. э. н., доцент кафедры менеджмента УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: mishkova69@yandex.by

### Реферат

В современных быстроменяющихся условиях жизни, происходящих последние десятилетия, повышается интерес к научным достижениям и открытиям. Растущие темпы технологического прогресса нашли свое отражение в экономике, финансах, политике, условиях труда, в связи с чем особое внимание необходимо уделять системе управления рисками в сфере интеллектуальной деятельности. Идентификация, систематизация, оценка рисков и пути их минимизации – одна из основных задач управления интеллектуальной деятельностью. В статье представлена классификация рисков интеллектуальной деятельности с позиции жизненного цикла объектов интеллектуальной собственности, обоснована необходимость оценки рисков, связанных с созданием и использованием результатов интеллектуальной деятельности.

**Ключевые слова:** риск, интеллектуальная собственность, изобретение, полезная модель, патент, объект промышленной собственности, коммерциализация, лицензионные соглашения, интеллектуальная деятельность.

## CLASSIFICATION OF RISKS OF INTELLECTUAL ACTIVITY

E. E. Ermakova, M. P. Mishkova

### Abstract

In today's rapidly changing environment, special attention should be paid to the risk management system in the field of intellectual activity. Identification, systematization, assessment of risks and ways to minimize them is one of the main tasks of managing intellectual activity. The article presents a classification of risks of intellectual activity from the standpoint of the life cycle of intellectual property objects, substantiates the need to assess the risks associated with the creation and use of the results of intellectual activity.

**Keywords:** risk, intellectual property, invention, utility model, patent, industrial property, commercialization, license agreements, intellectual activity.

### Введение

Современное общество, в силу сложности, многогранности и интенсивной изменчивости находится в поиске определения сущности его развития. Определяющими чертами экономики, присущими развитию человечества с конца прошлого столетия, и отражающими наиболее важные его характеристики, являются: информатизация, интеллектуализация, инновационность, цифровизация. И объединяют все эти понятия – знания и научно-технический прогресс, рост которых в настоящее время характеризуется чрезвычайно быстрыми темпами.

За последние более чем полвека в мировой экономике и в других сферах культурной жизни людей происходит быстрый рост интеллектуализации трудовой деятельности, отображенный в мировой статистике патентов, объектов авторского права, средствах индивидуализации юридических лиц. Данная статистика показывает, что результаты интеллектуальной деятельности становятся одним из основных критериев успешной деятельности во всех отраслях экономики, в науке, образовании, инновационной деятельности, промышленности, энергетике, оборонной, космической авиационной промышленности и прочих сферах. Этот рост не будет останавливаться ввиду того, что все современные изделия и технологии требуют вложения все больших интеллектуальных ресурсов [1, с. 24].

Качественно новый этап развития современного общества характеризуется переходом к шестому технологическому укладу, ядром которого являются информационные технологии, нанотехнологии, молекулярная биология, искусственный интеллект. Сфера высоких технологий развивается благодаря человеку, его интеллекту и накопленной базе знаний. Объекты промышленной собственности, как результат интеллектуального труда, способствуют созданию наукоемкой продукции и занимают все большее место на рынке, определяя конкурентоспособность страны на мировом рынке технологий.

В условиях построения экономики знаний и стремительного развития нового технологического уклада, создание объектов интеллектуальной собственности (ОИС) сопровождается высоким уровнем риска, при этом снижение степени неопределенности достаточно ограничено. Для эффективного управления процессом создания и использования ОИС следует постоянно решать задачи, связанные с

идентификацией, оценкой и минимизацией рисков в сфере интеллектуальной деятельности.

Целью исследования является классификация и систематизация рисков, возникающих на рынке прав интеллектуальной собственности, присущих системе управления рисками интеллектуальной деятельности и позволяющих минимизировать степень неопределенности в сфере интеллектуальной собственности.

### Риски управления интеллектуальной собственностью

Под понятием управление интеллектуальной собственностью следует понимать деятельность организующего, координирующего, аналитического характера, направленную на эффективное использование интеллектуальной собственности [2, с. 6].

Промышленная собственность – один из видов ОИС, относительно которой исследование механизма управления рисками наиболее актуально, т. к. эти объекты непосредственно связаны с инновационной деятельностью, долгосрочными вложениями, коммерческой реализацией результатов интеллектуальной деятельности, окупаемостью инвестиций.

Промышленная собственность – совокупность правовых норм, регулирующих отношения, возникающие в связи с созданием, использованием и введением в хозяйственный оборот таких объектов, как изобретения, полезные модели, промышленные образцы, топологии интегральных микросхем, селекционные достижения, секреты производства и средства индивидуализации участников гражданского оборота, товаров, работ и услуг [2, с. 13].

Права, возникающие на результаты интеллектуальной деятельности, представляют собой особую категорию исключительных прав, в связи с чем составляющие риска в этой сфере определенно имеют специфические особенности, характерные этой сфере деятельности. Поскольку каждый объект интеллектуальной собственности уникален по определению, в интеллектуальной деятельности следует учитывать уникальный набор рисков, обусловленных уникальными условиями создания и использования этих объектов. Безусловно, и общие виды рисков, свойственные любой хозяйственной и проектной деятельности остаются актуальными и для деятельности интеллектуальной.

Риск интеллектуальной деятельности в общем виде характеризуется неопределенностью, связанной с возможностью возникновения в ходе создания и использования объектов промышленной собственности неблагоприятных ситуаций и последствий. Под неопределенностью понимается неполнота или неточность информации об условиях реализации идеи создания объекта, в том числе связанных с этим процессом затратами и результатами.

Трудности принятия решений в сфере интеллектуальной собственности обусловлены, во-первых, значительной степенью неопределенности будущих условий, в которых будет происходить коммерциализация результатов, во-вторых, возможной противоречивостью сравнительных оценок стоимости ОИС.

При управлении правами на интеллектуальную собственность особое внимание следует обратить на стадию жизненного цикла изобретения или другого объекта промышленной собственности, т. е. стадии создания и продвижения интеллектуальных продуктов, в связи с чем всю совокупность видов риска в сфере интеллектуальной деятельности укрупненно можно классифицировать по следующим признакам:

- риски, связанные с природой научно-технической деятельности: идея, фундаментальные исследования, прикладные исследования, получение результата интеллектуальной деятельности;
- риски, связанные с коммерческим использованием ОИС, как продуктом на рынке интеллектуальной собственности.

Начальной точкой первого этапа можно считать время **формулирования идеи**. Идея может появиться как в процессе деятельности, так и на базе более ранних научных исследований. Широкий взгляд на идею предусматривает не только её техническое решение, но и идею коммерциализации технологической разработки, результаты реализации которой предусматривают повышение конкурентоспособности технологии или продукта, идею бизнеса, основанного на новой технологии или новом продукте.

В процессе разработки идеи, на основе патентной информации о последних достижениях науки и техники, проводятся **патентные исследования** с целью обоснования идеи. Анализируется уровень технической сложности идеи, новизна технологии, технический уровень и тенденции развития объектов техники, патентоспособность и патентная чистота, конкурентоспособность реализуемой идеи.

**Фундаментальные научные исследования** – теоретические и (или) экспериментальные исследования, направленные на получение новых знаний об основных закономерностях развития природы, человека, общества, искусственно созданных объектов. Фундаментальные научные исследования могут быть ориентированными, то есть направленными на решение научных проблем, связанных с практическими приложениями [3].

Риск фундаментальных исследований – это всегда совокупность рисков, включающая как научные риски, так и риски, связанные с конкретными экономическими условиями, а также риски, связанные с неэффективностью организации и управления, среди которых можно выделить:

- риски неточного выбора направления разработки;
- риски возможности получения отрицательного научного результата;
- риски нарушения прав собственников охраняемых документов на ОИС;
- риски длительности научных исследований, увеличения планируемых сроков получения научных результатов, в связи с чем появляется вероятность столкнуться с риском морального устаревания новой разработки;
- риски отсутствия взаимосвязи с дальнейшими прикладными научно-исследовательскими работами;
- риски утечки информации, как преднамеренной, так и неумышленной.

Почти все фундаментальные исследования финансируются государством, результаты же этих исследований используются наукой для дальнейшего развития. В процессе фундаментальных научных исследований результатами выступают теоретические разработки, порой не ориентированные ещё на внедрение в производство. Результаты оценки фундаментальных исследований могут быть использованы при определении перспективных научных направлений, в связи с чем не подлежат оценке, имеющей чёткие критерии экономической эффективности и сроков окупаемости. Очевидно, что вложения средств в

фундаментальные исследования не дают быстрой отдачи, эффективности от вложений проявляется через некоторое время, финансирование научных исследований – это инвестиции в будущее.

**Прикладные научные исследования** – исследования, направленные на применение результатов фундаментальных научных исследований для достижения конкретных практических целей [3].

Результатом прикладных исследований в области техники и технологий являются новые технические решения, которые могут иметь промышленное применение, т. е. могут быть использованы для создания новой наукоёмкой продукции, новых технологий.

К рискам, имеющим место на этапе фундаментальных исследований, присоединяются дополнительные, среди которых можно выделить:

- научно-технические риски, связанные с разработкой технического решения;
- риски финансирования и материальной обеспеченности исследований;
- риски получения непатентоспособного результата;
- риски низкого потенциала коммерческой реализации объекта промышленной собственности;
- риски, связанные с компетентностью сотрудников, их квалификацией;
- риски, связанные с разглашением конфиденциальных сведений.

После проведения патентного поиска и научно-технических исследований, необходимо реализовать техническое решение, производя экспериментальные испытания. **Опытно-конструкторские разработки** – это исследования, которые направлены на внедрение в практику результатов фундаментальных и прикладных исследований. Разработки направлены на производство новых или усовершенствование существующих продуктов или процессов. Результаты исследований и разработок, как творческого труда авторов, являются объектами интеллектуальной собственности.

Очевидно, что на разных этапах величина риска неодинакова: риск получения предполагаемых результатов на стадии фундаментальных исследований не превышает 5–10 %, риск на стадии прикладных научных разработок – 80–90 %, на стадии проектно-конструкторских разработок – 90–95 % [4, с. 288].

Следующий этап – **правовая охрана** полученного результата интеллектуальной деятельности предусматривает подачу заявки на оформление прав с сопутствующим пакетом документов на регистрацию объекта и выдачу охранного документа на ОИС. На этом этапе организация принимает ряд важных решений, связанных с выбором вида объекта патентования, с территориальным ограничением патента, с привлечением к процессу патентования патентных поверенных и др.

На этом этапе важно определить стратегию правовой охраны объекта, с целью избежать возможности дублирования технологии недобросовестными конкурентами. Если речь идет об устройстве, автор может осуществлять свой выбор между получением патента на изобретение или полезную модель, либо использовать результат интеллектуальной деятельности в режиме коммерческой тайны (ноу-хау). Изобретение по сравнению с полезной моделью имеет более длительные сроки охраны, однако более строгие условия патентования и более длительные сроки рассмотрения заявки. Преимущество ноу-хау заключается в том, что для данного объекта не требуется процедура регистрации и связанные с этим временные и финансовые затраты, при должной охране информации данный объект не имеет ограничений по времени использования. Охрана объекта в режиме коммерческой тайны является неплохим альтернативным вариантом и снижением рисков утраты прав на изобретение.

Процедура патентования в общем виде обусловлена следующими видами рисков:

- риск несвоевременного патентования, последствиями которого выступает упущенная выгода приобретения монопольных преимуществ владения технологией либо продуктом;
- риск, связанный с проведением процедуры патентования (неправильное оформление документов, отказ в выдаче охранного документа);
- риск, связанный с финансовыми потерями в случае отказа в выдаче охранного документа (патента или свидетельства).

Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ обычно требуют значительных затрат, и компенсировать убытки возможно только на этапе внедрения ОИС в хозяйственный оборот.

**Этап коммерческого использования** полученных результатов научно-технической деятельности включает освоение интеллектуального продукта и выпуск новой продукции на потребительский рынок, в связи с чем основными экономическими результатами на этом этапе выступают объем наукоёмкой продукции, показатели экспорта высокотехнологичной продукции [5, с. 105].

Этап коммерческой реализации объекта промышленной собственности представляет собой плодотворный период его жизненного цикла. На этом этапе обладатели исключительных прав на ОИС имеют возможность окупить затраты, связанные с созданием объекта, правовой охраной, доведением объекта до готовности использования и получить планируемый доход.

В случае использования полученного результата интеллектуальной деятельности в собственном производстве, производитель получает доход от реализации инновационной продукции. Одновременно с увеличением используемых объектов интеллектуальной собственности, ростом конкуренции на рынках товаров и услуг, растет количество нарушений прав на ОИС и связанные с этим явлениями риски:

- риск неполучения дохода, обеспечивающего окупаемость затрат в запланированные сроки;
- риск неправильного прогноза спроса на продукцию, производимую с использованием ОИС;
- риск перерасхода средств на освоение производства;
- риск неиспользования ОИС;
- контрафактное производство товаров на рынке;
- появление аналогичной продукции, производство которой основано на других ОИС;
- риск морального износа технического решения;
- риск недобросовестной конкуренции на рынке;
- риск нарушения прав на объект интеллектуальной собственности;
- риск ограничения сроков охранного документа.

Если же обладатель прав на ОИС выходит на рынок с созданным объектом, возникает ряд специфических рисков, свойственных отношениям, связанным с востребованностью объекта на рынке, с формой передачи прав, с оценкой объекта, с оплатой лицензионного соглашения.

Потребитель результатов научных исследований, оформленных в форме объекта промышленной собственности, является бизнес, т. е. конкретный производитель. Этап коммерциализации ОИС предусматривает переход объекта из сферы науки, сферу бизнеса, выступая в товарной форме.

В первую очередь, следует отметить, что реализовать возможность внедрения ОИС в производство совсем не просто. В соответствии со статистикой Роспатента, в Российской Федерации успешная коммерциализация предусматривает 6 % зарегистрированных объектов интеллектуальной собственности, в Республике Беларусь данные отсутствуют. Основными рисками на этапе выхода ОИС на рынок выступают:

- риск невостребованности научных разработок бизнесом, невозможность внедрения;
- риск неразвитости инфраструктуры рынка интеллектуальной собственности;
- низкий уровень информированности бизнеса о появлении новых результатов интеллектуальной деятельности;
- появление аналогичных продуктов.

Основной формой передачи имущественных прав являются лицензионные соглашения, и в зависимости от выбора вида лицензии, участники соглашения могут столкнуться с юридическими и экономическими рисками.

Используемые в практической деятельности методы оценки стоимости объектов интеллектуальной собственности имеют свои преимущества и недостатки и соответствующие им риски.

Затратный подход – совокупность затрат, прямо или косвенно связанных с разработкой ОИС, для реализации прав на рынке интеллектуальной собственности практически непригоден и может быть использован лишь в совокупности с другими методами. Несмотря на простоту применения и доступность реально и достоверной информации для оценки, включает в себя риск неопределенности в оценке потенциала новой разработки и несоразмерность затрат на создание с потоком доходов, связанных с использованием объекта оценки.

Доходный подход является универсальным, теоретически обоснованным и практически применяемым в стоимостной оценке объектов интеллектуальной собственности. Базируется доходный подход на определении будущих денежных потоков за определенный период времени, ожидаемых от использования объекта оценки. Используемые методы отражают интересы участников сделки, учитывая временной фактор стоимости будущих денежных потоков, представляют потенциальную доходность приобретения прав на ОИС с учетом рисков через ставку дисконтирования. Риски, связанные с использованием методов доходного подхода, проявляются:

- в вероятностном характере прогнозов прибыли от использования ОИС;
- прогнозом подходе определения ставки дисконтирования;
- риске освоения и реализации продукции по лицензии;
- допустимости появления новых, более эффективных технологий в течение действия лицензии.

Рыночный (сравнительный) подход предполагает определение стоимости ОИС по цене осуществленных сделок, аналогичных объектов, с учетом специфических особенностей оцениваемых объектов. Несмотря на возможность определения стоимости объекта на основе фактической конъюнктуры рынка, использование рыночного подхода сопровождается риском отсутствия полной и достоверной информации рынка интеллектуальной собственности и сложностью использования данного подхода в связи с уникальностью оцениваемого объекта.

Характер и условия платежа при заключении лицензионных соглашений могут выступать в форме паушального (единовременного) платежа, роялти (периодических отчислений), комбинированных платежей. Факторы, формирующие стоимость лицензии в одной из форм, выступают в качестве вероятных рисков. Среди них определение ставки роялти, базы роялти и ставки дисконтирования.

**Система управления рисками** предполагает комплекс мер, направленных на снижение вероятности возникновения неблагоприятных событий и уменьшение возможного ущерба последствий при наступлении проблемы, и включает в себя всесторонний анализ всей совокупности имеющихся рисков, их идентификацию, качественную и количественную оценки и выработку механизма контроля. Эффективное управление рисками позволяет снизить вероятность наступления рискованных ситуаций.

### Заключение

На практике процессы в сфере интеллектуальной деятельности сопряжены с существенной неопределенностью и множеством потенциальных ошибок на каждом этапе жизненного цикла. Важно понимать источники такой неопределенности и потенциальных ошибок для управления рисками в процессе создания объектов промышленной собственности, проведении патентных исследований и коммерциализации результатов технического творчества.

Просчитать все возможные последствия наступления рискованной ситуации практически невозможно. Поэтому задачей управления рисками является, в первую очередь, предотвращение наступления рискованных ситуаций и неблагоприятных их последствий или снижение ущерба от них.

Компенсируются риски эффективным управлением интеллектуальной деятельностью на предприятии, получением дохода от использования ОИС, грамотной патентной политикой и высоким уровнем конкурентоспособности на рынке.

Таким образом, на предприятии необходимо создавать мощную систему управления интеллектуальной собственностью, способствующую интеллектуальному и экономическому развитию компании, систему, учитывающую вышеизложенные особенности управления ОИС на каждом из этапов их жизненного цикла [7, с. 145].

**Список цитированных источников**

1. Леонтьев, Б. Б. От интеллектуального права к интеллектологии / Б. Б. Леонтьев, В. Б. Леонтьева // Мониторинг правоприменения. – 2022. – № 1 (42). – С. 12–28.
2. Ермакова, Э. Э. Основы управления интеллектуальной собственностью : электронный учебно-методический комплекс / Э. Э. Ермакова. – Брест : БрГТУ, 2022. – 128 с.
3. О научной деятельности [Электронный ресурс] : Закон Респ. Беларусь от 21.10.1996 № 708-XIII : с изм. и доп. от 04.01.2021 №74-З // iLex. – Режим доступа <https://ilex-private.ilex.by/view-document>. – Дата доступа: 20.01.2024.
4. Глухов, В. В. Экономика знаний : учебник / В. В., Глухов, С. Б. Коробко, Т. В. Маринина. – СПб. : Питер, 2003. – 528 с.
5. Ермакова, Э. Э. Оценка эффективности научных исследований и разработок в Беларуси / Э. Э. Ермакова, М. П. Мишкова // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 1 (124). – С. 104–106.
6. Цибулев, П. М. Управление интеллектуальной собственностью : монография / П. М. Цибулев, В. П. Чеботарев, В. Г. Зиновий ; под ред. П. М. Цибулева. – К. : «К.І.С.», 2005. – 184 с.

**References**

1. Leont'ev, B. B. Ot intellektual'nogo prava k intellektologii / B. B. Leont'ev, V. B. Leont'eva // Monitoring pravoprimereniya. – 2022. – № 1 (42). – S. 12–28.
2. Ermakova, E. E. Osnovy upravleniya intellektual'noj sobstvennost'yu : elektronnyj uchebno-metodicheskij kompleks / E. E. Ermakova. – Brest : BrGTU, 2022. – 128 s.
3. O nauchnoj deyatel'nosti [Elektronnyj resurs] : Zakon Resp. Belarus' ot 21.10.1996 № 708-XIII : s izm. i dop. ot 04.01.2021 №74-Z // iLex. – Rezhim dostupa <https://ilex-private.ilex.by/view-document>. – Data dostupa: 20.01.2024.
4. Gluhov, V. V. Ekonomika znanij : uchebnik / V. V., Gluhov, S. B. Korobko, T. V. Marinina. – SPb. : Piter, 2003. – 528 s.
5. Ermakova, E. E. Ocenka effektivnosti nauchnyh issledovanij i razrabotok v Belarusi / E. E. Ermakova, M. P. Mishkova // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2021. – № 1 (124). – S. 104–106.
6. Cibulev, P. M. Upravlenie intellektual'noj sobstvennost'yu : monografiya / P. M. Cibulev, V. P. Shebotarev, V. G. Zinovij ; pod red. P. M. Cibuleva. – K. : «K.I.C.», 2005. – 184 s.

*Материал поступил 01.02.2024, одобрен 15.03.2024, принят к публикации 15.03.2024*

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОДВИЖЕНИЮ БРЕНДА УНИВЕРСИТЕТА В ЦИФРОВОЙ СРЕДЕ

*Е. А. Дербинская*

*Магистр экономических наук, 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 ужесточением конкуренции между университетами актуальной является проблема брендинга университета в цифровой среде. Брендинг университета в цифровой среде способствует продвижению образовательных продуктов и научно-технической продукции университета, приводит к росту востребованности его выпускников на рынке труда. Важное значение бренд университета имеет на международном рынке образовательных услуг, т. к. сильный бренд способен привлечь большее количество иностранных абитуриентов, поступающих в университет.

Целью данной работы является разработка модели цифровых маркетинговых коммуникаций университета, учитывающей особенности университета как объекта исследования и специфику цифровых маркетинговых коммуникаций.

**Ключевые слова:** бренд университета, брендинг, цифровые маркетинговые коммуникации, маркетинговые инновации, контент, цифровые каналы коммуникаций.

## INNOVATIVE APPROACHES TO PROMOTION OF THE UNIVERSITY BRAND IN THE DIGITAL ENVIRONMENT

*E. A. Derbinskaya*

### Abstract

Currently, due to increased competition between universities, the problem of university branding in the digital environment is relevant. University branding in the digital environment contributes to the promotion of educational products and scientific and technical products of the university, leading to an increase in the demand for its graduates in the labor market. The university brand is important in the international market of educational services, because a strong brand can attract more international applicants to the university.

The purpose of this work is to develop a model of digital marketing communications for a university, taking into account the characteristics of the university as an object of research and the specifics of digital marketing communications.

**Keywords:** university brand, branding, digital marketing communications, marketing innovations, content, digital communication channels.

### Введение

Современное общество характеризуется быстрым изменением и развитием коммуникаций во всех сферах его жизнедеятельности, в том числе в национальной и интернациональной сферах производства и оказания услуг. Коммуникации играют огромную роль в деятельности современных университетов, являясь одним из важнейших условий их существования и развития. Продвижение университета, представляющее собой целенаправленную деятельность по информированию его целевой аудитории о продуктах и услугах университета, предполагает формирование эффективной коммуникационной политики. Эффективная коммуникационная политика университета является одним из условий установления выгодных долгосрочных взаимоотношений с целевой аудиторией и способствует повышению конкурентоспособности университета в условиях постоянно изменяющейся рыночной среды.

Маркетинговые коммуникации университета, как основа коммуникационной политики, призваны решать задачи установления, поддержания и укрепления выгодных долгосрочных взаимоотношений с субъектами маркетинговой среды для достижения маркетинговых целей университета.

### Основная часть. Продвижение бренда университета

За годы возникновения, формирования и развития современного маркетинга сущность маркетинговых коммуникаций, а также их виды, уровни, концепции, средства, формы, каналы, инструменты и механизм управления значительно изменялись. На маркетинговые коммуникации влияет множество факторов, среди которых особое влияние оказывает эволюция мирового хозяйства, рост объемов промышленного производства и торговли товарами, появление информационно-коммуникационных технологий, формирование цифровой экономики, изменение поведения потребителей.

В научной литературе понятие маркетинговых коммуникаций предприятия стало активно применяться зарубежными учеными

в середине XX века, при этом единый подход в понимании маркетинговых коммуникаций ни зарубежными, ни отечественными учеными не выработан.

Проблема определения сущности маркетинговых коммуникаций находит широкое обсуждение в трудах современных маркетологов. Наиболее содержательными работами, которые отражают сущность данного термина, по праву считаются труды Дж. Р. Росситера, Дж. Бернета, С. Мориарти, Ф. Котлера, Ж.-Ж. Ламбена, Л. Игл, Л. Д. Келли и других авторов [1–6]. Плюрализм точек зрения в трактовке маркетинговых коммуникаций показывает сложность и емкость данного понятия, а также говорит о его постоянной эволюции, которой способствует множество факторов. Актуальным подходом к определению маркетинговых коммуникаций является подход Е. В. Ромата, который рассматривает маркетинговые коммуникации в качестве «мероприятий, направленных на установление и поддержание определенных взаимоотношений предприятия с адресатами коммуникаций» [6]. Важной особенностью трактовки маркетинговых коммуникаций, предлагаемой автором, является установление и поддержание взаимоотношений между предприятиями и целевыми аудиториями. Это существенное отличие подчеркивает изменение характера маркетинговых коммуникаций, которое должно быть учтено при разработке стратегии маркетинговых коммуникаций университета.

Отличительным особенностям маркетинговых коммуникаций учреждений высшего образования (далее – УВО) на рынке образовательных услуг посвящены работы О. С. Баталовой, Е. А. Кавериной, И. А. Жарской, Р. П. Гафилина, С. А. Левиной, Н. Г. Надеиной, П. Коку, В. Барнетта, С. Бенгстен, Т. Кимура [7,8, 9–12].

Одним из этапов брендинга университета является формирование комплекса маркетинговых коммуникаций, который учитывал бы особенности продуктов университета, особенности целевой аудитории университетов. Классический комплекс маркетинговых коммуникаций университета можно рассматривать как специфическое сочетание основных и синтетических средств маркетинговых коммуникаций, используемых университетом для формирования бренда.

Основными средствами маркетинговых коммуникаций являются: реклама, стимулирование сбыта, связь с общественностью и прямой маркетинг. К синтетическим средствам маркетинговых коммуникаций относятся: спонсорство, участие в выставках, интегрированные маркетинговые коммуникации в месте продажи, (т. е. в университете), событийный (ивент) маркетинг, продакт-плейсмент, фирменные идентифицирующие маркетинговые коммуникации и адвертейминг. Обособленную позицию занимают неформальные вербальные маркетинговые коммуникации (слухи, создаваемые университетом для достижения маркетинговых и коммуникационных целей), которые способствуют формированию ассоциаций с брендом.

Маркетинговые коммуникации университета предполагают создание и использование определенного контента, который применяется в средствах и каналах коммуникации. Классификация контента, используемого в маркетинговых коммуникациях университета, представлена в таблице 1.

**Таблица 1** – Классификация контента, используемого в маркетинговых коммуникациях университета

Критерий	Виды контента
Влияние на органы чувств целевой аудитории	– визуальный; – аудиоконтент; – графический; – текстово-графический; – аудиовизуальный
Характер информации	– информационный; – развлекательный; – интерактивный (вовлекающий); – рекламный; – образовательный
Создатель контента	– собственный контент университета; – пользовательский контент
Канал коммуникации	– офлайн-контент; – онлайн-контент

Примечание: разработка автора на основе [6–14]

Виды контента, представленные в таблице 1, отражают содержание информации, при этом положительный эффект от создания и использования контента связан не только с его видом, но и с каналами маркетинговых коммуникаций, по которым он передается целевой аудитории университета и без которых невозможна реализация стратегии маркетинговых коммуникаций университета. На развитие каналов маркетинговых коммуникаций огромное влияние оказывает прогресс в научно-технической сфере, способствующий появлению новых технических средств связи, меняющих также характер маркетинговых коммуникаций и оказывающий влияние на систему и процесс маркетинговых коммуникаций.

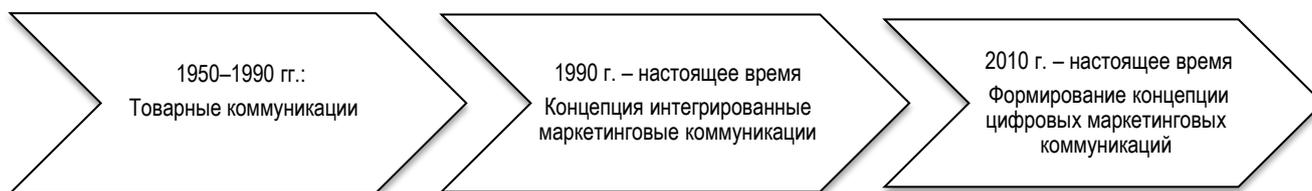
Традиционными каналами маркетинговых коммуникаций университета являются телевидение, радио, печатная пресса. При продвижении бренда университета необходимо учитывать их преимущества и недостатки с учетом специфики целевой аудитории.

В настоящее время традиционные каналы коммуникации являются эффективным способом коммуникации с определенными сегментами целевой аудиторией, но в силу своих технических особенностей данные каналы не позволяют выстраивать длительные взаимоотношения с целевой аудиторией университета.

Благодаря научно-техническому прогрессу, произошедшему в начале 90-х гг. XX века, принципиально новые средства записи, хранения, передачи и воспроизведения информации, такие как компьютерная техника, мобильные телефоны и Интернет, привели к формированию цифровой среды. О. В. Сюнтюренок считает, что «цифровая среда включает весь континуум компьютерных и сетевых технологий. Базовым компонентом макроструктуры глобальной цифровой среды являются системы и сети телекоммуникаций, прежде всего интернет: давно сложившийся и самый большой сегмент сети web 1; сегмент социальных сетей и платформ web 2; растущий наиболее быстрыми темпами web 3; сегмент мобильных приложений; платёжно-расчётные сети (например, PayPal, SWIFT, Bitcoin); сегмент встроенных специализированных процессоров различных объектов производственной, социальной, городской инфраструктуры (так называемый интернет вещей), а также встроенных чипов медицинских имплантов, игрушек, одежды (так называемый бодинет), соединённых посредством интернета с управляющими центрами.

Медийный подход определяет цифровую среду как цифровое представление медийной платформы и технологий общения. При этом медиа рассматриваются достаточно широко: это не столько средства массовой информации, сколько аспекты социальной и культурной жизни, включающие городскую навигацию и даже межличностные отношения, переведённые в цифровую форму. Данный подход предполагает, что цифровые технологии стирают границы между создателем и потребителем контента, приводят к слиянию процессов производства и управления.

Таким образом, цифровая среда – новая среда, которая позволяет университетам повысить эффективность своей коммуникационной политики и брендинга благодаря тому, что изменяет географические границы коммуникаций с целевой аудиторией, увеличивает скорость и объёмы передаваемой и получаемой информации, делает доступным интерактивное общение и позволяет разным формам коммуникации объединиться в единое целое мультимедиа» [15]. Объединяя в себе и средство коммуникации, и средство хранения и передачи информации во времени, цифровая среда стала единым универсальным каналом маркетинговой и социальной коммуникации, позволяющим университету выстраивать долгосрочные взаимоотношения с целевыми аудиториями. Эволюция концепций маркетинговых коммуникаций, основанная на техническом развитии каналов маркетинговых коммуникаций, представлена на рисунке 1.

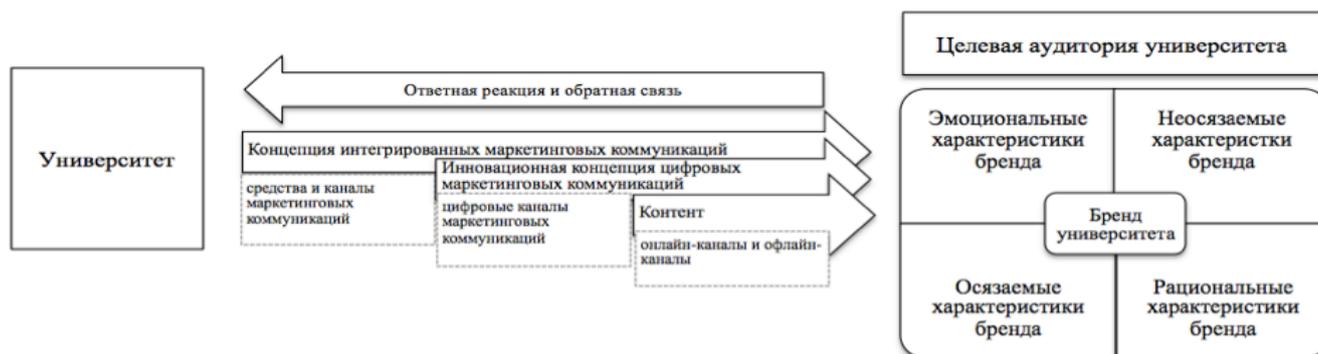


**Рисунок 1** – Эволюция концепций маркетинговых коммуникаций, основанная на техническом развитии каналов маркетинговых коммуникаций. Примечание: разработка автора на основе [9; 12]

Концепция интегрированных маркетинговых коммуникаций, применяемая университетами при брендинге, позволяет университетам консолидировать расходы на маркетинговые коммуникации и более четко планировать сами коммуникационные кампании и их финансирование, а также координировать действия всех подразделений университета. В то же время инновационные каналы коммуникаций позволяют университетам успешно перейти к инновационной концепции цифровых маркетинговых коммуникаций, целью которой является

выстраивание долгосрочных взаимоотношений с целевыми аудиториями университета с возможностью интерактивного взаимодействия.

Таким образом, современный инновационный комплекс маркетинговых коммуникаций университета и применяемые при брендинге университета инновационные концепции маркетинговых коммуникаций открывают новые возможности для построения сильного бренда университета, ориентированного на структуру бренда, включающую его рациональные, эмоциональные, осязаемые и неосозаемые характеристики (рисунок 2).



**Рисунок 2** – Продвижение бренда университета с учетом инновационной концепции цифровых маркетинговых коммуникаций.  
Примечание: разработка автора

Использование комплекса средств маркетинговых коммуникаций для формирования бренда университета предполагает применение офлайн-каналов коммуникаций и онлайн-каналов коммуникаций, позволяющих выстраивать долгосрочные взаимоотношения с целевой аудиторией, что соответствует инновационной концепции цифровых маркетинговых коммуникаций.

Исходя из точек контакта бренда университета с целевыми аудиториями на рынке образовательных услуг, рынке научно-технической продукции и услуг и рынке труда, университетом определяются соответствующие офлайн- и онлайн-каналы маркетинговых коммуникаций в цифровой среде.

В современных условиях развития экономики оптимальным подходом к формированию бренда университета является омниканальное продвижение, предполагающее построение системы, которая свяжет между собой все каналы коммуникации университета в единое целое.

При этом ключевую роль в продвижении университета должны получить инновационные цифровые маркетинговые коммуникации, позволяющие осуществлять взаимодействие и выстраивать долгосрочные взаимоотношения с целевой аудиторией как на внутреннем, так и внешнем рынке. Использование цифровых маркетинговых коммуникаций позволит университетам достичь таких целей брендинга, как увеличение количества обучающихся студентов (в т. ч. иностранных студентов), рост объема продаж научно-технической продукции и услуг, формирование лояльности целевой аудитории, построение положительного имиджа на рынке образовательных услуг, рынке труда и рынке научно-технической продукции и услуг.

Цифровые маркетинговые коммуникации как инновационный инструмент брендинга университета имеют ряд преимуществ, которые свойственны только им. Преимущества использования цифровых маркетинговых коммуникаций для продвижения бренда университета:

- преодоление географических и временных границ коммуникаций с целевой аудиторией;
- снижение культурных и языковых барьеров в коммуникации с целевой аудиторией;
- обеспечение интерактивного взаимодействия с целевой аудиторией;
- сбор информации об интересах, предпочтениях и поведении целевой аудитории в цифровой среде, а также мониторинг и анализ их изменений;
- сбор контактной информации о целевой аудитории для выстраивания долгосрочных взаимоотношений с потребителями;
- формирование и укрепление положительного имиджа университета на рынке образовательных услуг, рынке труда и рынке научно-технической продукции и услуг;
- повышение лояльности целевых аудиторий университета.

На основе используемых каналов привлечения и каналов продаж продуктов университета автором предложена модель цифровых маркетинговых коммуникаций, включающая цифровые онлайн и офлайн-каналы маркетинговых коммуникаций. Данная модель предполагает обязательное создание и использование информационного, рекламного, образовательного, развлекательного, интерактивного и пользовательского контента (рисунок 3).

Применение модели цифровых маркетинговых коммуникаций предполагает использование основных и синтетических средств цифровых маркетинговых коммуникаций, которые обладают отличительными характеристиками, возникающими благодаря особенностям цифровой среды, в которой они используются. В цифровой среде неформальные вербальные маркетинговые коммуникации приобретают особые черты и способствуют становлению вирусного маркетинга. Вирусный маркетинг предполагает воздействие на целевую аудиторию, продвижение товаров и услуг за счет и силами самой целевой аудитории, добровольно (осознанно или не осознанно) участвующей в распространении информации об университете.

Рекомендации по использованию модели цифровых маркетинговых коммуникаций при брендинге университета обусловлены их характеристиками:

- непосредственный характер коммуникаций с целевой аудиторией. Для подавляющего большинства коммуникаций этого типа характерно отсутствие посредников между целевой аудиторией и университетом;
- интерактивный характер взаимодействия с целевой аудиторией;
- оперативность коммуникации с целевой аудиторией, ответную реакцию в режиме реального времени;
- личностный характер взаимоотношений с целевой аудиторией;
- независимость цифровых маркетинговых коммуникаций от географических границ, что способствует привлечению иностранных студентов;
- значительно большие возможности по сравнению с традиционными маркетинговыми коммуникациями для геймификации взаимодействия с целевыми аудиториями;
- большие возможности по сравнению с традиционными инструментами маркетинговых коммуникаций по измерению эффективности маркетинговых усилий;
- относительная независимость университета от канала коммуникации при размещении контента по сравнению с традиционными маркетинговыми коммуникациями;
- возможность таргетировать большинство сообщений университета;
- активное участие целевой аудитории в процессе коммуникации;
- возможность целевой аудитории влиять на контент университета посредством быстрой обратной связи;
- возможность прямого участия целевой аудитории в создании цифрового контента университета;
- возможность внутренней целевой аудитории университета влиять на мнение внешней целевой аудитории.

При продвижении бренда университета рекомендуется использовать инновационные каналы цифровых маркетинговых коммуникаций, являющихся совокупностью каналов привлечения покупателей услуг и продуктов университета и каналов продаж. Важнейшим требованием к формированию эффективного канала цифровых маркетинговых коммуникаций университета выступает обеспечение доступности сообщения для целевой аудитории и соответствие его характеристикам избранной целевой аудитории.

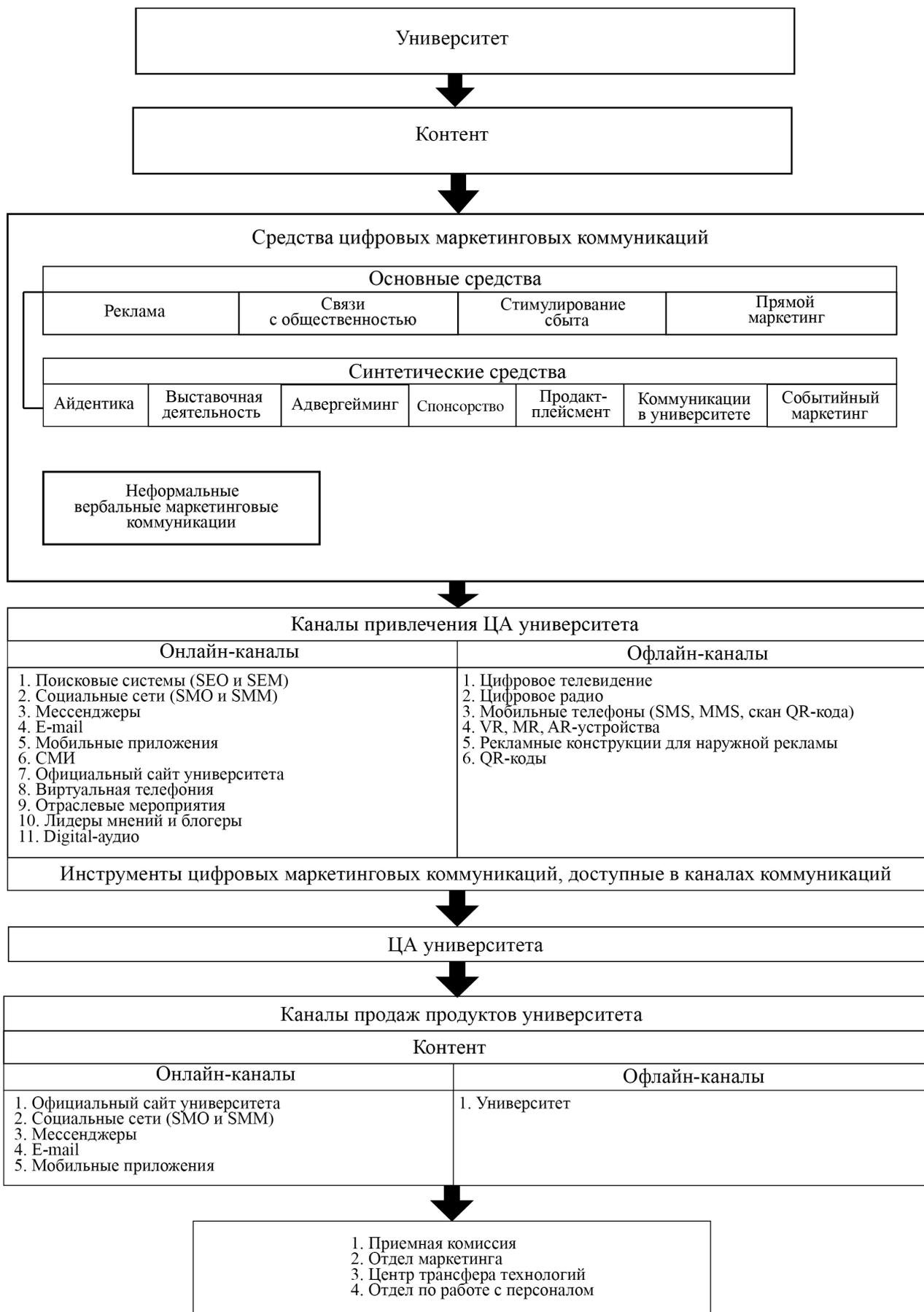


Рисунок 3 – Модель цифровых маркетинговых коммуникаций университета. Примечание: разработка автора

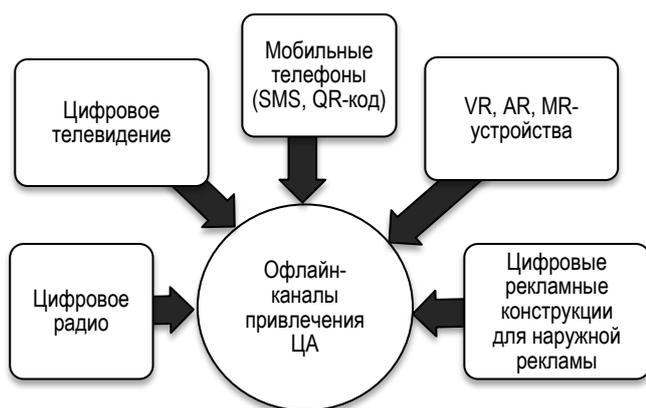
Каналы привлечения потребителей университета – это каналы, создающие поток запросов от потенциальных покупателей образовательных услуг и научно-технической продукции университета. Online-каналы привлечения целевой аудитории университета представлены в таблице 2.

**Таблица 2** – Online-каналы привлечения целевой аудитории университета

Канал	Характеристика
Поисковые системы	Google, Yandex, Baidu
Социальные сети	TikTok, Douin, ВКонтакте, Instagram, Одноклассники, Facebook, LinkedIn, Twitter
Мессенджеры	Telegram, WhatsApp, Viber, WeChat
E-mail	Сервисы электронной почты, корпоративная почта университета
Мобильные приложения	Собственные мобильные приложения университета, сторонние мобильные приложения
Online СМИ	Внутренние СМИ университета, внешние СМИ
Сайт	Корпоративный сайт университета, тематические сайты-каталоги, форумы
Отраслевые виртуальные мероприятия	Выставки, семинары, конференции, тренинги, презентации, дни открытых дверей университета
Лидеры мнений, блогеры	Лидеры мнений у целевых аудиторий университета
Digital-аудио	Стриминговые сервисы, голосовые помощники

Примечание: разработка автора

Онлайн-каналы цифровых маркетинговых коммуникаций позволяют взаимодействовать с целевой аудиторией вне зависимости от географического места проживания и места нахождения целевой аудитории, времени, социокультурных особенностей целевой аудитории университета. Офлайн-каналы привлечения целевой аудитории университета, представленные на рисунке 4, дополняют онлайн-каналы коммуникации, при этом их функционирование зачастую требует наличия интернет-соединения.



**Рисунок 4** – Офлайн-каналы привлечения целевой аудитории университета. Примечание: разработка автора

Каналы привлечения целевой аудитории могут переводить целевую аудиторию университета как в каналы продаж, так и напрямую в отделы продаж образовательных услуг и научно-технических продуктов университета.

Переход целевой аудитории университета в отдел продаж или центр трансфера технологий может также осуществляться через каналы продаж, минуя каналы привлечения целевой аудитории. Канал продаж – это путь, через который клиенты попадают в компа-

нию, чтобы заказать интересующие их товары и услуги. Иерархии в этой системе не существует, поэтому автором предложен подход к систематизации цифровых каналов привлечения и каналов продаж услуг и продуктов университета, представленный на рисунке 3.

Реализация цифровых маркетинговых коммуникаций позволит университету использовать инновационные инструменты продвижения бренда, не доступных университету в офлайн-среде.

**Заключение**

Основными компонентами в предлагаемой автором модели цифровых маркетинговых коммуникаций университета являются контент, основные и синтетические средства цифровых маркетинговых коммуникаций, каналы привлечения покупателей образовательных услуг и научно-технической продукции, инструменты привлечения покупателей и каналы продаж продуктов университета.

**Список цитированных источников**

1. Росситер, Д. Р. Реклама и продвижение товаров / Д. Р. Росситер, Л. Перси ; пер. с англ. М. Бугаев [и др.]. – СПб. : Питер, 2000. – 651 с.
2. Бернет, Д. Маркетинговые коммуникации: интегрированный подход / Д. Бернет, С. Мориарти ; под общ. ред. С. Г. Божук. – СПб. : Питер, 2001. – 864 с.
3. Котлер, Ф. Основы маркетинга : крат. курс / Ф. Котлер. – М. : Вильямс, 2007. – 656 с.
4. Ламбен, Ж.-Ж. Менеджмент, ориентированный на рынок : учебник / Ж.-Ж. Ламбен, Р. Чумпитас, И. Шулинг ; пер. с англ. И. И. Малкова. – 2-е изд. – СПб. : Питер Пресс : IMISP, 2017. – 927 с.
5. Marketing communications [Electronic resource] / L. Eagle [et al.]. – 2nd ed. – London : Routledge, 2020. – Mode of access: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781003089292/marketing-communications-lyne-eagle-stephan-dahl-barbara-czarnecka-jenny-lloyd>. – Date of access: 21.03.2022.
6. Advertising media planning: a brand management approach [Electronic resource] / L. D. Kelley. – 5th ed. – New York : Routledge, 2022. – Mode of access: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781003258162/advertising-media-planning-larry-kelley-kim-bartel-sheehan-lisa-dobias-david-koranda-donald-jugenheimer>. – Date of access: 12.03.2022.
7. Ромат, Е. В. Реклама / Е. В. Ромат. – 7-е изд. – СПб. : Питер : Лидер, 2008. – 506 с.
8. Надеина, Н. Г. Маркетинг взаимоотношений в высшей школе / Н. Г. Надеина // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2018. – № 3. – С. 14–18.
9. Надеина, Н. Г. Корпоративная культура университета как фактор его конкурентоспособности / Н. Г. Надеина // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2017. – № 3. – С. 6–10.
10. Баталова, О. С. Специфика маркетинговых коммуникаций на рынке образовательных услуг / О. С. Баталова // Международная заочная научная конференция «Экономическая наука и практика: материалы, Чита, февр. 2012 г. / Молодой ученый ; редкол.: Г. Д. Ахметова [и др.]. – Чита, 2012. – С. 110–114.
11. Каверина, Е. А. Организация рекламной деятельности вуза : учеб. пособие / Е. А. Каверина. – СПб. : Кн. дом, 2007. – 184 с.
12. Жарська, І. О. Система маркетингових комунікацій закладу вищої освіти: поєднання «класичних» і «цифрових» інструментів / І. О. Жарська // Бізнес інформ. – 2019. – № 12. – С. 438–446.
13. Гафилин, Р. Р. Маркетинговые коммуникации в сфере образования / Р. Р. Гафилин // Практический маркетинг : материалы IV междунар. студен. науч.-практ. конф., Москва, 24 апр. 2019 г. / Моск. экон. ин-т ; отв. ред. И. Л. Сурат. – М., 2019. – С. 341–343.
14. Лёвина, С. А. Продвижение учебного заведения на рынке образовательных услуг с помощью технологий интегрированных маркетинговых коммуникаций / С. А. Лёвина // Управлен. консультирование. – 2015. – № 6. – С. 173–181.

15. Koku, P. S. Marketing higher education: understanding how to build and promote the university brand [Electronic resource] / P. S. Koku. – London ; New York : Routledge, 2022. – Mode of access: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781003160267/marketing-higher-education-paul-sergius-koku>. – Date of access: 08.01.2022.
16. Barnett, R. Knowledge and the university: reclaiming life [Electronic resource] / R. Barnett, S. Bengtson. – London: Routledge, 2019. – Mode of access: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780429447501/knowledge-university-ronald-barnett-s%C3%B8ren-bengtson>. – Date of access: 24.09.2021.
17. Kimura, T. Internal marketing: another approach to marketing for growth [Electronic resource] / T. Kimura. – London; New York: Routledge, 2017. – Mode of access: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781315622958/internal-marketing-tatsuya-kimura>. – Date of access: 21.09.2021.
18. Сюттюренко, О. В. Цифровая среда: тренды и риски развития / О. В. Сюттюренко // Винити Ран. – 2015. – № 2. – С. 1–7.
9. Nadeina, N. G. Korporativnaya kul'tura universiteta kak faktor ego konkurentosposobnosti / N. G. Nadeina // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2017. – № 3. – С. 6–10.
10. Batalova, O. S. Specifika marketingovykh kommunikacij na rynke obrazovatel'nykh uslug / O. S. Batalova // Mezhdunarodnaya zaochnaya nauchnaya konferenciya «Ekonomicheskaya nauka i praktika : materialy, CHita, fevr. 2012 g. / Molodoy uchenyj ; redkol.: G. D. Ahmetova [i dr.]. – CHita, 2012. – С. 110–114.
11. Kaverina, E. A. Organizaciya reklamnoj deyatel'nosti vuza : ucheb. posobie / E. A. Kaverina. – SPb. : Kn. dom, 2007. – 184 s.
12. ZHars'ka, I. O. Sistema marketingovykh kommunikacij zakladu vishchoj osviti: poednannya «klasicnih» i «cifrovih» instrumentiv / I. O. ZHars'ka // Biznes inform. – 2019. – № 12. – С. 438–446.
13. 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. – С. 341–343.
14. Lyovina, S. A. Prodvizhenie uchebnogo zavedeniya na rynke obrazovatel'nykh uslug s pomoshch'yu tekhnologij integrirovannykh marketingovykh kommunikacij / S. A. Lyovina // Upravlen. konsul'tirovanie. – 2015. – № 6. – С. 173–181.
15. Koku, P. S. Marketing higher education: understanding how to build and promote the university brand [Electronic resource] / P. S. Koku. – London ; New York : Routledge, 2022. – Mode of access: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781003160267/marketing-higher-education-paul-sergius-koku>. – Date of access: 08.01.2022.
16. Barnett, R. Knowledge and the university: reclaiming life [Electronic resource] / R. Barnett, S. Bengtson. – London: Routledge, 2019. – Mode of access: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780429447501/knowledge-university-ronald-barnett-s%C3%B8ren-bengtson>. – Date of access: 24.09.2021.
17. Kimura, T. Internal marketing: another approach to marketing for growth [Electronic resource] / T. Kimura. – London; New York: Routledge, 2017. – Mode of access: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781315622958/internal-marketing-tatsuya-kimura>. – Date of access: 21.09.2021.
18. Syuntyurenko, O. V. Cifrovaya sreda: trendy i riski razvitiya / O. V. Syuntyurenko // Viniti Ran. – 2015. – № 2. – С. 1–7.

#### References

1. Rossiter, D. R. Reklama i prodvizhenie tovarov / D. R. Rossiter, L. Persi ; per. s angl. M. Bugaev [i dr.]. – SPb. : Piter, 2000. – 651 s.
2. Bernet, D. Marketingovyje kommunikacii: integrirovannyj podhod / D. Bernet, S. Moriarti ; pod obshch. red. S. G. Bozhuk. – SPb. : Piter, 2001. – 864 s.
3. Kotler, F. Osnovy marketinga : krat. kurs / F. Kotler. – M. : Vil'yams, 2007. – 656 s.
4. Lamben, ZH.-ZH. Menedzhment, orientirovannyj na rynek : uchebnyk / ZH.-ZH. Lamben, R. CHumpitas, I. SHuling ; per. s angl. I. I. Malkova. – 2-e izd. – SPb. : Piter : Piter Press : IMISP, 2017. – 927 s.
5. Marketing communications [Electronic resource] / L. Eagle [et al.]. – 2nd ed. – London : Routledge, 2020. – Mode of access: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781003089292/marketing-communications-lynn-eagle-stephan-dahl-barbara-czarne-cka-jenny-lloyd>. – Date of access: 21.03.2022.
6. Advertising media planning: a brand management approach [Electronic resource] / L. D. Kelley. – 5th ed. – New York : Routledge, 2022. – Mode of access: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781003258162/advertising-media-planning-larry-kelley-kim-bartel-sheehan-lisa-dobias-david-koranda-donald-jugenheimer>. – Date of access: 12.03.2022.
7. Romat, E. V. Reklama / E. V. Romat. – 7-e izd. – SPb. : Piter : Lider, 2008. – 506 s.
8. Nadeina, N. G. Marketing vzaimootnoshenij v vysshej shkole / N. G. Nadeina // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2018. – № 3. – С. 14–18.

*Материал поступил 17.02.2024, одобрен 05.03.2024, принят к публикации 05.03.2024*

## ВЛИЯНИЕ ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ЧЕЛОВЕЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ

А. И. Ящук

К. э. н., доцент, декан факультета повышения квалификации и переподготовки Института информационных технологий БГУИР, Минск, Беларусь, e-mail: yashchuk\_ann@mail.ru

### Реферат

В материале исследуются связи между глобальным ростом населения и ключевыми аспектами социального и экономического развития, включая экономический рост, здравоохранение, образование, гендерное равенство и др. По мнению автора, нынешний быстрый рост населения является следствием демографического перехода от высокого уровня смертности и рождаемости к низкому. Рассматриваются основные демографические тенденции, сложные взаимосвязи, связывающие демографические процессы с социально-экономическим развитием.

**Ключевые слова:** устойчивое развитие, демография, старение населения.

### THE IMPACT OF DEMOGRAPHIC PROCESSES ON HUMAN DEVELOPMENT

A. I. Yashchuk

### Abstract

The paper explores the links between global population growth and key aspects of social and economic development, including economic growth, health care, education, gender equality, etc. The author argues that the current rapid population growth is a consequence of the demographic transition from high mortality and low fertility. According to the author, the current rapid population growth is a consequence of the demographic transition from high mortality and fertility rates to low ones. The main demographic trends and the complex interrelationships linking demographic processes with socio-economic development are examined.

**Keywords:** sustainable development, demography, ageing population.

Несколько десятилетий международное сообщество пыталось найти решение экологических, социальных и экономических проблем. В результате многостороннего диалога в 2015 г. была принята Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 г. (Повестка-2030), которая включает в себя 17 целей в области устойчивого развития. В документе 193 государства – члена ООН, включая Республику Беларусь, обязались обеспечивать устойчивый, поступательный рост, социальную интеграцию и защиту окружающей среды в партнерстве и в условиях мира [1]. Документ обязывает все государства, независимо от уровня их дохода и развития, вносить вклад в общие усилия по обеспечению устойчивого развития. Основные компоненты Повестки-2030: люди, процветание, планета, партнерство и мир. Вместе с 17 целями в области устойчивого развития она предлагает комплексный подход к пониманию и решению проблем, способствуя правильной и своевременной постановке вопросов.

Цели в области развития – это так называемые «точки давления», способные во многом определять благополучие населения. Они отражают наиболее насущные потребности современного мира. Одной из таких потребностей, определяющих благосостояние всей планеты, является поиск демографического равновесия.

В докладе ООН «Глобальный рост населения и устойчивое развитие» рассматриваются связи между глобальным ростом населения и социальными, экономическими и экологическими аспектами устойчивого развития [2]. Отмечается, что мы живем в эпоху роста населения. С середины XX века население мира увеличилось более чем втрое. По прогнозам Организации Объединенных Наций, численность мирового населения может вырасти почти до 11 миллиардов примерно к 2100 году. Быстрый рост населения может усугубить проблему обеспечения устойчивого и инклюзивного развития в будущем. Однако темпы глобального роста значительно замедлились примерно с 1970 года, и ожидается, что численность населения мира стабилизируется к концу века.

Такой быстрый рост стал беспрецедентным в истории человечества до индустриальной эпохи и является следствием процесса под названием «демографический переход», в ходе которого снижение уровня смертности и рождаемости приводит к увеличению продолжительности жизни и уменьшению размеров семей. Он определяется тенденциями трех компонентов роста – рождаемости, смертности и международной миграции, которые значительно различаются в зависимости от страны и региона.

До начала демографического перехода численность населения была относительно стабильной, поскольку высокий уровень рождаемости компенсировался сравнительно высоким уровнем смертности. На промежуточной стадии смертность снижается дальше, и рождаемость также начинает снижаться, население быстро растет благодаря значительному и устойчивому превышению рождаемости над смертностью. Затем рост населения замедляется, поскольку уровни рождаемости и смертности возвращаются в баланс на исторически низкий уровень. Уровень смертности имеет тенденцию расти на более поздних стадиях из-за концентрации населения в более старшем возрасте с более высоким риском смертности. После завершения переходного периода, если рождаемость упадет до низкого уровня, темпы роста населения обычно становятся близки к нулю и могут даже стать отрицательными. В этом случае число смертей может превысить число рождений, что приведет к сокращению численности населения.

В то время как снижение смертности стимулировало экономический рост, снижение рождаемости замедлило темпы роста мирового населения, который достиг пика в конце 1960-х годов. Улучшение выживаемости детей, а также создание или расширение систем социальной защиты изменили отношение родителей к многодетным семьям. Более высокие требования родителей в отношении образования, уровня жизни и материального благосостояния как для себя, так и для их детей, а также альтернативные издержки вынашивания и воспитания детей, особенно для женщин, являются факторами, которые сократили число детей, рождающихся в семье. Сегодня во всех странах и регионах наблюдается, по крайней мере, начало перехода к низкому уровню рождаемости. В то время как некоторые завершили переходный период более столетия назад, другие все еще находятся на ранних этапах с относительно высоким общим уровнем рождаемости.

Эксперты ООН считают, что устойчивый и быстрый рост населения усложняет задачу достижения социального и экономического развития и требует больших масштабов инвестиций и усилий, необходимых для обеспечения того, чтобы никто не остался позади [3].

Неизбежность перехода от равновесия высокой смертности и высокой рождаемости к равновесию низкой смертности и низкой рождаемости – это то, что мы понимаем под демографическим переходом. Переход к новому типу демографического равновесия – исторический процесс, равного которому еще не было.

Старение населения является неизбежным результатом демографического перехода, поскольку происходит переход от более высокого уровня рождаемости и смертности к более низкому, который приводит к периоду быстрого роста населения и, в конечном итоге, к увеличению доли более старого населения. Во время как более развитые страны завершили этот переходный период или значительно продвинулись вперед, менее развитые страны преимущественно находятся на ранних или средних этапах, когда население пожилого возраста еще невелико, но начинает расти. Быстрый рост населения не позволяет странам с низкими доходами и доходами ниже среднего увеличить государственные расходы в расчете на душу населения, что необходимо для искоренения бедности, ликвидации голода и недоедания, обеспечения доступа к здравоохранению и образованию.

Наряду с быстрым ростом населения высокий уровень рождаемости в некоторых регионах в сочетании с более низким уровнем смертности помог сохранить молодёжную возрастную структуру, а это гарантирует, что население мира будет продолжать расти, даже если средняя рождаемость немедленно упадет до уровня воспроизводства. Если страны, где население быстро растёт, добьются существенного и устойчивого снижения уровня рождаемости, то это приведет к увеличению концентрации населения в трудоспособном возрасте. Однако для получения максимальной потенциальной выгоды от этого «демографического дивиденда» необходимы значительные улучшения в сфере образования, здравоохранения и гендерного равенства, а также в доступе к производительной занятости и достойной работе. С другой стороны, более низкие уровни рождаемости и меньшие группы детей-иждивенцев и молодежи открывают возможности для ускоренного экономического и социального развития. Такие изменения могут также способствовать замедлению темпов роста населения мира и смягчению возросшего давления на окружающую среду, связанного с экономическим ростом и усиливающегося приростом населения.

Чтобы создать устойчивое будущее, необходимо обеспечить демографическое прогнозирование, которое включает в себя прогнозирование характера и последствий крупных демографических сдвигов до и во время их возникновения, а также принятие упреждающего планирования, основанного на таком анализе. Важно также повысить грамотность в отношении данных и способствовать правильному интерпретированию демографической информации.

Несмотря на то, что темпы роста мирового населения будут продолжать снижаться в ближайшие десятилетия, население мира, вероятно, в 2050 году будет на 20–30 процентов больше, чем в 2020 году. Для реализации государственной политики необходимо иметь точные оценки демографических тенденций и надежные прогнозы будущих изменений, в том числе данных о численности населения и его распределении по возрасту, полу и географическому положению.

За последние 70 лет снижение уровня смертности, особенно в более молодом возрасте, внесло значительный вклад в рост населения. Различные социальные и экономические изменения привели к повышению уровня жизни и более здоровой жизни в целом. Эти изменения включают увеличение доступности продуктов питания; улучшение здравоохранения, жилья, условий труда и уровня образования. Но несмотря на эти достижения, между странами и регионами сохраняются значительные различия в ожидаемой продолжительности жизни при рождении. В глобальном масштабе рост населения полностью определяется тенденциями рождаемости и смертности; на национальном или региональном уровне международная миграция может играть важную роль. Эти три переменные определяют демографические характеристики нынешнего населения.

Хотя международная миграция не оказывает прямого влияния на рост населения во всем мире, в некоторых странах и регионах ее прямой вклад в экономический рост был значительным, в частности, для стран Совета сотрудничества стран Персидского залива, но также для многих стран Европы и Северной Америки, а также для Австралии и Новой Зеландии. Кроме того, иммиграция может также косвенно способствовать росту населения как за счет снижения среднего возраста населения, так и за счет временного повышения среднего уровня рождаемости в странах назначения. В странах с очень низким уровнем рождаемости иммиграция ослабила сокраще-

ние численности населения. Несмотря на то, что снижение рождаемости в ближайшие несколько лет в ближайшем будущем приведет к глобальному росту населения, каждая страна исходит из своих целей, выстраивая социально-демографическую политику.

Демографическая ситуация в Республике Беларусь характеризуется низкой рождаемостью, которая уже не обеспечивает простого воспроизводства населения, и старением населения. Численность населения Беларуси в 1999 г. составляла 10 045 237 человек, в 2009 г. – 9 503 807, в 2019 г. – 9 413 446, на 1 января 2021 г. в стране проживало 9 349 645 человек, а на 1 января 2023 г. 9 200 617. Таким образом, убыль населения с 1999 г. составила более 800 тыс. человек [4].

Наибольшая численность населения в Беларуси была достигнута в 1994 г. – 10 243,5 тыс. человек. С 1995 г. страна вступила в период депопуляции – сокращения общей численности населения. При этом в период 2014–2017 гг. в Беларуси наблюдался временный рост населения благодаря эффективной демографической политике и оптимальной возрастной структуре населения. В 2015 г. естественная убыль населения была сведена к минимуму. Сокращение населения после 2017 г. обусловлено растущей смертностью и снижающейся рождаемостью. Миграция при этом не компенсирует полностью убыль населения [5].

В дальнейшем естественная убыль населения будет нарастать вследствие неблагоприятных демографических факторов – прежде всего многочисленного контингента населения старших возрастов и уменьшающейся когорты женщин активного репродуктивного возраста [5].

При этом с 2010 г. до 2015 г. наблюдался ежегодный рост числа родившихся детей на 10 % [5]. Этому содействовали экономический рост, повышение уровня жизни населения, активная демографическая политика, новые меры поддержки семей, высокая численность женщин наиболее активного детородного возраста. С 2016 г. началось сокращение рождаемости по причинам малочисленности потенциальных родителей – поколения 1990-х гг. и снижения интенсивности рождений.

Позитивно изменилась структура родившихся по очередности рождения за 2010–2019 гг.: больше стало двухдетных и многодетных семей. В 2013–2015 гг. наблюдался рост общего коэффициента рождаемости, к 2019 г. рождаемость сократилась с 12,5 % до 9,3 %. Экспертные оценки показывают, что сокращение числа родившихся и соответственно общего коэффициента рождаемости продолжатся вплоть до 2030 г. Именно в этот период численность женщин репродуктивного возраста 15–49 лет снизится на 6,9 %, а численность женщин наиболее активного репродуктивного возраста 25–34 года – на 39,3 %. Такое уменьшение числа потенциальных матерей невозможно компенсировать даже при самых оптимистических прогнозных сценариях демографического развития.

Суммарный коэффициент рождаемости в Беларуси с 2010 г. по 2016 г. увеличился до 1,73, но с 2017 г. он сократился до 1,3. Такая динамика рождаемости характерна для городского и сельского населения. При этом принятые меры материальной поддержки семей оказали большее влияние на сельское население. В отличие от городов, рождаемость в сельской местности все еще остается выше уровня 2010 г. и составляет 2,82. Рождаемость в городах даже на пике не превышала 1,53. Следует отметить, что текущий суммарный коэффициент рождаемости в Беларуси все еще ниже средневропейского уровня. Среди стран-соседей Беларусь заметно отстает, России (1,5), от Литвы и Латвии (1,61), Польши (1,42) [5]. Общеизвестно, что для обеспечения простого воспроизводства населения суммарный коэффициент рождаемости должен составлять 2,15.

Аналогичная тенденция сегодня наблюдается во всех странах Европы. Она обусловлена, прежде всего, изменением ценностей населения и уклада жизни семей. Также она свидетельствует об изменении возрастной модели рождаемости, для которой характерно смещение периода рождения детей в более поздние возрасты и увеличение возраста материнства. Причины низкого уровня рождаемости – ответственное репродуктивное поведение; увеличение среднего возраста вступления в брак и при рождении первого ребенка; низкие репродуктивные установки населения и неблагоприятная структура населения; нестабильная социально-экономическая ситуация [5].

В Беларуси также уменьшается удельный вес детей в общей численности населения. Если удельный вес детей в возрасте до 18 лет в общей численности населения в 1990 г. составлял 27,4 %, то в 2023 г. он был 19,9 % [6]. В Беларуси демографическое старение населения выражено ростом численности и доли населения старших возрастов в общей численности населения, увеличением среднего возраста населения. За период 2010–2019 годов численность населения в возрасте 65 лет и старше возросла на 10,2 %. Доля населения 65 лет и старше в общей численности населения страны на 1 января 2023 г. составила 16,5 % [6].

Население старше трудоспособного возраста в период 2010–2019 гг. увеличилось на 7,1 %. Его доля в населении страны возросла до 24,3 %. Таким образом, каждый четвертый житель страны находится в возрасте старше трудоспособного [5].

Согласно прогнозам экспертов, скорость старения населения в Беларуси будет увеличиваться в соответствии с общеевропейским трендом. Это повлечет дальнейший рост численности населения старших возрастов [5].

Неизбежным результатом старения общества является увеличивающаяся демографическая нагрузка на население трудоспособного возраста населением нетрудоспособных возрастов. За период 2010–2019 годов демографическая нагрузка на 1 000 человек трудоспособного возросла с 625 до 744 человек в нетрудоспособных возрастах [7]. На данном этапе эффект старения общества как ускорителя растущей демографической нагрузки сдерживается за счет увеличения пенсионного возраста. Нагрузка при этом населением младших возрастов продолжает возрастать [5].

Процесс демографического старения затрагивает и возрастную структуру трудоспособной части населения Беларуси. Увеличивается доля лиц старше трудоспособных возрастов. За 2010–2019 годы доля молодежи 15–29 лет в населении трудоспособного возраста сократилась с 34 % до 27,6 %.

Миграционная ситуация в Беларуси в течение последнего десятилетия характеризуется миграционным приростом. В 2019 году сальдо внешней миграции составило 13,9 тыс. человек [5].

Численность внутренних мигрантов в Беларуси в 2019 году составила 240,4 тыс. человек. По итогам внутриреспубликанской миграции положительное сальдо зафиксировано в Минской области и г. Минске, в остальных регионах наблюдался отток населения. Внутренняя миграция способствовала росту численности городского населения и уменьшению сельского почти во всех регионах [5].

Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 года определила цель государственной политики в области народонаселения – преломить негативную тенденцию сокращения населения и создать условия для роста его численности. Для ее достижения предусматривается решение ряда задач: создание благоприятных условий для повышения рождаемости, всестороннего укрепления института семьи и традиционных семейных ценностей; увеличение ожидаемой продолжительности здоровой жизни, сохранение и развитие потенциала здоровья на протяжении всего жизненного цикла; повышение эффективности миграционных потоков; стимулирование притока высококвалифицированных кадров в республику.

Демографические приоритеты Республики Беларусь сосредоточены на улучшении качественных и количественных параметров воспроизводства населения. Приоритетные направления демографической политики реализуются через ключевые программные документы, прежде всего, Программу социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы и Государственную программу «Здоровье народа и демографическая безопасность Республики Беларусь» на 2021–2025 годы. Резерв поддержания стабильной численности населения сосредоточен в сохранении имеющихся человеческих ресурсов. Поэтому сохранение и укрепление здоровья всех социально-демографических групп населения является стратегической целью будущего пятилетия.

Чтобы проложить путь к более устойчивому будущему, необходимо демографическое предвидение: предвидение характера и последствий крупных демографических сдвигов до и во время их возникновения, а также принятие дальновидной и активной политики,

основанной на таком анализе. Сегодня во многих странах с низкими доходами и доходами ниже среднего быстрый рост населения усугубляет проблемы достижения социального и экономического развития. Сохраняющийся высокий уровень рождаемости, способствующий такому росту, является одновременно симптомом и причиной медленного прогресса в развитии, часто связанного с отсутствием выбора и расширения прав и возможностей среди женщин и девочек. Достижение целей и задач Повестки дня на период до 2030 года, особенно тех, которые связаны с репродуктивным здоровьем, образованием, расширением прав и возможностей женщин и гендерным равенством, вероятно, будет способствовать замедлению темпов роста мирового населения. Тем не менее, одни только изменения в демографических тенденциях мало что сделают для решения проблемы неустойчивых моделей использования ресурсов. Достижение устойчивости будет в решающей степени зависеть от способности и желания человечества повышать эффективность использования ресурсов в потреблении и производстве, а также отделять экономический рост от ущерба, наносимого окружающей среде, при этом страны с высокими доходами и доходами выше среднего возьмут на себя ответственность и подадут пример [2].

О последствиях демографических изменений ведется много дискуссий, но как мы можем активно влиять на демографическое развитие? Процесс старения как таковой будет происходить независимо от политических мер. Однако правительства обычно хотят избежать экстремальных ситуаций. Например, дальнейшее снижение рождаемости может привести к экономически крайне неблагоприятному возрастному распределению, при котором сохранение существующего качества жизни может оказаться невозможным даже при принятии консолидированных адаптационных мер. ЕЭК ООН координирует программу «Поколения и гендер», которая приводит к сбору и анализу политически ориентированных данных, которые могут помочь правительствам разработать политику, связанную с семьей, рождаемостью, отношениями между поколениями и гендерными отношениями. Одной из мер в этом направлении могло бы стать снижение напряжения между работой и семейной жизнью за счет развития системы дневного ухода за детьми. Оно может повысить качество жизни, позволяя обоим партнерам в семье участвовать в рынке труда, способствовать гендерному равенству на рынке труда и, как показал опыт ряда стран, помочь избежать снижения рождаемости до очень низкого уровня.

Сегодняшние рождения – это импульс завтрашнего дня. И если нас беспокоит долгосрочное будущее, то необходимо признать ту важную роль, которую играет демографическая политика в стратегии улучшения условий как жизни человека, так и страны в целом.

#### Список использованной литературы

1. Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года [Электронный ресурс] / ООН. – Режим доступа: [https://www.unssc.org/sites/unssc.org/files/2030\\_agenda\\_for\\_sustainable\\_development.pdf](https://www.unssc.org/sites/unssc.org/files/2030_agenda_for_sustainable_development.pdf). – Дата доступа: 12.01.2024.
2. Global Population Growth and Sustainable Development [Electronic resource] / United Nations. – Mode of access: [www.unpopulation.org](http://www.unpopulation.org). – Date of access: 12.01.2024.
3. Why population growth matters for sustainable development [Electronic resource] / United Nations. – Mode of access: <https://www.un.org/development/desa/pd/sites.pdf>. – Date of access: 12.01.2024.
4. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/>. – Date of access: 12.01.2024.
5. Демографическое развитие Республики Беларусь: 2010–2020 годы [Электронный ресурс] / Министерство труда и социальной защиты Республика Беларусь. – Режим доступа: <https://mintrud.gov.by/uploads/files/Demograficheskoe-razvitiye-2010-2020-1.pdf>. – Дата доступа: 12.01.2024.
6. Статистический обзор [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: [https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-pdf/official\\_statistika/statobzor\\_narod-2023.pdf](https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-pdf/official_statistika/statobzor_narod-2023.pdf). – Дата доступа: 12.01.2024.

7. Демографический ежегодник Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/1c0/1c05351f61eba273e04b71df0036594a.pdf>. – Дата доступа: 12.01.2024.
5. Demograficheskoe razvitie Respubliki Belarus': 2010–2020 gody [Elektronnyj resurs] / Ministerstvo truda i social'noj zashchity Respublika Belarus'. – Режим доступа: <https://mintrud.gov.by/uploads/files/Demograficheskoe-razvitie-2010-2020-1.pdf>. – Дата доступа: 12.01.2024.

#### **References**

1. Povestka dnya v oblasti ustojchivogo razvitiya na period do 2030 goda [Elektronnyj resurs] / OON. – Режим доступа: [https://www.unssc.org/sites/unssc.org/files/2030\\_agenda\\_for\\_sustainable\\_development.pdf](https://www.unssc.org/sites/unssc.org/files/2030_agenda_for_sustainable_development.pdf). – Дата доступа: 12.01.2024.
2. Global Population Growth and Sustainable Development [Electronic resource] / United Nations. – Mode of access: [www.unpopulation.org](http://www.unpopulation.org). – Date of access: 12.01.2024.
3. Why population growth matters for sustainable development [Electronic resource] / United Nations. – Mode of access: <https://www.un.org/development/desa/pd/sites.pdf>. – Date of access: 12.01.2024.
4. Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus' [Elektronnyj resurs]. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/>. – Date of access: 12.01.2024.
6. Statisticheskij obzor [Elektronnyj resurs] / Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – Режим доступа: [https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-pdf/oficial\\_statistika/statobzor\\_narod-2023.pdf](https://www.belstat.gov.by/upload-belstat/upload-belstat-pdf/oficial_statistika/statobzor_narod-2023.pdf). – Дата доступа: 12.01.2024.
7. Demograficheskij ezhegodnik Respubliki Belarus' [Elektronnyj resurs] / Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/1c0/1c05351f61eba273e04b71df0036594a.pdf>. – Дата доступа: 12.01.2024.

*Материал поступил 29.02.2024, одобрен 25.03.2024, принят к публикации 26.03.2024*

## THE CONNOTATION AND MECHANISM OF REGIONAL GREEN DEVELOPMENT

T. G. Zoryna<sup>1</sup>, Liu Xueyao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Doctor of Economics, Professor, Head of the Laboratory for Sustainable Energy Development of Institute of Power Engineering of NAS of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: tanyazorina@tut.by

<sup>2</sup> PhD student in the Department of International Management of Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: 18215686524@163.com

### Abstract

The definition and connotation of green development are developed based on the concepts related to green development in the existing literatures. And a regional green development promotion mechanism is formulated, in which the control subsystem including national and regional policy exerts influences on the management subsystem including economic, energy, environmental, demographic and social systems through seven successive steps.

**Keywords:** regional green development, concept evolution, promotion mechanism, policy implementation, interaction among indicators.

## КОННОТАЦИЯ И МЕХАНИЗМ РЕГИОНАЛЬНОГО ЗЕЛЕННОГО РАЗВИТИЯ

Т. Г. Зорина, Лю Сюэяо

### Реферат

Определение и коннотация зеленого развития разработаны на основе концепций, связанных с зеленым развитием в существующей литературе. Сформулирован механизм стимулирования регионального зеленого развития, в котором управляющая подсистема, включающая национальную и региональную политику, оказывает влияние на управляющую подсистему, включающую экономическую, энергетическую, экологическую, демографическую и социальную системы, посредством семи последовательных шагов.

**Ключевые слова:** региональное зеленое развитие, эволюция концепции, механизм продвижения, реализация политики, взаимодействие показателей.

### Introduction

Regional green development determines the sustainability of regional economies and the people's welfare in the region, and is the current dominant trend of economic and social development worldwide. In recent years, China attaches importance to resolving the contradiction between the ecological environment and economic development. The enhancement of ecological civilization and the promotion of regional green development become the priorities in national and regional policies.

### The connotation of green development

The concept related to green development has a long history in the academic world. The oldest relevant concept was sustainable development, which was introduced in 1980. The International Union for Conservation of Natural Resources, in its world conservation strategy, stated that the fundamental relationships among nature, society, ecology, economy in the use of natural resources should be examined in order to ensure sustainable development worldwide [1]. In 1987, the World Commission on Environment and Development defined sustainable development as development that satisfies the needs of the present without jeopardising the ability for future generations to satisfy their needs [2]. Subsequently, green economy was introduced by Pearce in 1989 in response to the undervaluation of environmental and social cost in the current price system [3; 4]. And green economy has been defined by UNEP in 2011 as one that results in improved welfare and social equity, while significantly reducing environmental risks and ecological scarcities [5]. In addition to green economy, the term green growth is often used. According to OECD, green growth is about fostering economic growth and development while ensuring that the natural assets continue to provide the resources and the environmental services on which our welfare relies [6]. In 1995, the Chinese scholar Dai Xingyi first used the term "green development" in "Development Towards Green" to elaborate on a series of theoretical and practical issues of sustainable development. He pointed out that the fundamental path to green development is to increase the sustainability of development [7]. In 2002, the Stockholm Environment Institute and the United Nations Development Programme jointly published the China Human Development Report 2002: Making Green Development a Choice, which described the state of ecological and environmental development in China and the opportunities and challenges it faced, and clearly indicated that China should adopt the path of green development [8].

Scholars in China have conducted numerous studies on green development, but they have various understandings on green development. Wang Jinnan, Cao Dong and Chen Xiaojun believe that green develop-

ment is a development pattern that is sustainable for environment and resources, and harmonious between human beings and nature, and in this development pattern the environment is regard as an intrinsic productivity [9]. Wang Lingling and Zhang Yanguo believe that green development is a new development pattern that achieves sustainable development through strengthening ecological and environmental protection despite the constraints of natural resources and the carrying capacity of the ecological environment [10]. Jiang Nanping and Xiang Renkang believe that the essence of green development should be defined on the basis of the ideas that resources and energy should be reasonably and sparingly used, the economy and society should develop moderately and healthily, damages and compensation should be balanced and human beings should live in harmony with nature [11]. However, the understanding on green development by Chinese scholars has not been separated from the idea of ecological and environmental protection and sustainable development of environmental and resources. However, both for the conceptual definition of green development and of the closely analogous green economy, Belarusian scholars emphasize and pay more attention to the significance of green development for people's welfare. K. M. Mukina defines a green economy as one that improves people's health and social justice, as well as significantly reduces harmful environmental impacts and ecological deficits [12]. With full consideration of the differences in the meaning of green economy in economics, ethics, ecology and philosophy, V. A. Rybak argued that green development should be associated with the implementation of such a life activity, which will increase people's satisfaction with their present and future lives [13].

Considering the main focuses, advantages and disadvantages of existing definitions of green development, the connotation of green development could be redefined as a development and lifestyle based on the harmony between human being and nature for the purpose of economic growth, resource conservation, environmental friendliness, ecological protection, and people's welfare.

### The mechanism of regional green development

According to the new definition of green development, green development is related closely to economic, energy, environmental, demographic and social systems. To promote regional green development, is to exert influences on the management subsystem including economic, energy, environmental, demographic and social systems through the control subsystem including national policy and regional policy with successive steps [14]. A regional green development mechanism could be formulated as shown in Figure 1.

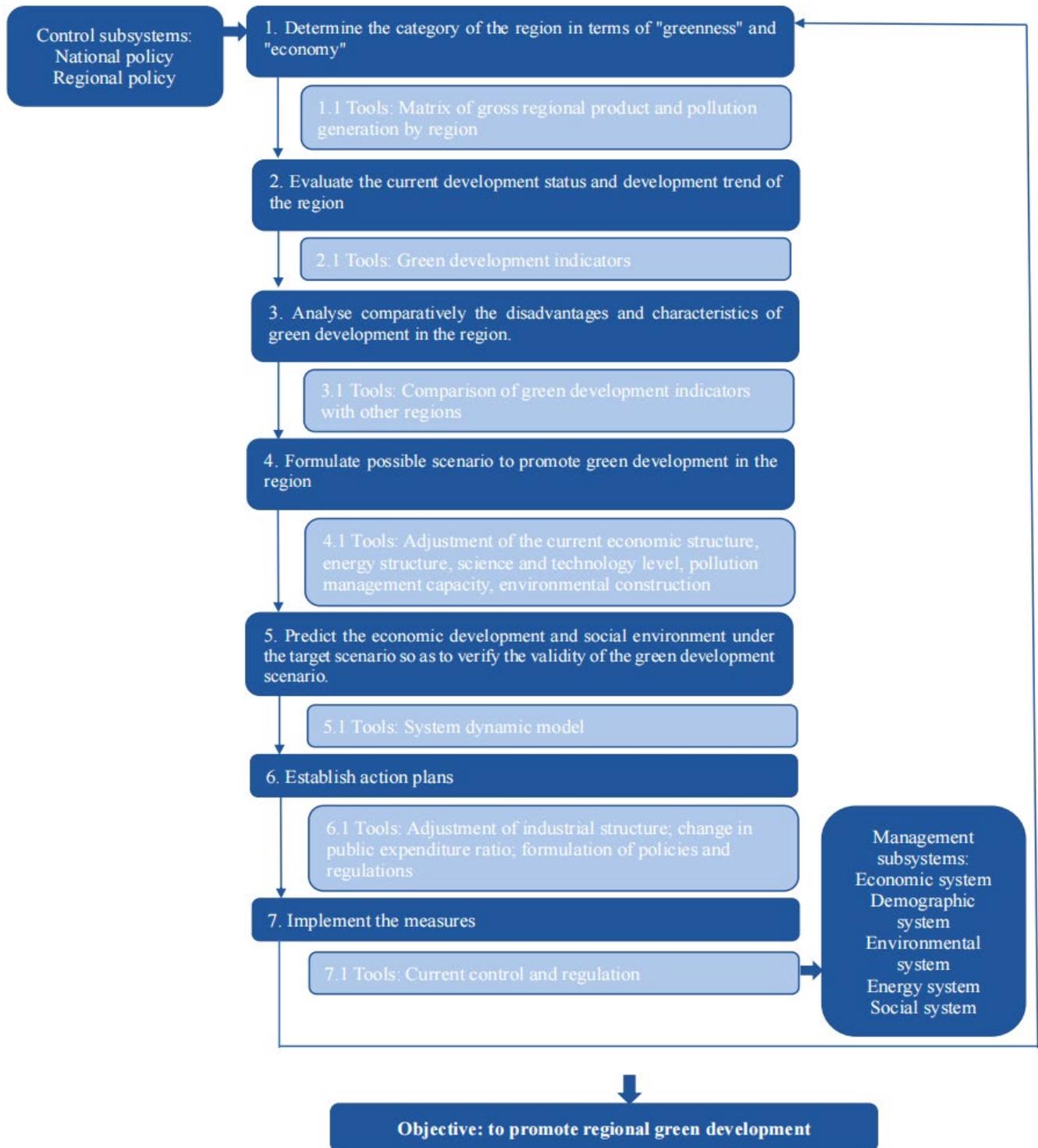


Figure 1 – Regional green development promotion mechanism

1. Determine the category of the region in terms of “greenness” and “economy”

To determine the category of the region in terms of “greenness” and “economy”, the change in gross regional product and change in pollution generation should be analysed. By assigning weights to different pollutants, a composite indicator that can quantitatively measure pollution generation is calculated. And the economic development of the region can usually be reflected by the gross regional product. By recording and calculating the gross regional product and comprehensive pollution indicator for different years, the change in “economy” and “greenness” of the region is learnt. In terms of “economy” and “greenness”, possible situations include economic growth with pollution increase, economic growth

with pollution decrease, economic decline with pollution increase, and economic decline with pollution decrease. These four situations can be defined as four categories of regional development. These categories are fundamentally different in terms of “economic” and “green” development. Regions belonging to different categories can be considered to confront different situations and should adopt different strategies for promoting green development [15]. In the pursuit of green development, regions belonging to different categories have different choices about the priority of “economy” before “greenness” or “greenness” before “economy”. Therefore, when promoting the green development of regions, the first thing that should be learnt is the categories to which regions belong in terms of “greenness” and “economy”.

To determine the category of the region in terms of "greenness" and "economy" requires various actors to fulfil the relevant functions. Firstly, the regional statistical office needs to provide specific data on the relevant indicators. Secondly, the national or regional departments should be responsible for the calculation of the indicators and the statistics on the changes of the indicators from year to year. Thirdly, the national or regional government should be in charge of coordinating the work and ratifying the results in this stage. Moreover, the frequency of this stage must be annual, as some regions could have data fluctuations in the indicators of gross regional product and pollution generation. To determine the category of the region is to determine the priority in the regional green development, and it is the basis to formulate the green development scenario as well as reasonable green development strategy.

2. Evaluate the current development status and development trend of the region

To evaluate the current development status and development trend of the region, several green development indicators selected and the interrelationship among them are demonstrated in Figure 2 [16].

According to the interrelationships among the indicators, it can be seen that the indicators for evaluating the regional green development status can be divided into two types: endogenous variables and exogenous variables. The former is influenced by the operation of the whole system mechanism and is a result of changes in several variables, while the latter always changes with policies, laws, financial subsidies and other forms of government regulation. Green development is usually promoted through national or local authorities regulating exogenous variables to influence the green development mechanism and ultimately to optimise the trend of the core endogenous variables [17]. Therefore, when it comes to measures to promote green development, it is important to focus on the exogenous variables, while when it comes to evaluating the green development status, it is necessary to pay attention to the current trends of the endogenous variables. By calculating the endogenous variables related to regional green development, the current green development status of the region can be learnt in detail. And through reasonable predictions, the future trends of these green development indicators of the region under the current natural development scenario can be known.

To evaluate the current development status and development trend of the region, multiple actors are required to fulfil the relevant functions. Firstly, the regional statistical office needs to provide specific data on the relevant indicators. Secondly, the regional departments should be responsible for the calculation of the indicators and the statistics on the changes of the indicators from year to year. Thirdly, the regional government should be in charge of coordinating the work and ratifying the results in this stage. The frequency of this stage is once a year. The evaluation of the current development status and development trend of the region is necessary to the design of green development scenarios.

3. Analyse comparatively the disadvantages and characteristics of green development in the region

To analyse comparatively the disadvantages and characteristics of green development in regions, the key lies in comparing the differences between regions in various green development indicators, especially the differences between regions belonging to different categories in various endogenous variables of green development. Through the comparison between regions belonging to different categories, on the one hand, the differences and weaknesses of green development in the study regions could be known, and on the other hand, the differences between the categories could be grasped more concretely. In the previous step, by comparing and analysing the green development indicators vertically in different years, the development status and development trend of the region could be learned. In this step, by comparing and analysing the green development indicators horizontally among different regions, the disadvantages and characteristics of green development in the region would be learned.

To analyse comparatively the disadvantages and characteristics of green development in regions, multiple actors are required to fulfil the relevant functions. Firstly, the regional statistical office needs to provide specific data on the relevant indicators. Secondly, the national departments should be responsible for the calculation of the indicators and the statistics on the changes of the indicators from year to year. An analysis report should be issued by the relevant national department. Thirdly, the national government should be in charge of coordinating the work and ratifying the results in this stage. The frequency of this stage is once a year.

4. Formulate possible scenario to promote green development in the region

To formulate possible scenarios to promote green development in the region is to address the most critical problems in regional development based on the conclusions obtained in the previous steps. Regions belonging to different categories have completely different green development characteristics and face differentiated development problems. Therefore, differentiated green development scenarios are necessary for regions belonging to different categories.

To formulate possible development scenarios for green development in the region, multiple actors are required to fulfil the relevant functions. Firstly, the Institute of Economics Chinese Academy of Social Sciences, the China Magisterial Energy Navigator and the Chinese Research Academy of Environmental Sciences are required to study and collect information on factors affecting regional green development, which could be supplemented as possible exogenous variables. Secondly, the regional departments should determine the adjustment direction of green development in the region and design possible development scenarios. Thirdly, the regional government should be in charge of coordinating the work and ratifying the results in this stage. The frequency of this stage is every five years to determine the direction, and annually to check and adjust.

5. Predict the economic development and social environment under the target scenario so as to verify the validity of the green development scenario

To predict the economic development and social environment under the target scenario, the adjusted parameters of policy variables under each scenario are inputted into the designed model. When analysing the regional green development trend under different scenarios, the first thing that should be taken into account is the regional economic growth under different development scenarios. Moreover, as mentioned in the connotation of green development, the regional green development should be focused on the life quality of the residents, with the fundamental aim of enhancing social welfare. Social welfare consists of two aspects, one of which is socio-economic welfare, which is improved through the rise of local disposable income per capita driven by regional economic growth, and the other is socio-environmental welfare, which is also referred to as social livability, and which is improved through the optimisation of pollution control, pollution treatment, and environmental construction in the region. [18] Therefore, when analysing regional green development trends under different development scenarios, it is important to consider not only regional economic growth, but also social livability, which represents several aspects such as pollution control, pollution treatment and environmental construction. [19] Economic growth and social livability are crucial determinants for the life quality of local populations, and are the primary focus for monitoring green development trends under different development scenarios.

To predict the economic development and social environment under the target scenario, multiple actors are required to fulfil the relevant functions. Firstly, the regional departments should study and record the trends of economic growth and social welfare under the target scenario by adjusting the parameters and verify the validity of the target development scenario. Secondly, the regional finance department should verify the practical feasibility of the optimal scenario in terms of the proportion of fiscal expenditures or price subsidies. Thirdly, the regional government should be in charge of coordinating the work and ratifying the results in this stage. The frequency of this stage is every five years to determine the direction, and annually to check and adjust.

6. Establish action plans

To establish action plans, based on green development scenarios with proven effectiveness, the regulation and control over exogenous variables would be achieved through a variety of government interventions, such as regional policies and financial policies. Firstly, for each region, a regional development plan is necessary. The development plan should describe the current annual development goals in terms of economy, energy, environment and other indicators. Secondly, based on the optimal development scenario of each region verified in the previous steps, specific policies, regulations, and related systems should be developed to control the exogenous variables.

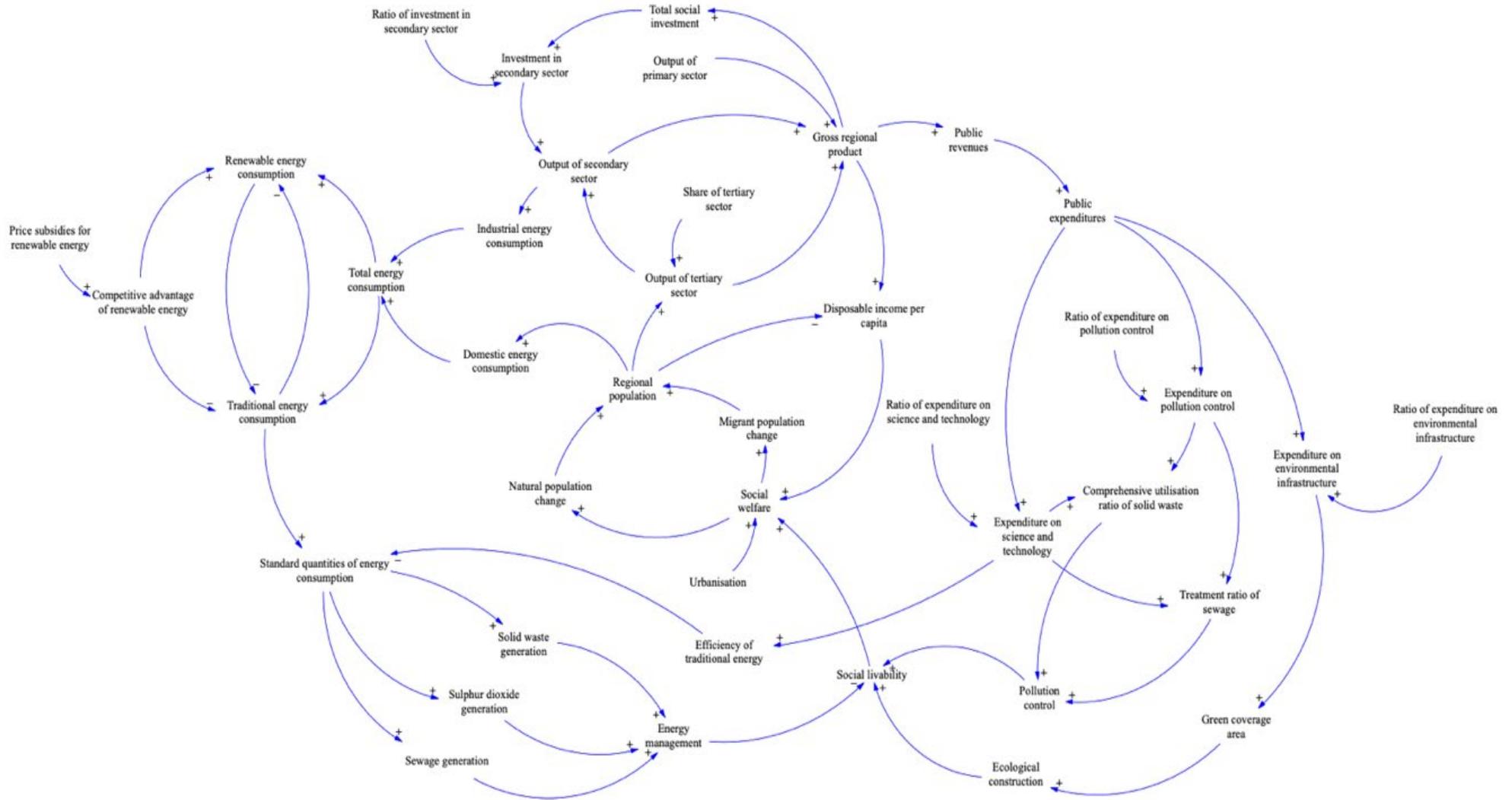


Figure 2 – Causal loop diagram of regional green development system dynamic model

To establish action plans, multiple actors are required to fulfil the relevant functions. Firstly, regional governments, regional economic departments, regional energy departments and regional environmental departments should be responsible for formulating regional or sectoral development plans. Secondly, the regional finance departments should study and formulate financial policies and programmes for adjusting fiscal expenditures. Thirdly, the regional environment department, the regional energy department, the regional justice department, and the regional government should formulate regulatory policies and relevant laws and regulations. Fourthly, the regional government is responsible for the co-ordination and approval of final results in this stage. The frequency of this stage is every five years to determine the direction, and annually to check and adjust.

#### 7. Implement the measures

In this step, factors affecting the implementation of measures include the economic development of the country and the region, changes in the domestic and foreign markets, and the compatibility of measures with the national economic conditions. And the controls and regulations can help to monitor and adjust the actions taken to promote regional green development in time.

To implement the measures, multiple actors are required to fulfil the relevant functions. Firstly, the regional authority should identify the actual takers of measures in the management subsystem or the providers of feedback. For example, enterprises in the energy system that may receive subsidies for renewable energy, or enterprises in the economic system that receive investment for fixed assets, or regional demographic departments in the demographic system, regional environmental departments in the environmental system, etc. Based on their information, the implementation of the measure is monitored and feedback is provided. Secondly, the regional authority should have general control over the implementation of the measures. Thirdly, the regional economic department, the regional energy department and the regional environmental department should collect and provide data that can reflect the implementation of measures and control the implementation of measures. Fourthly, the regional government is expected to summarise the results of implementing the regional green development mechanism. The frequency of this stage is once every six months for monitoring and feedback on the implementation of measures and once every year for final control.

The seven steps mentioned above constitute a complete mechanism for regional green development. Through this green development promotion mechanism, the green development of regions belonging to different categories can be promoted.

#### Conclusion

Based on the discussion on the definitions related to green development, the connotation of green development could be redefined as a development and lifestyle based on the harmony between human being and nature for the purpose of economic growth, resource conservation, environmental friendliness, ecological protection, and people's welfare. And in order to promote regional green development, a regional green development promotion mechanism is formulated, in which the control subsystem including national and regional policy exerts influences on the management subsystem including economic, energy, environmental, demographic and social systems through seven successive steps.

#### References

- World conservation strategy: living resource conservation for sustainable development – 1980 [Electronic resource] // The international union for conservation of nature and natural resources. – Mode of access: <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/wcs-004.pdf>. – Date of access: 13.10.2023.
- Our common future – 1987 [Electronic resource] // The world commission on environment and development. – Mode of access: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. – Date of access: 13.10.2023.
- Pearce, D. Blueprint for a green economy / D. Pearce, A. Markandya, E. Barbier. – London : Earthsan, 1989. – 208 p.
- Blanc, D. L. Special issue on green economy and sustainable development / D. L. Blanc // Natural resources. – 2011. – Vol. 35. – P. 151–154.
- Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication – 2011 [Electronic resource] // UNEP. – Mode of access: <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=126&menu=35>. – Date of access: 13.10.2023.
- Towards green growth: monitoring progress – 2011 [Electronic resource] // The organization for economic cooperation and development. – Mode of access: <https://www.oecd.org/greengrowth/48224574.pdf>. – Date of access: 13.10.2023.
- Dai, X. Y. Towards a green development / X. Y. Dai. – Shanghai : Fudan university press, 1999. – 320 p.
- Human development report 2021-2022 – 2022 [Electronic resource] // The United Nations Development Programme. – Mode of access: [https://hdr.undp.org/system/files/documents/global-report-document/hdr2021-22pdf\\_1.pdf](https://hdr.undp.org/system/files/documents/global-report-document/hdr2021-22pdf_1.pdf). – Date of access: 13.10.2023.
- Wang, J. N. Conception of national green development strategic plan / J. N. Wang, D. Cao, X. J. Chen // Environmental protection. – 2006. – № 6. – P. 39-49.
- Wang, L. L. Exploring the connotation of green development / L. L. Wang, Y. G. Zhang // Socialism studies. – 2012. – № 5. – P. 143–146.
- Jiang, N. P. Some issues in the green development of China's economy / N. P. Jiang, Y. G. Zhang // Contemporary economic research. – 2013. – № 2. – P. 50–54.
- Mukina, K. M. Implementation of the principles and analysis of the main directions for the implementation of the green economy concept in Belarus / K. M. Mukina, N. S. Smashny // Sakharov readings 2022: environmental problems of the 21 century: collection of materials of scientific conference, Minsk, 19-20, May, 2022 / International state ecological institute named after A. D. Sakharov ; editor: A. N. Batyan [et al.]. – Minsk, 2022. – P. 295–298.
- Rybak, V. A. Analysis of green economy phenomenon and tools of environment quality management: a case study for the Republic Belarus / V. A. Rybak, A. Grib, A. Chokr // Interactive science. – 2016. – № 4. – P. 97–107.
- Zoryna, T. G. Formation of the economic mechanism of sustainable development of the electric power industry of the Republic of Belarus / T. G. Zoryna // Sustainable development of the economy of industrial enterprises: proceedings of the international scientific and practical conference, Nizhny Novgorod, 25 Nov. 2015. – N. Novgorod, 2015. – P. 53–58.
- Han, M. Y. Regional disparity and decoupling evolution of China's carbon emissions by province / M. Y. Han, W. D. Liu, Y. T. Xie // Resources science. – 2021. – Vol. 43, № 4. – P. 710–720.
- Liu, X. Y. A study on regional green development in China / X. Y. Liu // Minsk scientific readings 2023, Minsk, 6–8 Dec., 2023 / Belarusian State Technical University ; editor: I. V. Voytov [et al.]. – Minsk, 2023. – P. 179-183.
- Zhao, D. X. A study on the endogenous development of the urban economy and its dynamic mechanism / D. X. Zhao, L. Z. Li // Contemporary economic management. – 2016. – Vol. 38, № 4. – P. 68–73.
- Li, A. Spatial-temporal differentiation and coupling coordination between ecosystem services and human well-being in Beijing-Tianjin-Hebei region / A. Li, C. H. Mi, Y. Y. Yang // Ecological economy. – 2023. – Vol. 39, № 4. – P. 170–178.
- Yang, S. S. Research progress of application of system dynamics in regional green development policy simulation in China / S. S. Yang // Chinese journal of environmental management. – 2017. – № 6. – P. 41–47.

*Material received 10/04/2024, approved 10/04/2024, accepted for publication 10/04/2024*

Научное издание

**ВЕСТНИК БРЕСТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**  
**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ (СТРОИТЕЛЬСТВО, МАШИНОСТРОЕНИЕ, ГЕОЭКОЛОГИЯ);**  
**ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ**  
**№ 1 (133). 2024 г.**

Главный редактор	Баханович А. Г.
Зам. главного редактора	Шалобыта Н. Н.
Ответственный секретарь	Ковальчук Е. Н.

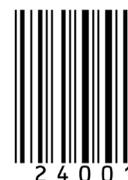
**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

Ответственный редактор по разделу «Строительство»	Тур В. В.
Зам. ответственного редактора по разделу «Строительство»	Пойта П. С.
Ответственный редактор по разделу «Машиностроение»	Нерода М. В.
Зам. ответственного редактора по разделу «Машиностроение»	Поддубко С. 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	Колб К. С.
Корректор	Дударук С. А.

Лицензия № 02330/463 от 27.03.2014 г. Подписано в печать  
16.04.2024 г. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага «Performer». Гарнитура «Arial».  
Уч.-изд. л. 26,75. Усл. печ. л. 24,88. Заказ № 380. Тираж 100 экз.  
Отпечатано на ризографе УО «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>



9 17718181110045

24001