

ISSN 2227-2917 (print)
ISSN 2500-154X (online)

12+



IZVESTIYA VUZOV
Investitsii
Stroitelstvo
Nedvizhimost

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ
ИНВЕСТИЦИИ
СТРОИТЕЛЬСТВО
НЕДВИЖИМОСТЬ

Том 15 № 3
2025



О КОМПАНИИ

ГОРСТРОЙ – иркутская девелоперская компания, основанная в 2002 г. Компания профессионально ведет деятельность по возведению многоквартирных домов. В проектном портфеле более 200 000 м² недвижимости, восемь построенных жилых комплексов: «Чудный», «Ушаковский», «Патриот», «Молодежный», «Перспектива», «Статус», «Соседи» и «Скандинавия».

В настоящее время компания реализует проекты по строительству клубного дома бизнес-класса «RIVERANG» на берегу р. Ангары и комплекса клубных домов премиум-класса «Звезды».

Численность сотрудников компании за годы деятельности выросла в десятки раз, и сегодня штат насчитывает более 100 человек. Среди них профессиональные проектировщики и строители. ГОРСТРОЙ сотрудничает с лучшими архитекторами Иркутска и российскими научно-производственными компаниями, работающими в сфере возведения недвижимых объектов. Привлекаются иностранные специалисты – подтверждением этого является проект жилого комплекса «Скандинавия», разработанный совместно с коллегами из Швеции.

В коллективе ГОРСТРОЯ много молодых специалистов. Большинство из них – выпускники ИрНТУ. Студенты приходят в ГОРСТРОЙ на практику, закрепляются в компании и после выпуска становятся частью команды. Под руководством опытных коллег они создают новый образ города.

В настоящее время компания начала разработку проекта комплексного развития территории в п. Маркова Иркутского района. Девелоперу предстоит создать город в городе – жилой квартал, площадью 20 га с развитой инфраструктурой. Там, где сейчас лес, появятся жилые дома различной этажности и парковки. В квартале построят детский сад, школу, поликлинику и торговый центр, чтобы не только предоставить жителям рабочие места, но и обеспечить их досуг и комфорт.

За годы работы в строительстве многоквартирного жилья ГОРСТРОЙ зарекомендовал себя как надежная компания с большим опытом успешно реализованных проектов. Своим приоритетом ГОРСТРОЙ определяет создание объектов недвижимости высокого уровня качества в районах города с развитой инфраструктурой.

ISSN 2227-2917 (print)
2500-154X (online)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION



ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

IRKUTSK NATIONAL RESEARCH TECHNICAL UNIVERSITY

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ИНВЕСТИЦИИ. СТРОИТЕЛЬСТВО. НЕДВИЖИМОСТЬ

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES
INVESTMENT. CONSTRUCTION. REAL ESTATE

Izvestiya vuzov
Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost

Том 15 № 3
Vol.



ИЗДАТЕЛЬСТВО
Иркутского национального исследовательского
технического университета

PUBLISHERS
of Irkutsk National Research Technical University
2025



В журнале опубликованы статьи ученых из России и зарубежья, посвященные научным результатам в области теоретических и прикладных проблем строительства, архитектуры, экономики и управления. Статьи объединены в три тематических блока: Экономика и управление; Строительство; Архитектура. Градостроительство. Дизайн.

Издание предназначено для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов вузов, специалистов инвестиционно-строительной сферы, государственных и муниципальных органов власти.

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Министерства науки и высшего образования РФ (Категория К-2), в Единый государственный перечень научных изданий «Белый список».

Журнал включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Журнал «Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость» реферируется и рецензируется.

Сведения о журнале можно найти на сайте в Интернете: <http://www.istu.edu>

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство ПИ № ФС77-62787 от 18 августа 2015 г.

Учредитель-издатель:

ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет

Подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» - 41511

Адрес ООО «Урал-Пресс»:

620026, Свердловская область, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, д. 130

Адрес учредителя, издателя и редакции:

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

e-mail: izv_isn@istu.edu

При перепечатке и цитировании ссылка на журнал
«Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость» обязательна

Авторы опубликованных статей несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, экономико-статистических данных и прочих сведений. Компьютерный макет сборника составлен из оригинальных авторских файлов.

ISSN 2227-2917 (print)
2500-154X (online)

In this journal we published the articles of Russian and foreign scientists, which are dedicated to scientific results in the sphere of theoretical and applied problems of development, architecture, economics and management. The articles are combined into three topical units: Economics and management; Construction; Architecture. Urban construction. Design.

The publication is for staff scientists, teachers, post-graduate students and students of universities, specialists in investment and building sphere, government and municipal authorities.

The journal is included in the list of the leading scientific journals and publications, where the key scientific results of doctoral (candidate's) theses approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Ministry of Education are to be published, is included to the Unified State List of Scientific publications - the "White List" (Level 2).

The Journal is indexing in EBSCO Publishing Databases, VINITI Database (Referativnyi Zhurnal), Russian Science Citation Index, included in the digital scientific library Cyberleninka, University OXFORD, Directory of Open Access Journals (DOAJ) and is described in Ulrich's Periodicals Directory.

The journal "Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate" is abstracted and reviewed.

Information about the journal you can find on the site in the Internet: <http://www.istu.edu>

The journal is registered with the Federal Agency for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Media (Roskomnadzor).
Certificate of registration № ПИ № ФС77-62787 of 18 August, 2015.

Founder, publisher: FSBEIHE Irkutsk National Research Technical University

The subscription code in Ural-Press LLC: 41511

The postal address of Ural-Press LLC:

130 Mamin-Sibiryak St.,
Yekaterinburg, 620026, Russia

Address of the founder, publisher and editorial office:

83 Lermontov St., Irkutsk 664074

e-mail: izv_isn@istu.edu

Reference to the journal «Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate» is obligatory while reprinting and quotation

The authors of submitted materials are responsible for the selection and accuracy of facts, quotations, economic and statistical data and other information. Computer model of a journal is compiled of original authors' files

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Пешков В.В., доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экспертизы и управления недвижимостью Иркутского национального исследовательского технического университета, советник РААСН, главный редактор (Иркутск, Россия)

Чупин В.Р., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой городского строительства и хозяйства Иркутского национального исследовательского технического университета, советник РААСН, заместитель главного редактора (Иркутск, Россия)

Батмунх Сэрээтэр, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых электрических станций Монгольского государственного университета науки и технологии, директор Института теплотехники и промышленной экологии Академии наук Монголии, академик Монгольской Академии наук (Улан-Батор, Монголия)

Беккер А.Т., доктор технических наук, профессор, профессор Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, член-корреспондент РААСН (Владивосток, Россия)

Большаков А.Г., доктор архитектуры, профессор, заведующий кафедрой архитектурного проектирования Иркутского национального исследовательского технического университета, советник РААСН (Иркутск, Россия)

Вальтер Фогт, доктор технических наук, специалист по планированию транспорта университета Штутгарта (Штутгарт, Германия)

Васильев Ю.Э., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой дорожно-строительных материалов Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета, действительный член Международного института строителей, Эксперт РАН (Москва, Россия)

Гребенюк Г.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительной механики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета, советник РААСН (Новосибирск, Россия)

Даваасурэн Авирмэд, доктор экономических наук, профессор, заведующий отделом региональной экономики и многосторонних взаимодействий Института международных исследований Академии Наук Монголии (Улан-Батор, Монголия)

Димитра Николау, доктор архитектуры, профессор отдела городского и регионального планирования Архитектурной школы Афинского национального технического университета (Афины, Греция)

Ерофеев В.Т., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, академик РААСН (Саранск, Республика Мордовия, Россия)

Ефимов А.В., доктор архитектуры, профессор, заведующий кафедрой дизайна архитектурной среды Московского архитектурного института, лауреат Государственной премии РФ, заслуженный деятель искусств (Москва, Россия)

Збигнев Войчицки, доктор технических наук, профессор кафедры гражданского строительства Вроцлавского технологического университета (Вроцлав, Республика Польша)

Калюжнова Н.Я., доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономической теории и управления Иркутского государственного университета (Иркутск, Россия)

Ковачев А.Д., доктор архитектуры, профессор, заведующий кафедрой архитектуры и урбанистики архитектурного факультета Варненского свободного университета им. Ч. Храбра, иностранный член РААСН (Варна, Болгария)

Леонард Шенк, доктор архитектуры, профессор факультета архитектуры и дизайна Констанцского университета (Констанц, Германия)

Леонович С.Н., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии строительного производства Белорусского национального технического университета, заместитель председателя научного совета РААСН «Механика разрушения материалов и конструкций», иностранный академик РААСН (Минск, Республика Беларусь)

Ляхович Л.С., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительной механики Томского архитектурно-строительного университета, академик РААСН (Томск, Россия)

Матвеева М.В., доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экспертизы и управления недвижимостью Иркутского национального исследовательского технического университета, советник РААСН (Иркутск, Россия)

Нгуен Туан Ань, доктор технических наук, научный сотрудник кафедры водоснабжения и водоотведения Университета природных ресурсов и окружающей среды (Хошимин, Вьетнам)

Новицкий Н.Н., доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией трубопроводных и гидравлических систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (Иркутск, Россия)

Сетогуту Тсуеши, доктор технических наук, профессор департамента архитектуры Университета Хоккайдо (Япония)

Сколубович Ю.Л., доктор технических наук, профессор, ректор Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета, член-корреспондент РААСН (Новосибирск, Россия)

Стенников В.А., доктор технических наук, профессор, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Академик РАН (Иркутск, Россия)

Урханова Л.А., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры дорожно-строительных материалов Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (Москва, Россия)

Фань Фэн, профессор, советник ректора Харбинского политехнического университета, заместитель исполнительного директора Ассоциации технических университетов России и Китая (Харбин, Китай)

Федюк Р.С., доктор технических наук, профессор Военного учебного центра Дальневосточного федерального университета, советник РААСН (Владивосток, Россия)

Фолькер Циглер, доктор архитектуры, профессор, заведующий кафедрой городского планирования и проектирования Страсбургской архитектурной школы (Страсбург, Франция)

Холодова Л.П., доктор архитектуры, профессор, заведующий кафедрой теории архитектуры и профессиональных коммуникаций Уральского государственного архитектурно-художественного университета, член-корреспондент Академии художеств, советник РААСН (Екатеринбург, Россия)

Энгель Барбара, доктор архитектуры, специалист по городскому планированию Дрезденского технического университета (Дрезден, Германия)

Яськова Н.Ю., доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой инвестиционно-строительного бизнеса и управления недвижимостью Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (Москва, Россия)

EDITORIAL BOARD

Peshkov V.V., Doctor of Economical Sciences, Professor, Head of the Department of Real Estate Expertise and Management of Irkutsk National Research Technical University, Advisor to the RAACS, Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)

Chupin V.R., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Urban Development and Municipal Economy of Irkutsk National Research Technical University, Advisor to the RAACS, Deputy Chief Editor (Irkutsk, Russia)

Batmunkh Sereeter, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Academy of Sciences of Mongolia, Director of the Institute of Thermal Engineering and Industrial Ecology of Mongolian Academy of Sciences, Head of Department of Thermal Power Plants of the Mongolian State University of Science and Technology (Ulan Bator, Mongolia)

Bekker A.T., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Engineering School of Far Eastern Federal University, Corresponding member of RAACS (Vladivostok, Russia)

Bolshakov A.G., Doctor of Architecture, Professor, Head of the Department of Architectural Design of Irkutsk National Research Technical University, Advisor to the RAACS (Irkutsk, Russia)

Walter Fogt, Doctor of Technical Sciences, Specialist in transportation planning, Stuttgart University (Germany)

Vasiliev Yu.E., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Road Construction Materials of Moscow Automobile and Highway State Technical University, Full Member of the International Institute of Builders, Expert of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Grebenyuk G.I., Doctor of Technical Sciences, professor, Head of the Department of Construction Mechanics of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Advisor to the RAACS (Novosibirsk, Russia)

Davaasuren Avirmed, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Regional Studies and Multilateral Interactions of the Institute of Foreign Studies of the Academy of Sciences of Mongolia (Ulan Bator, Mongolia)

Dimitra Nikolau, Doctor of Architecture, Professor, Department of Urban and Regional Planning of School of Architecture of Athenes National Technical University (Athenes, Greece)

Erofeev V.T., Doctor of Technical Sciences, professor, Head of the Department of Building Materials and Technologies of National Research Mordovian State University named after N.P. Ogareva, Academician of RAACS (Saransk, Republic of Mordovia, Russia)

Yefimov A.V., Doctor of Architecture, Professor, Head of Department of architectural environment design of Moscow Architectural Institute, State Prize Winner of RF, Honored Art Worker (Moscow, Russia)

Zbigniew Wojcicki, Doctor of Technical Sciences, Professor, Civil Engineering Department, Wroclaw University of Technology (Wroclaw, Poland)

Kalyuzhnova N.Ya., Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of Department of Economics and Management of Irkutsk State University (Irkutsk, Russia)

Kovachev A.D., Doctor of Architecture, Professor, Head of Department of Architecture and Urbanistics, Architecture Faculty of Varna Free University of named after Ch. Hrabar, Foreign Member of RAACS (Varny, Bulgaria)

Leonard Shenk, Doctor of Architecture, Professor of the Faculty of Architecture and Design of the KonstantsUniversity (Konstants, Germany)

Leonovitch S.N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building technologies of Byelorussian National Technical University, Deputy Chairman of the Scientific Council of RAACS "Mechanics of materials and structures destruction", Foreign Academician of RAACS (Minsk, Byelorussia)

Lyakhovich L.S., Doctor of Technical Sciences, professor, Head of the Department of Building Mechanics of Tomsk Architecture and Construction University, Academician of RAACS (Tomsk, Russia)

Matveeva M.V., Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Real Estate Expertise and Management of Irkutsk National Research Technical University, Advisor to the RAACS (Irkutsk, Russia)

Nguyen Tuan An, Doctor of Technical Sciences, Scientific Researcher of Water Supply and Sanitation Department, University of Natural Resources and Environment (Ho Chi Minh, Vietnam)

Novitskii N.N., Doctor of Technical Sciences, professor, Head of the Laboratory Pipeline and Hydraulic Systems of the L.A. Melentiev Institute of Energy Systems of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher (Irkutsk, Russia)

Setoguchi Tsuyoshi, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture, Hokkaido University (Japan)

Skolubovitch Yu.L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of Novosibirsk State University of Architecture and Construction, Corresponding Member of RAACS (Novosibirsk, Russia)

Stennikov V.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chairman of Scientific-Expert of the Board for Energy Efficiency, Corresponding member of Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

Urkanova L.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Road Construction Materials, Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (Moscow, Russia)

Fan Feng, Full Professor, Assistant President, Harbin Institute of Technology, Deputy Executive Director of the Association of Sino-Russian Technical Universities, ASRTU (Harbin, China)

Fedyuk R.S., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Far Eastern Federal University, Adviser to the RAASN (Vladivostok, Russia)

Folker Tsigler, Doctor of Architecture, Professor, Head of the Department of Town-Planning and Design of Strasbourg School of Architecture (Strasbourg, France)

Kholodova L.P., Doctor of Architecture, Professor, Corresponding Member of the Academy of Arts, Head of the Department of Theory of Architecture and Professional Communications, Urals State Architectural-Artistic University, Advisor of RAACS (Yekaterinburg, Russia)

Engel Barbara, Doctor of Architecture, specialist in urban planning of Dresden Technical University (Dresden, Germany)

Yaskova N.Yu., Doctor of Economical Sciences, Professor, Head of the Department of Investment and Construction Business and Real Estate Management at the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Moscow, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

Известия вузов
Инвестиции. Строительство. Недвижимость

Том 15 № 3 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Яськова Н.Ю., Зайцева Л.И., Колосова Т.Н.** Будущее государственного управления: цифровой вектор развития 384

СТРОИТЕЛЬСТВО

- Абдрахимов В.З.** Получение керамического стенового материала на основе горелых пород и фосфорного шлака без применения природного традиционного сырья 400
- Безруких О.А.** Формирование территориально-распределенной сетевой структуры по выпуску домокомплектов заводской готовности в малоэтажном жилищном строительстве 409
- Влад И.В., Цховребов Э.С., Лебедев А.Е., Филиппова О.П.** Исследование техногенных циклов обращения ресурсов и продукции как информационно-аналитическая база прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера 420
- Иринчинова Н.В., Филатова Е.Г. Дударев В.И., Кульков В.Н.** Водоочистка техногенных растворов от ионов никеля (II) комбинированным процессом 433
- Исупов Н.С., Фомин Н.И.** Сравнительный анализ эффективности способов оценки выполненных строительных работ по облаку точек 442
- Коротынская В.С., Тарасова Е.В.** Применение сезонной аккумуляция естественного холода в современном кондиционировании как технологии сокращения выбросов парниковых газов 454
- Курилин С.С., Курилина Т.А., Пазенко Т.Я., Войтов Е.Л.** О возможности применения современных реагентов-осадителей для извлечения ионов тяжелых металлов из сточных вод гальванического производства 466
- Первов А.Г., Спицов Д.В., Саид Ахмад М.И.** Новая технология сокращения и утилизации концентратов установок обратного осмоса путем создания условий для кристаллизации малорастворимых солей в каналах аппаратов 477
- Саввин Н.Ю., Ильина Т.Н., Лесовик Р.В., Шевцова А.Г., Киреев В.М.** Повышение эффективности систем создания микроклимата 501
- Самарин А.Ю., Байбуurin А.Х.** Критерии системы качества проектных организаций: модульный подход с учетом рисков 516
- Тюрюханов К.Ю., Иванов С.А.** Влияние структурообразующей модифицирующей добавки Plastobit на основе синтетических восков на физико-механические показатели битума и асфальтобетона 526
- Чернышов Л.Н., Калгушкин А.Г.** Электронная форма технической документации, основа современных методов эксплуатации объектов недвижимости 539
- Чупин В.Р., Кульков В.Н., Ярыгин Р.Н., Чупин Р.В., Лавыгина О.Л.** Системы водоотведения на особо охраняемых территориях, проблемы и пути решения 550

АРХИТЕКТУРА. ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ДИЗАЙН

- Глебова Н.М., Кламер М.** Сохранение, формирование и создание новой архитектурной идентичности в исторических сельских поселениях 560
- Клайма Э.И., Золотарева М.В.** Ландшафтная ревитализация природных территорий в структуре города 575
- Пичугов П.А., Шабиев С.Г.** Применение искусственного интеллекта и машинного обучения для BIM 586

CONTENTS

Proceedings of Universities Investment. Construction. Real estate

Том 15 № 3 2025

CONTENTS

ECONOMICS AND MANAGEMENT

- Yaskova N.Yu., Zaitseva L.I., Kolosova T.N.** The future of public administration: a digital vector of development 384

CONSTRUCTION

- Abdrakhimov V.Z.** Production of ceramic wall material based on burnt rocks and phosphoric slag without the use of natural traditional raw materials 400
- Bezrukikh O.A.** Formation of a geographically distributed network structure for the production of factory-ready housing kits in low-rise housing construction 409
- Vlad I.V., Tshovrebov E.S., Lebedev A.E., Filippova O.P.** Research of technogenic cycles of resource and product circulation as an information and analytical base for forecasting and preventing technogenic emergencies 420
- Irinchinova N.V., Filatova E.G., Dudarev V.I., Kulkov V.N.** Water purification of technogenic solutions from nickel (II) ions by a combined process 433
- Isupov N.I., Fomin N.I.** Comparative analysis of the effectiveness of methods for evaluating completed construction work using a point cloud 442
- Korotynskaya, V.S., Tarasova E.V.** The use of seasonal accumulation of natural cold in modern air conditioning as a technology to reduce greenhouse gas emissions 454
- Kurilin S.S., Kurilina T.A., Pazenko T.Ya., Voytov E.L.** On the possibility of using modern sedimentation reagents to extract heavy metal ions from wastewater from electroplating 466
- Pervov A.G., Spitsov D.V., Saeed Ahmad M.I.** A new technology for reducing and disposing of concentrates from reverse osmosis plants by creating conditions for the crystallization of insoluble salts in the channels of the devices 477
- Savvin N.Yu., Ilyina T.N., Lesovik R.V., Shevtsova A.G., Kireev V.M.** Improving the efficiency of microclimate creation systems 501
- Samarin A.Yu., Baiburin A.Kh.** Criteria of the quality system of design organizations: modular approach taking into account risks 516
- Tyuryukhanov K.Yu., Ivanov S.A.** The effect of the structure-forming modifying additive Plastobit based on synthetic waxes for the physical and mechanical properties of bitumen and asphalt concrete 526
- Chernyshov L.N., Kalgushkin A.G.** The electronic form of technical documentation, the basis of modern methods of operation of real estate 539
- Chupin V.R., Kulkov V.N., Yarygin R.N., Chupin R.V., Lavygina O.L.** Wastewater disposal systems in specially protected areas, problems and solutions 550

ARCHITECTURE. URBAN CONSTRUCTION. DESIGN

- Glebova N.M., Klammer M.** Preservation, formation and creation of a new architectural identity in historical rural settlements 560
- Klayma E.I., Zolotareva M.V.** Landscape revitalization of natural territories in the city structure 575
- Pichugov P.A., Shabiev S.G.** Application of artificial intelligence and machine learning for BIM 586



Будущее государственного управления: цифровой вектор развития

Н.Ю. Яськова^{1✉}, Л.И. Зайцева², Т.Н. Колосова³

^{1,2,3}Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Москва, Россия

Аннотация. Масштаб задач реструктуризации национальной экономики требует не только концентрации ресурсов на стратегически важных направлениях, но и создания синергии сопряжения производственных мощностей с целями создания новых транспортных коридоров, кадровым обеспечением, решением задач обновления социальной сферы и обеспечением безопасности и суверенитета нашей страны. В ряде хозяйственных сегментов нарастают противоречия интересов органов власти и хозяйствующих субъектов. В результате множество даже успешно реализуемых проектов не сопровождается мультиплицирующими эффектами в смежных сферах экономики. На государственном уровне отсутствует общая картина пространственного развития страны. Как следствие, государственное управление в условиях бюджетных ограничений, вызванных нарастающими санкциями, лишено объективной основы не только для постановки целей и принятия управленческих решений, но и для разработки исполнительных механизмов их достижения. Предпринимаемые Минстроем Российской Федерации меры в части повышения качества принимаемых решений, фокусируются на использовании накапливаемых в процессе строительства и градостроительной деятельности аналитических данных. Последние необходимы как для прогнозирования, так и для планирования строительной деятельности, позволяя снизить, а по возможности исключить ошибки проектирования, заранее предусмотреть возможные проблемы взаимодействия участников инвестиционно-строительных процессов различных уровней и, как результат, повысить качество строительства и сократить продолжительность инвестиционно-строительного цикла.

Ключевые слова: градостроительная деятельность, строительные процессы, база данных, цифровизация, информационные системы, цифровые сервисы, государственная экспертиза, вертикальная интеграция

Для цитирования: Яськова Н.Ю., Зайцева Л.И., Колосова Т.Н. Будущее государственного управления: цифровой вектор развития // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 384–399. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-384-399>. EDN: QFDVAU.

Original article

The future of public administration: a digital vector of development

Natalia Yu. Yaskova^{1✉}, Larisa I. Zaitseva², Tatiana N. Kolosova³

^{1,2,3}Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia

Abstract. The scale of the tasks of restructuring the national economy requires not only the concentration of resources in strategically important areas, but also the creation of synergies between production capacities and the goals of creating new transport corridors, staffing, solving the tasks of updating the social sphere and ensuring the security and sovereignty of our country. In a number of business segments, contradictions between the interests of government authorities and business entities are growing. As a result, many successfully implemented projects are not accompanied by multiplier effects in related areas of the economy. At the state level, there is no overall picture of the spatial development of the country. As a result, public administration in conditions of budget constraints caused by increasing

sanctions is deprived of an objective basis not only for setting goals and making managerial decisions, but also for developing executive mechanisms to achieve them. The measures taken by the Ministry of Construction of the Russian Federation in terms of improving the quality of solutions are focused on the use of analytical data accumulated during construction and urban planning activities. The latter are necessary both for forecasting and for planning construction activities, making it possible to reduce and, if possible, eliminate design errors, anticipate possible problems of interaction between participants in investment and construction processes at various levels and, as a result, improve the quality of construction and shorten the duration of the investment and construction cycle.

Keywords: urban planning, construction processes, database, digitalization, information systems, digital services, government expertise, vertical integration

For citation: Yaskova N.Yu., Zaitseva L.I., Kolosova T.N. The future of public administration: a digital vector of development. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):384-399. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-384-399>. EDN: QFDVAU.

ВВЕДЕНИЕ

Современный фокус государственного управления концентрируется на мерах обеспечения экономического суверенитета. Его основа – самодостаточность и конкурентоспособность производственной сферы национальной экономики. Технологическая отсталость, а в ряде случаев отсутствие отечественного производства ряда товарных групп, разрывает технологические цепочки производства конечной продукции. Если они оперативно восстановлены, то эффективность производства существенно снижается за счет использования параллельного импорта или замещения отечественными аналогами. Ситуация усугубляется неготовностью транспортно-логистических коридоров к обслуживанию изменивших конфигурацию товарных потоков. Указанные обстоятельства требуют несопоставимо высоких, по сравнению с досанкционной реальностью, темпов инфраструктурного строительства. Отметим, что их обеспечение происходит в условиях дефицита бюджетного финансирования, а также накопленных за последнее десятилетие проблем освоения государственных капитальных вложений.

Оценка готовности строительной отрасли к новому строительству, реновации и реконструкции объектов производственной и транспортной инфраструктуры имеет в настоящее время положительную коннотацию¹. Темпы инфраструктурного строительства существенно выше темпов жилищного и индивидуально-строительства. По словам вице-премьера Хуснуллина М.Ш. усилия Правительства Рос-

сийской Федерации и меры поддержки стратегического вектора развития были сосредоточены, помимо решения жилищной проблемы и обновления жилищно-коммунального хозяйства, на сохранении темпов инфраструктурного строительства, в особенности дорожного, обеспечивая формирование новых транспортно-логистических коридоров, и недопущении приостановки и консервации объектов капитального строительства, в том числе вследствие снижения критически важного импорта оборудования².

Решение обозначенных задач потребовало оперативной реакции правительства с целью поддержки строительной отрасли.

МЕТОДЫ

Наряду с адресной поддержкой отдельных производств, государственное управление было нацелено на создание условий парирования деструктивных процессов в национальной экономике. Это, в первую очередь, строительство как отрасль, обеспечивающая обновление производственной базы. Исследование, проведенное Экспертным институтом социальных исследований, показало, что в эпицентре внимания управляющей системы находилась проблема ресурсообеспечения и замещение нехватки отечественного оборудования и строительных материалов³.

Предпринимаемые Правительством Российской Федерации меры позволили 62 % участникам строительного процесса применять отечественные материалы и оборудование. Для решения проблемы замещения импорта Национальное объединение строителей

¹Дом РФ – финансовый институт развития в жилищной сфере России. Режим доступа: <https://www.xn--d1aqf.xn--p1ai/> (дата обращения: 25.06.2025).

²Национальные проекты: ожидания, результаты, перспективы года. Режим доступа: https://raexpert.ru/researches/national_project_2020 (дата обращения: 25.06.2025).

³Отрасли в условиях санкций. Режим доступа: <https://eistr.ru/upload/iblock/579/579bf5a29fb1ff7c53f6b973081f48ae.pdf> (дата обращения: 25.06.2025).

(НОСТРОЙ) сформировало «Каталог импортозамещающих строительных материалов и оборудования» – электронный сервис для быстрого подбора аналогов строительных материалов, изделий, оборудования, машин и механизмов иностранного производства на отечественные или поставляемые из дружественных государств. Продолжился системный переход строительной отрасли на цифровые технологии с целью не только сокращения документооборота на бумажных носителях, но и обеспечения достоверности информации для оперативного принятия управленческих решений. Кроме того, в настоящее время Минстрой России готовит проект дорожной карты до 2026 г. по расширению области применения инновационных материалов в строительстве.

В рамках парирования последствий санкционного давления на отрасль по итогам ана-

лиза НОСТРОЙ высокую эффективность показали меры поддержки строительной отрасли (рис. 1)⁴. Важно также отметить, что к началу 2024 г. объем поддержки российской экономики организациями развития, входящими в периметр ВЭБ, и коммерческими банками составил 11 трлн руб., а до конца 2024 г. он должен достигнуть 17 трлн руб. Среди уже реализованных проектов – строительство нового терминала аэропорта в г. Новый Уренгой и химпроизводства в Тюменской области, строительство крупнотоннажных судов в Приморье и Центральной кольцевой автодороги в Подмосковье. На поддержку обрабатывающей промышленности, критически важной для государства, ВЭБ за пять лет предоставил более триллиона рублей, при этом годовой объем финансирования с 2018 г. увеличился более чем в четыре раза.



Рис. 1. Меры поддержки строительной отрасли (по состоянию на 2023 г.)
Fig. 1. Fig. 1. Measures to support the construction industry (as of 2023)

Один из наиболее востребованных инструментов кредитования крупных проектов в приоритетных отраслях – «Фабрика проектного финансирования»⁵.

Через нее заемщики получают средства на основании договоров синдицированного кредита с участием коммерческих банков и ВЭБ. Госкорпорация отбирает потенциальные про-

⁴Стройкомплекс Москвы готов к новым вызовам. Режим доступа: <https://www.mk.ru/moscow/2022/07/20/stroykompleks-moskvy-gotov-k-novym-vyzovam.html> (дата обращения: 25.06.2025).

⁵Постановление Правительства РФ от 15 февраля 2018 г. № 158. О программе «Фабрика проектного финансирования» (с изменениями и дополнениями)

екты, участвует в структурировании финансирования и выступает кредитным управляющим в рамках синдиката.

Через «Фабрику проектного финансирования» реализованы такие проекты, как строительство комплекса для перевалки угля в морском порту Ванино, химическое производство в Тульской области, модернизация новосибирского аэропорта Толмачево и создание системы маркировки ряда товаров.

Кабинет министров также внес изменения в работу «Фабрики проектного финансирования», сделав этот инструмент еще более привлекательным для бизнеса.

Требования к доле собственных средств инвестора снизились – теперь внести можно 15, а не 20 %, как раньше. При этом, ВЭБ возьмет на себя до 25 % инвестиций в проект. У инвесторов также появится возможность заменять кредитное финансирование ВЭБ на предоставление поручительств от госкорпорации. Таким образом, участники программы станут более свободными в выборе условий кредитования. Если собственных средств инвестору все еще не хватает, то предусмотрен новый механизм – фонды акционерного капитала. Фонды, которые создаются за счет вложений ВЭБ и банков, смогут предоставлять для инвестиционных проектов недостающие средства – от 5 до 10 % от их стоимости. Запуск фондов позволит профинансировать проекты на сумму от двух триллионов рублей. На фоне преодоления деструктивного влияния санкций в результате анализа удалось установить, что в настоящее время даже при наличии необходимых строительных и производственных мощностей зачастую решить проблему ускорения строительного производства не представляется возможным. Практика показала, что наряду с успешно решенными вопросами (сокращение бюрократических барьеров и др.), проблемы качества проектов строительства, наполнения инвестиционно-строительных процессов квалифицированными кадрами, ускорения внедрения новых технологий и создания комфортной бизнес-среды по-прежнему не решены [1]⁶. В частности, в сфере государственного заказа проблемы планирования капитальных вложений носят хронический характер, также как обеспечение бесконфликтного строительства. Именно в этих зонах менее всего ощущаются меры государственной поддержки отрасли, но при этом

аккумулируются последствия санкций и вызовов развития.

Так, из-за высокой продолжительности строительства объектов капитального строительства, создаваемых по государственному заказу, ущерб от санкций, затронувших поставку оборудования и материалов, нарастает, требуя корректировки стартовых условий планирования государственных капитальных вложений [2]. При этом, вынужденные, в результате санкций, изменения по стоимости и продолжительности строительно-монтажных работ фактически касаются всех участников инвестиционно-строительных процессов.

В результате возникают противоречия и конфликт интересов участников строительства [3]. В таких условиях действующий порядок разрешения хозяйственных споров объективно не справляется с нарастающими вызовами, требуя выработки новых подходов не только к планированию, но и к процессам осуществления капитальных вложений с целью преодоления структурных вызовов и разрешения возникающих проблем анализа и учета [4]. Масштаб проблемы характеризуется следующими данными. Только государственный классификатор строительных ресурсов включает в себя около 130 тыс. позиций. И это пока далеко не полный перечень, а только то, что удалось обработать к настоящему времени. Кроме того, широкий диапазон строительных работ, длительные временные рамки, высокая капиталоемкость осуществляемых проектов, обязательность прохождения государственных процедур экспертизы и контроля делают процессы подготовки и осуществления строительства крайне трудоемкими и чувствительными к качеству разработки проектной документации, а также последующему исполнению проектных решений [5]. При этом общая экономическая нестабильность в стране и мире непрерывно вносят свои коррективы и требуют оперативного внесения изменений в проект, нарушая ранее установленные сроки и принятые планы государственных капитальных вложений [6].

Попытки разрешить противоречия освоения государственных капитальных вложений отражены в различных федеральных программных документах.

Важнейшим является комплексная государственная программа «Строительство», утвержденная 01.01.2023 г. на пятилетний пе-

⁶Стройкомплекс Москвы готов к новым вызовам. Режим доступа: <https://www.mk.ru/moscow/2022/07/20/stroykompleks-moskvy-gotov-k-novym-vyzovam.html> (дата обращения: 25.06.2025).

риод⁷. Программа закрепляет за государством сферы инфраструктурного строительства, в том числе коммунальную, транспортную, социальную, туристическую и др. Целью программы является формирование комфортной и безопасной среды для жизни при условии минимизации негативного воздействия строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства на окружающую среду. Особенностью данной программы стало существенное увеличение срока и горизонта планирования. В условиях поставленных задач программа «Строительство» предполагает достижение таких результатов, как уменьшение сроков и оптимизация процедур принятия решений при осуществлении капитальных вложений за счет средств федерального бюджета, существенное сокращение инвестиционно-строительного цикла (в 1,5 – 2 раза) и расши-

рение механизмов опережающего финансирования строительства с целью досрочного ввода объектов капитального строительства в эксплуатацию. В то же время программа унаследовала основные принципы и методологию планирования государственных капитальных вложений постсоветского периода.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Срыв планов государственных капитальных вложений проявляется в росте незавершенного строительства, в возрастании периода строительства, в переносах сроков ввода в действие, перерасходе сметы и др. [7, 8]. Основываясь на «Методических рекомендациях по проведению инвентаризации незавершенного строительства, финансируемого за счет государственного бюджета», установим состав основных причин приостановки строительства (рисунок 2)⁸.

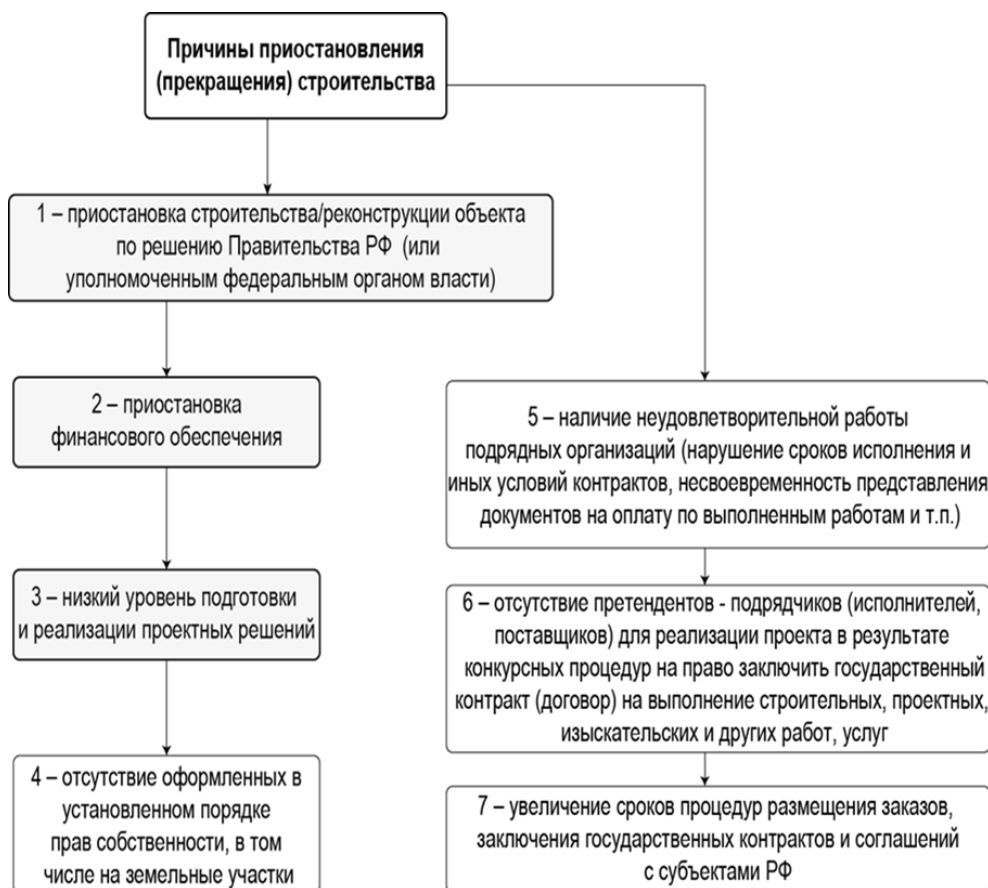


Рис. 2. Ренкинг причин приостановления строительства
Fig. 2. Ranking of the reasons for the suspension of construction

⁷Постановление Правительства Российской Федерации от 30.09.2022 г. № 1730 Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации «Строительство».

⁸Приложение № 1 к совместному письму Минфина России и Федерального казначейства от 22.12.2015 № 02-06-07/75364 и от 22.12.2015 № 07-04-05/02-874 Методические рекомендации по проведению главными распорядителями средств федерального бюджета инвентаризации объектов незавершенного строительства, вложений в объекты недвижимого имущества, и по представлению информации о результатах указанной инвентаризации, с указанием детальных сведений по каждому объекту (далее – Методические рекомендации).

Систематизация причин такого положения дел показала, что планы срываются по решению Правительства Российской Федерации и могут быть связаны с изменением приоритетов, перераспределением средств между другими объектам, нехваткой изначально предусмотренных инвестиций в силу подорожания строительных ресурсов и иных причин. Возможно приостановка финансового обеспечения по решениям региональных властей. Это связано с существенными различиями между планируемой и фактической стоимостью строительства, возможностью использования инвестиционных резервов лишь на некоторых объектах. С большой степенью вероятности можно утверждать, что существенное значение имеет низкий уровень подготовки проектных решений. Проведенное исследование показало, что для подготовки проектной документации в систему отношений государственным заказчиком вовлекается проектная организация, которая отвечает перед заказчиком за успешное прохождение государственной экспертизы. Как результат, углубление в детализацию проектных решений, увеличение периода времени на тщательную проработку проекта находятся вне зоны интересов проектных организаций. Документация разрабатывается по принципу минимальной достаточности и в последующем, в зависимости от квалификации подрядной организации, многократно дорабатывается при формировании комплекта документов рабочей стадии («Р»).

Также немаловажное значение имеет квалификация и опыт подрядных предприятий, которые при отсутствии опыта и необходимых компетенций нарушают контрактные условия, переносят сроки работ и вызывают иные негативные последствия, приводящие к долгострою. Отчасти такое положение дел – следствие ценовой конкуренции. В большинстве случаев исполнитель – строительное предприятие, которое вынуждено работать на уровне прибыли, близкой к нулю. Это не позволяет качественно развиваться, вкладывать средства на перевооружение, инновационное развитие, привлечение высококвалифицированных кадров и выполнение работы на необходимом профессиональном уровне.

Несостоятельность торгов является прямым следствием имеющейся системы планирования строительства, подготовки проектной и сметной документации с определением начальной максимальной цены контракта. Низкая норма прибыли или вовсе убыточность строительных работ, которые выводятся на аукционы, приводит к росту прецедентов не-

возможности освоения бюджетных средств и низкой эффективности государственных закупок.

Кроме того, отсутствие согласительных (внесудебных) механизмов разрешения хозяйственных споров существенно затрудняют достижение таких целей, как сокращение количества объектов незавершенного строительства и обеспечение опережающих темпов объемов ввода в эксплуатацию объектов капитального строительства [9]. Анализ показал, что особенно остро проблема согласования экономических интересов касается различных областей взаимодействия с публичным элементом: получение разрешительной документации, прохождение государственной экспертизы проектной документации, согласование мер поддержки, ведение переговоров на стадии закупок, а также четкая, проработанная документация по проекту и контрактные конструкции, которые должны учитывать современные реалии и вызовы [10]. Внедрение таких механизмов на различных уровнях взаимодействия участников инвестиционно-строительной деятельности и на всех этапах жизненного цикла проектов является важным условием обеспечения бесконфликтного строительства.

Таким образом, существующий порядок содержит фундаментальное противоречие, состоящее в следующем, чтобы включить в адресную программу объект, нужно подготовить техническое задание на объект строительства, на конкурсной основе заключить государственный контракт с проектной организацией, провести проектно-изыскательские работы, получить заключение органа государственной экспертизы, осуществить оплату этих услуг. После таких длительных, трудоемких и дорогостоящих работ направляется заявка в Минстрой России для включения в адресную программу. Но Минстрой России в рамках своих лимитов может включить в программу только ограниченное количество объектов.

Следовательно, часть объектов, прошедших экспертизу, могут быть перенесены на неопределенный срок. Это утрата актуальности проектной и сметной документации. Из сказанного очевидна главная причина срывов планов государственных капитальных вложений. Она состоит в отсутствии механизма предварительной оценки стоимости. Без такого механизма Минстрой России не может адекватно оценить заявки главных распорядителей средств, а главные распорядители средств не владеют сведениями, на что им

конкретно рассчитывать и в каком объеме готовить свои предложения.

В то же время даже при успешном прохождении процедур подготовки и заключения государственного контракта за время строительства возникает серьезная проблема непредусмотренного роста стоимости строительных ресурсов, что на практике является препятствием успешной сдачи этапов выполненных работ.

В сложившихся условиях рост стоимости множества ценообразующих ресурсов происходит на десятки процентов, при этом в контракте будущая стоимость корректируется лишь на индекс-дефлятор, который в последние годы находится в пределах 4–5 %.

Для устранения этой диспропорции Правительство Российской Федерации в 2021 г. регламентировало порядок внесения изменений в исполняемые контракты для учета возросшей стоимости строительных ресурсов более чем на 30 % с момента заключения госконтракта⁹. Это вынужденный шаг, призванный ликвидировать недостатки механизма подготовки к заключению контракта, но компенсация недостатков ложится на подрядные организации, вынужденные обосновывать данные по удорожанию и направлять их на экспертизу, оплачивать ее проведение, используя для этого собственные оборотные средства, резервы рабочего времени, квалифицированных специалистов. Это затрудняет процесс строительства, отвлекая ресурсы на постоянные корректировки документации и условия контракта. Именно в необходимости непрерывной корректировки контрактов проявляются кумулятивные последствия санкционного давления, вызывая конфликты между участниками инвестиционно-строительной деятельности.

Выявленные причины, непозволительные в сложившихся условиях, имеют одну общую основу – фрагментарную и недостоверную информацию. В результате механизм планирования не опирается на достоверную статистику, факты, результаты причинно-следственного анализа стоимостных коллизий и исследования взаимосвязей разных факторов при определении предполагаемой стоимости строительства. Из-за просчетов на этапе планирования будущие объекты строительства либо отклоняются и не получают финансового обеспечения, либо этих средств оказывается недостаточно. В итоге большая часть объектов капитального строительства вводится в действие с нарушением сроков.

Часть из них остается в состоянии долгостроя – незавершенного строительства. Такое положение дел является причиной крайне серьезных вызовов, касающихся организации системного сбора данных по максимально широкому перечню законченных объектов. Как минимум все объекты, которые реализуются с привлечением средств бюджетной системы Российской Федерации, должны быть исследованы.

Цель – подготовка к применению и внедрению в практику эконометрических и статистических методов анализа взаимосвязей, позволяющих наполнять данными прогнозные модели стоимости строительства.

Без этих мер принципиально повысить эффективность системы планирования не представляется возможным. Касательно ценообразования отметим – стоимость объектов, получивших одобрение в госпрограммах, определяется исходя из усредненных общих условий строительства. Более того, крайне слабо поддается учету текущая стоимость строительных ресурсов. В основном вся информация формируется из прошлого с применением разных способов пересчета. Нормы затрат ресурсов в настоящее время практически не актуализируются. Принимая к сведению то, что сметно-нормативная база в своей основе реализует принципы, заложенные 30–40 лет назад и более, она абсолютно не отражает современное состояние цен ресурсного наполнения строительных процессов. В этом случае качество информационного ресурса абсолютно недостаточно не только для достоверного определения стартовой цены государственного строительного заказа, но и для мониторинга хода выполнения контракта и оценки эффективности жизненного цикла объекта капитального строительства. Для объективной оценки необходима телеметрия, сбор информации с разных электронных датчиков о состоянии объекта в разное время и в разных режимах и состояниях с целью осуществления дальнейшей обработки и глубокого анализа данных с обязательной возможностью передачи разных показателей проектировщикам для использования в проектировании будущих объектов [11]. Активно развивающиеся в настоящее время BIM-модели уровня 5-6D как раз и предполагают работу с информацией на всех стадиях жизненного цикла, включая стадию эксплуатации объекта [12]. Таким образом, основной причиной сбоя управленческого цикла в отношении государ-

⁹Постановление Правительства РФ от 9 августа 2021 г. № 1315 О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации

ственных капитальных вложений является несоответствие принципов планирования государственного строительного заказа сформировавшимся на практике закономерностям проектного цикла строительства и эксплуатации объектов недвижимости [13]. Высокая ценовая динамика ресурсного наполнения объектов капитального строительства на различных этапах их жизненного цикла, нестабильность хозяйственной деятельности участников строительного процесса, сложное администрирование прохождения согласований на строительство, крайне затяжной характер разрешения хозяйственных споров, высокий уровень накопленного незавершенного строительства требуют наведения порядка на учетно-контрольном этапе управленческого цикла [14]. Это значит, что информационный ресурс должен быть не только структурирован по распорядителям государственных капитальных вложений, видам ресурсов и этапам жизненного цикла объекта капитального строительства, но и по участникам строительства и эксплуатации недвижимости [15]. Таким образом, выход из сложившейся ситуации крайне низкой эффективности государственного управления капитальными вложениями в этой связи видится в создании целостной информационной системы, актуализируемой в оперативном режиме данных [16].

Целевой фокус информационной системы в строительстве и эксплуатации недвижимости, следуя принятым программным документам в области государственного управления, определяется необходимостью сокращения общих издержек, повышением финансовой эффективности и сокращением длительности процедур согласования и разрешения хозяйственных споров. Синхронизация инвестиционно-строительных процессов, достоверность данных, необходимых для принятия управленческих решений, достигаются созданием цифровой вертикали строительной отрасли, объединяющей информационные системы и цифровые сервисы, взаимодействующие друг с другом. Тем самым создаются условия для перевода и хранения всех видов строительной и градостроительной документации в цифровом виде [17]. При этом формируемая цифровая вертикаль отрасли сможет решать основной блок задач по автоматизации и

ускорению инвестиционно-строительных процессов, оптимизации затрат, минимизации ошибочных решений, устранению долгостроев и др. при соблюдении следующих условий:

1. Осуществление учета всех объектов капитального строительства по этапам их жизненного цикла с учетом территориальной принадлежности, необходимой строительной и градостроительной информации.

2. Обмен информацией между участниками строительства, органами власти и другими заинтересованными лицами.

3. Накопление и актуализация данных по всем информационным системам и сервисам.

4. Обеспечение использования накапливаемых данных в процессе проектной, строительной и градостроительной деятельности, в том числе при прогнозировании социально-экономического развития регионов, краткосрочном и среднесрочном планировании строительной деятельности, разработке проектов создания производственных мощностей строительной индустрии и др.

5. Создание инфраструктуры для мониторинга и аналитики этапов жизненного цикла объектов капитального строительства в целях рационального использования ресурсов при проектировании, строительстве, реконструкции, эксплуатации и ликвидации объектов.

Рекомендуемый состав строительной и градостроительной документации приведен на рис. 3. Как видно из рисунка, основой нового подхода к информационной структуре отрасли является практическая реализация принципа вертикальной сопряженности. При создании «Цифровой вертикали строительной отрасли» (ЦВСО) слаженно сработали Минстрой России и Национальное объединение организаций в сфере технологий информационного моделирования. Их альянс в целях оптимизации процессов позволил создать и утвердить для государственного строительного надзора 17 XML – схем исполнительной документации и общего журнала работ. В настоящее время ведется системная работа по реализации проектов 40 XML – схем документов для ГСН и 130 XML – схем документов исполнительной и градостроительной документации, используемой в строительстве с последующей апробацией^{10,11,12}. В целом ЦВСО объединяет не только информационные системы, но и циф-

¹⁰Платформа строительных сервисов. Режим доступа: <https://csp24.ru> (дата обращения: 25.06.2025).

¹¹ООО «Цифровая эволюция». Режим доступа: <https://pro-tim.ru/developers/tsifrovaya-evolyutsiya> (дата обращения: 25.06.2025).

¹²Внедрение единой информационной модели: от управления проектом до сдачи объекта. Режим доступа: <https://erzrf.ru/news/bim--eto-khayp-mneniya-i-opyt-tsifrovyykh-vendorov-po-vnedreniyu-yedinoj-informatsionnoy-modeli/> (дата обращения: 25.06.2025).

ровые сервисы, взаимодействующие и взаимодополняющие друг друга, с целью создания условий для перевода и хранения всех документов в строительстве и градостроении в цифровом виде. В таких сервисах размещаются:

- сведения, документы и материалы об объектах строительства;
- данные о градостроительном потенциале территорий и направлениях ее развития;
- иные сведения, расширяющие представления о перспективах развития.

Такое системное представление информации не только упрощает, но и существенно ускоряет обмен данными между участниками инвестиционно-строительной деятельности, позволяя рассматривать, согласовывать и подписывать сопровождающие документы [18].

В качестве основы методологического подхода Минстрой России принял определяющую роль функционалов частей ЦВСО.

Раскроем их сущность и значение в управлении развитием строительной отрасли.



Рис. 3. Состав строительной и градостроительной информации / декомпозиция информации по информационным системам

Fig. 3. Composition of construction and urban planning information / decomposition of information by information systems

Функционал ГИСОГД определяется целями и задачами управления развитием территорий. Для этого строится цифровая модель территории, позволяющая в оперативном режиме принимать управленческое решение с минимальными затратами времени и бюджетных средств, что очень важно для исключения управленческих ошибок. Указанная система является цифровым двойником региона, который необходим как для определения его потенциала, так и для экспертизы готовности к эксплуатации каждого регионального объекта капитального строительства. Важно, что при формировании базы данных учитываются особенности объекта. Они выявляются исходя из существующих социально-экономических потребностей.

Отдельно заметим, что для обеспечения достоверности ГИСОГД должна обновляться в режиме реального времени с тем, чтобы формировать достоверный банк данных, полноценно характеризующих развитие территорий, включая будущую застройку. Перечень документов определяется ч. 4 ст. 56 Градостроительного кодекса. Функционал ИСУП определяется потребностью контроля за ходом реализации адресных инвестиционных программ, реализуемых в рамках государственного заказа.

Система является единым сервисом для хранения, обработки и анализа информации о каждом объекте капитального строительства. Отметим, что из ИСУП данные передаются в ГИСОГД.

Функционал ИС ГСН определяется необходимостью обеспечения обмена данными и документацией в рамках осуществления строительного контроля. Основное направление взаимодействия – ГИСОГД и ИС проектной / подрядной организации.

Функционал ИС проектной / подрядной организации заключается в объединении данных по логистике, учету и контролю инвестиционно-строительной деятельности по всем участникам строительства.

Особенность заключается в наборе модулей, определяющих строительную деятельность (относительно подготовки, передачи и учета проектной и рабочей документации, а также строительных работ). Основные направления взаимодействия системы – ИСУП и ИС эксплуатирующей организации. Функционал ИС эксплуатирующей организации определяется необходимостью выстраивать цифровой двойник объекта.

Платформа для управления строительством в общем виде приведена на рис. 4.

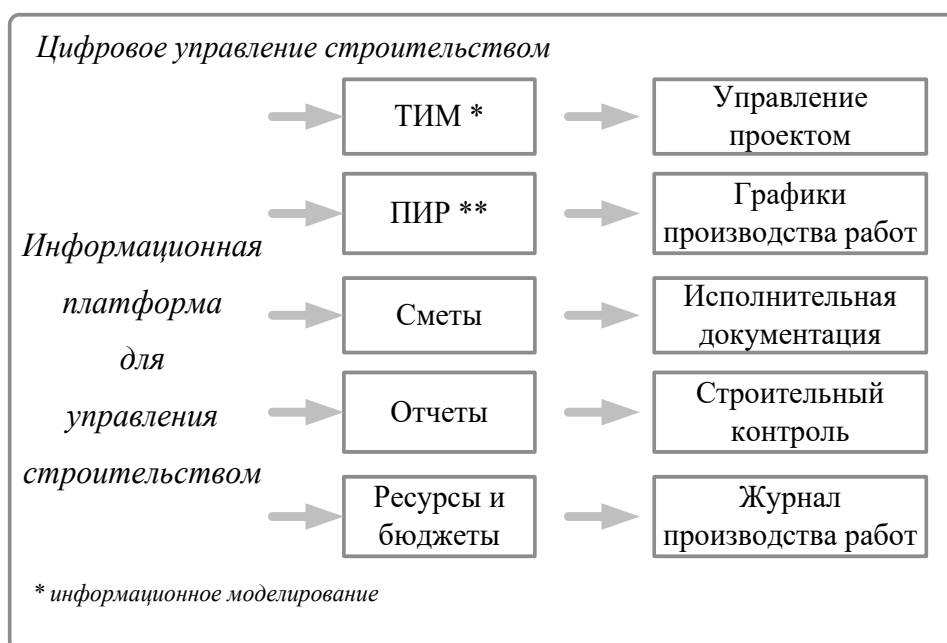


Рис. 4. Платформа для управления строительством в общем виде
Fig. 4. The construction management platform in general

Важно отметить, что основной функционал ИСУП ОКС предназначен для государственных заказчиков. Загрузка в систему требуемых данных предполагает сбор информации в утвержденном формате. Кроме того, загрузка

данных должна соблюдать все требования и осуществляться по алгоритму, этапы которого представлены на рис. 5.

Реализация представленного алгоритма, необходимого для формирования и ведения

информационной модели, потребует создания комплексной инфраструктуры мониторинга и аналитики данных по этапам жизненного цикла объектов капитального строительства.

Отличительной чертой авторского подхода к функциональной декомпозиции ИС управления проектами является реализация методологического принципа учета всех видов инвестиционно-строительных процессов, разнесенных по всем этапам жизненного цикла

объектов капитального строительства и субъектам хозяйствования, принимающим участие в реализации проекта [19].

Таким образом, интеграция информационных систем позволяет синхронизировать деятельность участников по ресурсно-сопряженным процессам. Подсистемы могут дорабатываться как в случае изменения законодательства, так и в результате возникновения новых потребностей в регионе [20, 21].



Рис. 5. Алгоритм действий для передачи данных в ИСУП со стороны генподрядчика
Fig. 5. Algorithm of actions for transferring data to the Project Management Information System on the part of the general contractor

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продвижение идей вертикальной информационной сопряженности потребовало объединения усилий правительства, отраслевого центра, специально созданной общественной организации (НОТИМ), крупных застройщиков и разработчиков программного обеспечения. Все они нацелены на создание единого информационного пространства инвестиционно-

строительной сферы, что обеспечит ускорение и повышение качества инвестиционно-строительных процессов, расширит представления об основах обеспечения нового качества жизнедеятельности, уточнит значение и объемы государственных строительных заказов, сфокусированных на обеспечение опережающего восстановительного роста производственной сферы национальной экономики.

Таким образом, регулятор совместно с НОТИМ и множеством строительных организаций, предприняли попытки сформировать информационные системы с функциональным

покрытием всего комплекса задач циклического управления инвестиционно-строительными процессами в соответствие с приведенной в рис. 6 логикой.



Рис. 6. Цифровизация инвестиционно-строительных процессов
Fig. 6. Digitalization of investment and construction processes

Ее цель заключается в объединении и синхронизации всех этапов жизненного цикла объекта, развертке процессов управления проектами и обеспечении управления портфелем объектов капитального строительства.

Одной из основных тенденций 2023 г. стало возникновение нового типа девелоперских компаний инновационно-технологического типа. Так, ГК «Основа» является пока единственной в стране компанией замкнутого цифрового контура.

Помимо исполнительной документации, оцифрованы процессы сметного контроля, прогнозирования, объективного контроля, ис-

правления дефектов и др. Как заметил Е. Бузлаев (генеральный директор ООО «Интент»), ГК «Основа» внедрила цифровизацию процессов, а не IT-продукт, определив для девелоперов мейнстрим.

Комплексный подход к цифровизации строительной отрасли может быть масштабирован и послужить основой для формирования аналогичных цифровых вертикалей в образовании, медицине и других направлениях, тем самым удастся создать эффективную экосистему государственного управления в короткие сроки и с рациональным использованием бюджетных средств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зайцева Л.И., Викторов М.Ю., Яськова Н.Ю. Альтернативные механизмы разрешения споров в строительстве как фактор практической реализации Национальных проектов развития России. М.: РАНХиГС, 2022. 88 с.
2. Cashman P.K., Ginnivan E. Digital Justice: Online Resolution of Minor Civil Disputes and the Use of Digital Technology in Complex Litigation and Class Actions // *Macquarie Law Journal*. 2019. Vol. 19. P. 39–79.
3. Юдельсон К.С. Отраслевые и межотраслевые принципы рассмотрения хозяйственных споров // *Вестник гражданского процесса*. 2024. Т. 14. № 4. С. 138–142. EDN: IAXFSS.
4. Каменков В.С. Право о медиальности споров, в том числе хозяйственных // *Актуальные проблемы гражданского права*. 2023. № 1. С. 173–183. EDN: FPNHZF.
5. Кирсанов А.Р. Виды комплексного развития территорий // *Имущественные отношения в Российской Федерации*. 2021. № 4. С. 84–89. EDN: ROZHUK.
6. Сулумов С.Х. Экономическая нестабильность как детерминирующий фактор в экономике // *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2021. № 9-2. С. 83–87. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2021-9-2-83-87>. EDN: YNUSFS.
7. Романова Н.В. Незавершенное строительство как важный и особенный актив компании // *Globus*. 2020. № 5. С. 82–85. EDN: TLRTXZ.
8. Иванцова С.Н. Анализ исполнения показателей сметы // *Бюджетный учет*. 2020. № 1. С. 11–15. EDN: NUULWQ.
9. Иншакова А.О., Тымчук Ю.А. Цифровые технологии альтернативных методов разрешения споров: зарубежная практика и перспективы применения // *Право и управление. XXI век*. 2018. № 1. С. 23–31. <https://doi.org/10.24833/2073-8420-2018-1-46-23-31>. EDN: UURDRW.
10. Уткина В.Н., Грязнов С.Ю., Бабушкина Д.Р. Проблемы и перспективы внедрения технологии информационного моделирования в области строительства в России: проблемы и перспективы внедрения // *Основы экономики, управления и права*. 2019. № 1. С. 57–61. https://doi.org/10.51608/23058641_2019_1_57. EDN: YPHGPG.
11. Костин К.Б., Березовская А.А. Современные технологии цифровой экономики как драйвер роста мирового рынка товаров и услуг // *Экономические отношения*. 2019. Т. 9. № 2. С. 455–480. <https://doi.org/10.18334/eo.9.2.40511>. EDN: OHSRAP.
12. Яхья М. BIM-технологии в области проектирования на территории России // *Научный журнал*. 2021. № 3. С. 99–107. EDN: LPZTWG.
13. Новиков М.А., Беляев А.В., Юдин С.В. Некоторые вопросы создания документации в строительстве проектировании // *Вестник МГСУ*. 2011. № 6. С. 455–459. EDN: OWFSUF.
14. Cavallo A., Ghezzi A., Balocco R. Entrepreneurial Ecosystem Research: Present Debates and Future Directions // *International Entrepreneurship and Management Journal*. 2019. Vol. 15. P. 1291–1321. <https://doi.org/10.1007/s11365-018-0526-3>.
15. Журавлев П.А., Сборщиков С.Б. К вопросу использования ресурсно-технологического моделирования при формировании инвестиционных программ // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 7. С. 198–201. https://doi.org/10.12737/article_5940f01b5778c2.44174358. EDN: ZDDACB.
16. Савина С.В. Возможности онлайн-платформ для малого и среднего бизнеса // *Самоуправление*. 2021. № 3. С. 582–585. EDN: CUBVKR.
17. Areo G. The Impact of Artificial Intelligence and Machine Learning on Real Estate: Current Applications and Future Trends // *ResearchGate*. 2024. P. 1–10.

18. Иванов М.В., Румянцева С.Ю. Новая экосистема цифровой недвижимости: этапы развития, технологии и перспективы // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 4. С. 524–533. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-4-524-533>. EDN: YLPFMF.
19. Гареев И.Ф., Мухаметова Н.Н. Внедрение цифровых технологий на этапах жизненного цикла объектов жилой недвижимости // Жилищные стратегии. 2018. Т. 5. № 3. С. 305–322. <https://doi.org/10.18334/zhs.5.3.39692>. EDN: YRLKJV.
20. Berman S.J. Digital Transformation: Opportunities to Create New Business Models // Strategy & Leadership. 2012. Vol. 40. Iss. 2. P. 16–24. <https://doi.org/10.1108/10878571211209314>.
21. Atzei N., Bartoletti M., Cimoli T. A Survey of Attacks on Ethereum Smart Contracts (SoK) // Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer, 2017. Vol. 10204. P. 164–186. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54455-6_8.

REFERENCES

1. Zaitseva L.I., Viktorov M.Yu., Yaskova N.Yu. *Alternative Dispute Resolution Mechanisms in Construction as a Factor in the Practical Implementation of Russia's National Development Projects*. Moscow: RANEPa, 2022. 88 p. (In Russ.).
2. Cashman P.K., Ginnivan E. Digital Justice: Online Resolution of Minor Civil Disputes and the Use of Digital Technology in Complex Litigation and Class Actions. *Macquarie Law Journal*. 2019;19:39-79.
3. Yudelso K.S. Industry and Interindustry Principles for Considering Economic Disputes. *Herald of Civil Procedure*. 2024;14(4):138-142. (In Russ.). EDN: IAXFSS.
4. Kamenkov V.S. The Right on the Media Ability of Disputes, Including Economic Disputes. *Aktualnye problemy grazhdanskogo prava*. 2023;1:173-183. (In Russ.). EDN: FPNHZF.
5. Kirsanov A.R. Types of Integrated Development of Territories. *Imushchestvennye otnosheniya v Rossiiskoi Federatsii*. 2021;4:84-89. (In Russ.). EDN: ROZHUK.
6. Sulumov S.Kh. Economic Instability as a Determining Factor in the Economy. *Journal of Economy and Business: Theory and Practice*. 2021;9-2:83-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2021-9-2-83-87>. EDN: YNUSFS.
7. Romanova N.V. Unfinished Construction as an Important and Special Asset of the Company. *Globus*. 2020;5:82-85. (In Russ.). EDN: TLRTXZ.
8. Ivantsova S.N. Analysis of Budget Performance. *Byudzhetniye uchety*. 2020;1:11-15. EDN: NUULWQ.
9. Inshakova A.O., Tymchuk Yu.A. Digital Technologies of Alternative Dispute Resolution Methods: Foreign Practice and Prospects of Application in Russia. *Journal of Law and Administration*. 2018;1:23-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.24833/2073-8420-2018-1-46-23-31>. EDN: UURDRW.
10. Utkina V.N., Gryaznov S.U., Babushkina D.R. Problems and Prospects of Implementation of Information Modeling Technology in the Construction Field of Russia: Problems and Prospects of Implementation. *Economy, Governance and Law Basis*. 2019;1:57-61. (In Russ.). https://doi.org/10.51608/23058641_2019_1_57. EDN: YPHGPG.
11. Kostin K.B., Berezovskaya A.A. Modern Technologies of the Digital Economy as a Driver of Growth in the World Market of Goods and Services. *Journal of International Economic Affairs*. 2019;9(2):455-480. (In Russ.). <https://doi.org/10.18334/eo.9.2.40511>. EDN: OHSRAP.
12. Yakhya M. BIM Technologies in Design in Russia. *Science Magazine*. 2021;3:99-107. (In Russ.). EDN: LPZTWG.
13. Novikov M.A., Belyaev A.V., Yudin S.V. Some Questions of Creation of the Design Documentation in Building Designing. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2011;6:455-459. (In Russ.). EDN: OWFSUF.
14. Cavallo A., Ghezzi A., Balocco R. Entrepreneurial Ecosystem Research: Present Debates and Future Directions. *International Entrepreneurship and Management Journal*. 2019;15:1291-1321. <https://doi.org/10.1007/s11365-018-0526-3>.
15. Zhuravlev P.A., Sborshikov S.B. On the Question of Use of Resource-Technological Modeling in the Formation of Investment Programs. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named After. V. G. Shukhov*. 2017;7:198-201. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5940f01b5778c2.44174358. EDN: ZDDACB.
16. Savina S.V. Possibilities of Online Platforms for Small and Medium Businesses. *Samoupravlenie*. 2021;3:582-585. (In Russ.). EDN: CUBVKR.
17. Areo G. The Impact of Artificial Intelligence and Machine Learning on Real Estate: Current Applications and Future Trends. *ResearchGate*. 2024:1-10.
18. Ivanov M.V., Rumiantseva S.Yu. A New Ecosystem of Digital Real Estate: Developmental Stages, Technologies and Prospects. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2020;10(4):524-533. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-4-524-533>. EDN: YLPFMF.

19. Gareev I.F., Mukhametova N.N. The Introduction of Digital Technologies at the Stages of the Life Cycle of Residential Real Estate. *Russian Journal of Housing Research*. 2018;5(3):305-322. (In Russ.). <https://doi.org/10.18334/zhs.5.3.39692>. EDN: YRLKJV.
20. Berman S.J. Digital Transformation: Opportunities to Create New Business Models. *Strategy & Leadership*. 2012;40(2):16-24. <https://doi.org/10.1108/10878571211209314>.
21. Atzei N., Bartoletti M., Cimoli T. A Survey of Attacks on Ethereum Smart Contracts (SoK). In: *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer, 2017. Vol. 10204. P. 164–186. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54455-6_8.

Информация об авторах**Яськова Наталья Юрьевна,**

д.э.н., профессор, заведующий кафедрой
инвестиционно-строительного бизнеса
и управления недвижимостью,
Российская академия народного хозяйства
и государственной службы при Президенте
Российской Федерации,
119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 82, Россия,
✉e-mail: yaskova-ny@ranepa.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8962-3420>
Author ID: 490267

Зайцева Лариса Игоревна,

к.ю.н., доцент, доцент кафедры
инвестиционно-строительного бизнеса
и управления недвижимостью,
Российская академия народного хозяйства
и государственной службы при Президенте
Российской Федерации,
119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 82, Россия,
e-mail: zaytseva-li@ranepa.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8325-4342>
Author ID: 1027747

Колосова Татьяна Николаевна,

соискатель кафедры инвестиционно-
строительного бизнеса и управления
недвижимостью,
Российская академия народного хозяйства
и государственной службы при Президенте
Российской Федерации,
119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 82, Россия,
e-mail: noc@email.su
<https://orcid.org/0009-0005-6072-6588>
Author ID: 1156141

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

Information about the authors**Natalia Yu. Yaskova,**

Dr. Sci. (Econ.), Professor,
Head of the Department of Investment
and Construction Business and Real Estate
Management,
Russian Presidential Academy of National
Economy and Public Administration,
82 Vernadskogo Ave., Moscow 119571, Russia,
✉e-mail: yaskova-ny@ranepa.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8962-3420>
Author ID: 490267

Larisa I. Zaitseva,

Cand. Sci. (Legal), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Investment and Construction Business
and Real Estate Management,
Russian Presidential Academy of National
Economy and Public Administration,
82 Vernadskogo Ave., Moscow 119571, Russia,
e-mail: zaytseva-li@ranepa.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8325-4342>
Author ID: 1027747

Tatiana N. Kolosova,

Coresearcher of the Department of Investment
and Construction Business and Real Estate
Management,
Russian Presidential Academy of National
Economy and Public Administration,
82 Vernadskogo Ave., Moscow 119571,
Russia,
e-mail: noc@email.su
<https://orcid.org/0009-0005-6072-6588>
Author ID: 1156141

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 27.06.2025.
Одобрена после рецензирования 07.07.2025.
Принята к публикации 08.07.2025.

Information about the article

The article was submitted 27.06.2025.
Approved after reviewing 07.07.2025.
Accepted for publication 08.07.2025.



Получение керамического стенового материала на основе горелых пород и фосфорного шлака без применения природного традиционного сырья

В.З. Абдрахимов

Самарский государственный экономический университет, Самара, Россия

Аннотация. Цель работы заключается в квалификации сырья по основным оценочным характеристикам – межсланцевая глина в качестве пластичной связующей, золошлаковая смесь в роли выгорающей добавки, а фосфорной шлак – отощитель для производства керамических стеновых материалов, без привлечения естественного натурального сырья. Для диагностирования отходов на микроструктуру поэлементный химический состав привлекался электронный микроскоп JSM 6390A фирмы Jeol (Япония). При петрографическом диагностировании сырья применялись иммерсионные жидкости, прозрачные шлифы, аншлифы, и микроскопы МИН-8 и МИН-7. В качестве сырьевых материалов были использованы отходы сланцеперерабатывающих предприятий и от сжигания сланцев – межсланцевая глина, золошлаковая смесь и фосфорный шлак. Эксперименты подтвердили, что керамический стеновой материал без вовлечения отощителей в композицию только из единственной межсланцевой глины классифицироваться изделием марки М100 не может. Экспериментально доказано, что оптимальным составом для получения кирпича марки М125 является состав, содержащий 18 % фосфорного шлака и 7 % золошлаковой смеси. Дальнейшее увеличение количества фосфорного шлака, золошлаковой смеси и соответственно уменьшение глинистой связующей приводит к снижению технических показателей. Квалифицированная утилизация или рециклинг многотоннажного техногенного сырья топливно-энергетического комплекса одно из самых востребуемых решений экологической проблемы.

Ключевые слова: фосфорный шлак, золошлаковая смесь, межсланцевая глина, керамический стеновой материал

Для цитирования: Абдрахимов В.З. Получение керамического стенового материала на основе горелых пород и фосфорного шлака без применения природного традиционного сырья // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 400–408. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-400-408>. EDN: DIEVDX.

Original article

Production of ceramic wall material based on burnt rocks and phosphoric slag without the use of natural traditional raw materials

Vladimir Z. Abdrakhimov

Samara State University of Economics, Samara, Russia

Abstract. The purpose of the work is to qualify the raw materials according to the main evaluation characteristics – shale clay as a plastic binder, ash and slag mixture as a burning additive, and phosphoric slag as a detergent for the production of ceramic wall materials, without using natural natural raw materials. An electron microscope JSM 6390A from Jeol (Japan) was used to diagnose waste for a microstructure of element-by-element chemical composition. In the petrographic diagnosis of raw materials, immersion liquids, transparent slips, full slips, and MIN-8 and MIN-7 microscopes were used. The raw materials used were waste from shale processing plants and from the burning of shale - shale clay, ash and slag mixture and phosphorous slag. Experiments have confirmed that ceramic wall material cannot be classified as an M100 product without the involvement of solvents in the composition of only a single shale clay. It has been experimentally proven that the optimal composition for obtaining M125

grade bricks is a composition containing 18% phosphorous slag and 7% ash and slag mixture. A further increase in the amount of phosphorous slag, ash and slag mixture and, consequently, a decrease in the clay binder leads to a decrease in technical performance. Qualified utilization or recycling of high-tonnage man-made raw materials of the fuel and energy complex is one of the most demanded solutions to the environmental problem.

Keywords: phosphoric slag, ash and slag mixture, inter-shale clay, ceramic wall material

For citation: Abdrakhimov V.Z. Production of ceramic wall material based on burnt rocks and phosphoric slag without the use of natural traditional raw materials. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):400-408. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-400-408> EDN: DIEVDX.

ВВЕДЕНИЕ

Общие экологические проблемы

Экологическая политика устанавливается государством с помощью комплекса мероприятий, сводов указов и законов, предложений, расчетов намерений, принципов, привязанных к факторам воздействия на экологические системы человечеством в зависимости от его жизнедеятельности касательно экологических параметров, которые будут влиять на осуществление позитивных или безвредных конкретных задач.

Интервенция антропогенных отходов промышленными предприятиями в окружающую среду спровоцировало аккумуляцию большого количества крупнотоннажного техногенного сырья на поверхности планеты, скопление которого негативно влияет на здоровье людей, почву, а водный бассейн подвергается заражению, в результате чего страдают растительный, водный и животный мир [1–3]. Промышленные отходы появляются в процессе выпуска любой продукции, хранятся в отвалах (хвостохранилищах, шламоохранилищах и пр.), тлетворно влияют на окружающую среду и экологию [4–6].

К опасным отходам следует отнести такие, которые содержатся на полигонах, отвалах, шламо- и хвостохранилищах, наносящие внушительный урон покрову из гумуса, воздушному и водному бассейнам. Масштабные территории в результате их изъятия под отходы подвергаются засолению и химической минерализации. Отходы производств зачастую, чтобы отличить от бытовых отходов, называют техногенным сырьем, которое непременно нужно утилизировать. Применяемая технология утилизации, чтобы избежать негативного влияния отходов на здоровье людей, должна учитывать агрегатное состояние техногенного сырья и его класс опасности [7–9]. Наиболее губительным техногенным сырьем для окружающей природной среды являются продукты, образовавшиеся в результате сжигания

угля, горючих сланцев – золошлаковые смеси, которые относятся крупнотоннажному техногенному сырью [5, 8, 9].

Утилизация, вторичное использование и рекуперация золошлакового материала в России пока не превышает 10 % от ежегодной выработки. В Индии такая утилизация уже превысила 50 %, в Финляндии и Великобритании более 60 %, а в Германии такое техногенное сырье полностью утилизируется [3–5, 8, 9].

Одной из глобальных экологических проблем является загрязнение природной окружающей среды техногенным сырьем, поэтому сохранение в надлежащем виде экологии становится базисной ценностью как для всего человечества, так и для планеты Земля в целом [10, 11]. В работе [12] было указано, что из более 60 техногенных сырьевых материалов предприятиями отправляется на захоронение – 23,5 %, переработку – 33,2 %, обезвреживание – 16,5 %, причем из этих работ непосредственно на предприятие производят всего 3,4 %. Следует отметить, что более 70 % техногенного сырья обезвреживается вне предприятия изготовителя.

Более того, живущее в текущее время человечество обязано принимать во внимание растущее количество крупнотоннажных отходов.

Сырьевая ситуация

Непосредственно очевидной преградой для процесса генерации и экспансии роста номенклатуры многообразных стеновых керамических материалов в XXI в. имеет прямое отношение убыль глинистых низкоплавких связующих, компонентов, предназначенных для отощения и выгорания и т. д. [13–16]. Ротация естественного сырья только на крупнотоннажные отходы топливно-энергетического комплекса (ТЭК), объемы которых сравнялись с 2 млрд т, а захлапленная территория достигла 22 000 га, в генерацию крупного потребителя сырья – стеновые материалы, понизит

деструктивные действия техногенного сырья на окружающую природную среду [17–19]. Работы [20, 21] наглядно проэкспонировали прагматичность генерации отходов горючих сланцев в керамические стеновые материалы массового потребления.

Стеновой керамический кирпич

Этот керамический материал остается наиболее востребованным локальным стеновым материалом, который обеспечивает сбережение цемента, различных дефицитных металлов и дорожные перевозки. Керамический кирпич относится к строительным конструкционным материалам, обладающим превосходными эксплуатационными, экологическими и эстетическими характеристиками, что устанавливает потребность его в современном строительстве. Для получения керамического кирпича используют соответствующие компоненты: глина с огнеупорностью ниже 1350 °С в качестве связующей, отощитель, плавень (интенсификатор спекания) и выгорающая добавка.

В первую очередь на качество кирпича влияют химические составы техногенного сырья. Рассматриваемые оксидные химические составы техногенного сырья в настоящей работе наглядно подчеркивают, что составы их минеральной части преимущественно содержат SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , MgO , R_2O , которые тождественны составам природных глинистых материалов и отощителей, применяемых в керамических материалах строительного направления, а с повышенным содержанием потерей при прокаливании, которые в большей мере отражают содержание органики, целесообразно использовать это сырье в качестве выгорающих добавок. Оксид алюминия (Al_2O_3) в процессе создания керамического материала совершенствует его целостность, исключает деформации (благодаря сокращения усадки), наращивает прочностные показатели и морозостойкость после термообработки в интервале от 1000 до 1050 °С (температура обжига керамических стеновых материалов).

Присутствующие в техногенном сырье ТЭК оксиды кальция (CaO) и магния (MgO) при наличии плавней, для создания даже незначительного количества стеклофазы, могут причисляться к интенсификаторам спекания (флюсующий ингредиент сырья), что позитивно содействует формированию структуры.

Отощитель совершенствует технологические характеристики глинистого связующего благодаря понижению пластичности, усадки и формированию механического прочного остова [22]. Применение отощителя предоставит

возможность росту для формовочного оборудования производительности, понизит время сушки, снизит количества брака.

Плавни (или интенсификаторы спекания) усиливают спекания глины, понижают температуру спекания керамической шихты (композиции) и понижают температуру обжига керамического материала. Следует отметить, что плавни сами должны иметь низкую температуру спекания, т. е. содержать оксиды щелочей или стеклофазу.

Выгорающие добавки создают пористость после их выгорания при обжиге, способствуют более равномерному обжигу внутри изделия и могут выполнять функции отощающей добавки (снижать пластичность). В качестве выгорающих добавок используют угольную мелочь из различных углей с теплотворной способностью более 3200–3500 ккал/кг, наиболее дешевым из них является бурый уголь, который чаще всего и используется.

Истощение качественных традиционных природных ресурсных материалов для производства изделий керамических материалов строительного направления указало на необходимость сформировать замену традиционного природного материала на сырье техногенного происхождения.

Применение отходов производств в производстве керамических строительных материалов способствует безопасности для окружающей среды.

Целью работы была классификация по основным оценочным характеристикам в качестве сырья горелых пород: межсланцевая глина в качестве пластичной связующей, зошлаковая смесь – в роли выгорающей добавки, а фосфорной шлак как отощитель для производства керамических стеновых материалов, без привлечения естественного натурального сырья.

МЕТОДЫ

Для диагностирования техногенного сырья на микроструктуру поэлементный химический состав определялся электронным микроскопом JSM 6390A фирмы Jeol (Япония), для петрографических исследований применялись иммерсионные жидкости, прозрачные шлифы, аншлифы, микроскопы МИН-8 и МИН-7, а для установления размера частиц был проведен металлографический анализ на микроскопе МИН-8М с увеличением в 200 раз. Показатели стеновых материалов фиксировали согласно ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие условия».

В качестве сырьевых компонентов были межсланцевая глина, фосфорный шлак и зошлаковая смесь. Базовые показатели и

свойства техногенного сырья приведены в таблицах (химические составы, усредненный оксидный, приведен табл. 1, поэлементный в табл. 2, технологические свойства в табл. 3,

фракционный состав в табл. 4). Металлографический анализ представлен на рис. 1, минералогический на рис. 2 и микроструктура на рис. 3.

Таблица 1. Усредненный химический оксидный состав сырьевых компонентов

Table 1. Average chemical oxide composition of raw materials

Компонент	Содержание оксидов, мас. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	R ₂ O	ППП
1. Межсланцевая глина	45,40	13,87	5,60	11,3	2,3	–	3,5	18,03
2. Фосфорный шлак	43,42	3,81	1,04	46,58	2,48	1,8	0,87	–
3. Золошлаковая смесь	34,40	10,35	8,78	20,28	3,38	–	2,83	19,98

Примечание: ППП – потери при прокаливании $R_2O = K_2O + Na_2O$

Таблица 2. Поэлементный химический состав сырьевых компонентов

Table 2. Element-wise chemical composition of raw materials

Компонент	Содержание элементов, мас. %									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	P
1. Межсланцевая глина	5,73	52,85	0,46	1,04	7,20	18,66	1,75	10,53	3,35	–
2. Фосфорный шлак	–	54,70	0,32	2,94	2,09	18,05	0,30	20,34	0,52	0,74
3. Золошлаковая смесь	7,44	47,96	0,81	1,93	5,65	16,9	1,53	12,2	5,58	–

Таблица 3. Технологические показатели сырьевых компонентов

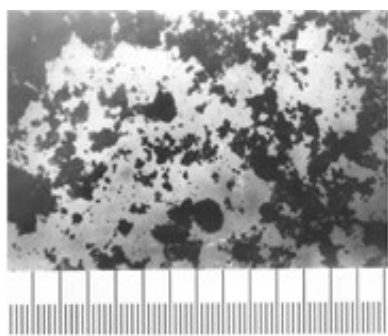
Table 3. Technological indicators of raw materials components

Компонент	Теплотворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °C		
		начало деформации	размягчение	жидкоплавленное состояние
1. Межсланцевая глина	1200	1270	1310	1350
2. Фосфорный шлак	–	1300	1320	1350
3. Золошлаковая смесь	2000	1300	1340	1380

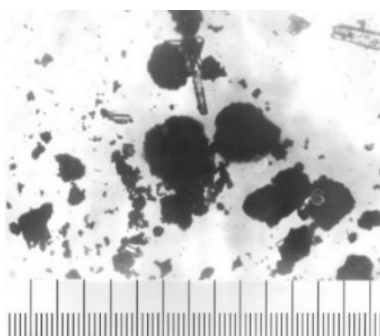
Таблица 4. Фракционный состав сырьевых компонентов

Table 4. Fractional composition of raw materials

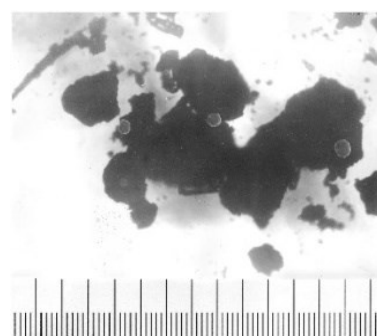
Компонент	Содержание фракций в %, размер частиц в мм				
	>0,063	0,063–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001
1. Межсланцевая глина	7	10	13	15	55
2. Фосфорный шлак	42	23	18	12	5
3. Золошлаковая смесь	16,84	33,41	32,49	12,68	4,58



a



b



c

Рис. 1. Металлографический анализ сырьевых компонентов:
a – межсланцевой глины; b – фосфорный шлак; c – золошлаковая смесь
Fig. 1. Metallographic analysis of the raw material components:
a – shale clay; b – phosphoric slag; c – ash and slag mixture

Межсланцевая глина образуется при добыче горючих сланцев на сланцеперерабатывающих заводах (на шахтах) г. Сызрани (Самарская область) и является отходом горючих сланцев. Использование межсланцевой глины

в качестве связующего засвидетельствовано в работах [3, 9, 10]. Технические и технологические параметры обозначены в таблицах и на рисунках. Межсланцевая глина черного цвета, размеры частичек в основном менее 10 мкм.

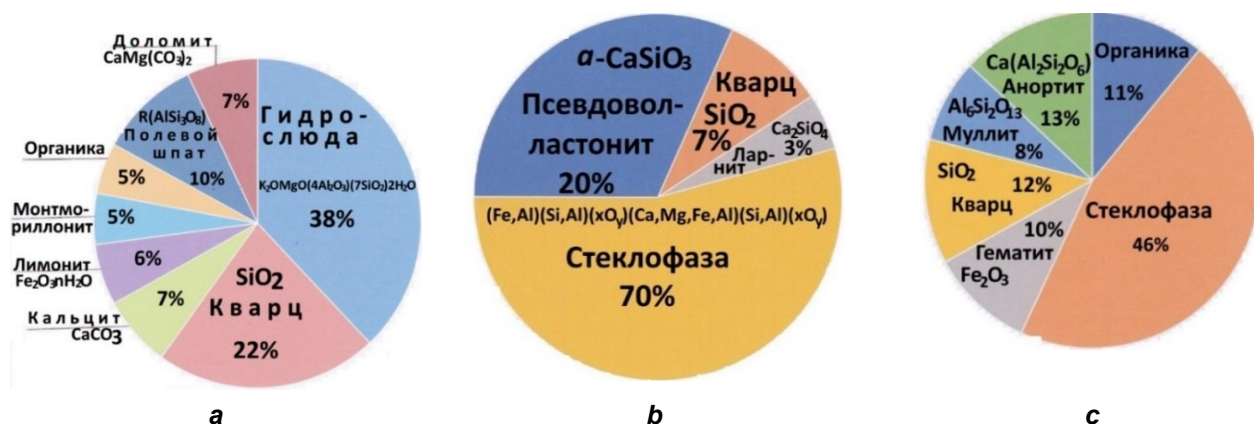


Рис. 2. Минералогический состав сырьевых компонентов:
а – межсланцевая глина; б – фосфорный шлак; с – золошлаковая смесь
Fig. 2. Mineralogical composition of the raw material components:
а – shale clay; б – phosphorous slag; с – ash and slag mixture

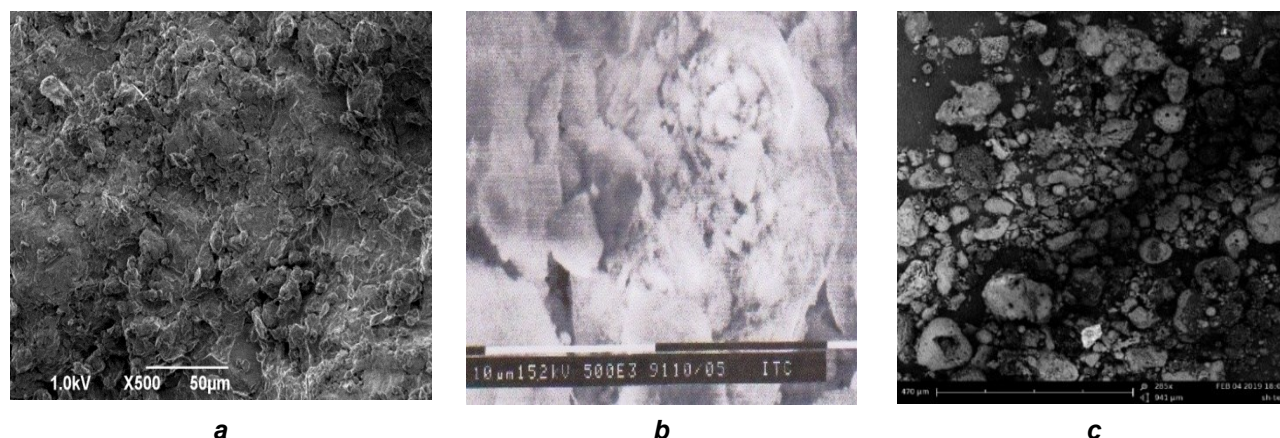


Рис. 3. Микроструктура сырьевых компонентов: а – межсланцевая глина (увеличение в 500); б – фосфорный шлак (увеличение в 5000); с – золошлаковая смесь
Fig. 3. Microstructure of the raw material components: а – shale clay (magnification x500); б – phosphoric slag (magnification x5000); с – ash and slag mixture

Фосфорный шлак образуется на заводе «Фосфор» (также «Куйбышевфосфор») в г. Тольятти. Это последствие генерации фосфора термическим способом в отрезке температур от 1300 до 1500 °С [10, 11]. Технические и технологические показатели и свойства фосфорного шлака отображены в таблицах и на рисунках.

Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев образуется на Сызранской ТЭС и утилизируется не только как отощитель, но и частично, с учетом высокой теплотворной способностью ($Q = 2000$ ккал/кг, табл. 4), как выгорающая добавка.

Технология получения керамического стенового материала и его показатели

Традиционная технология, как и в работе [9], представлена следующими операциями: подсушка сырьевых материалов, измельчение до размера не более 1 мм, перемешивание, согласно дозировке (табл. 5), пластическое формование кирпичей при влажности 21–23 % (размером 250×120×65 см, стандартный кирпич по ГОСТ), просушка до остаточной влажности не более 5 %, а затем обжиг при 1000 °С.

Технические (физико-механические) показатели представлены в табл. 6.

Таблица 5. Составы керамических масс и их пластичность
Table 5. Compositions of ceramic masses and their plasticity

Компонент	Содержание отходов, мас. %				
	1	2	3	4	5
1. Межсланцевая глина	100	90	83	75	65
2. Фосфорный шлак	–	10	12	18	25
3. Золошлаковая смесь	–	–	5	7	10
Пластичность композиции (шихты), безразмерная величина	20	17	15	12	9

Таблица 6. Технические показатели стенового материала
Table 6. Technical parameters of the wall material

Показатель	Составы				
	1	2	3	4	5
Прочности при сжатии, МПа	9,5	12,4	13,3	13,5	12,4
Прочности при изгибе, МПа	2,1	2,7	2,9	3,2	2,9
Морозостойкость, циклы	18	25	27	34	28
Водопоглощение, %	14,7	13,3	13,1	13,0	13,2
Марочность кирпича	M75	M100	M125	M125	M100

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температура обжига кирпича, с учетом конкретного состава в обстановке производства варьируется от 950 до 1050 °С. Эксперименты подтвердили, что керамический стеновой материала, без вовлечения отощителей в композицию, только из единственной межсланцевой глины не подходит под марку M100 (табл. 6).

Рост непластичных материалов с 10 до 25 % в керамических композициях (табл. 5 и табл. 6) минимизирует число пластичности с 20 до 12, но технические показатели при этом нарастают. Информация по фактическим данным табл. 5 и 6 свидетельствует о минимальном количественном содержании в керамической композиции (шихте) пластичной связующей - 75 %, в противном случае (при последующем снижении) число пластичности снижается с 12 до 9, что негативно отражается на формировании образцов, на которых появляются мелкие трещины, вследствие неудовлетворительной связующей способности композиции. Вместе с тем, как показывают данные табл. 6 количественный рост непластичных материалов более 25 % заметно снижает технические показатели изделия. Предпочтительным составом для формирования кирпича марки M125 интенсифицируется состав № 4, включающий 18 % фосфорного шлака и 7 % золошлаковой смеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Анализ композиции, состоящей только из глинистого связующего без включения отощителей, показал невозможность получение керамического стенового материала марки M100.

2. Зафиксировано, что технические показатели кирпича прогрессируют при эскалации шлака до 18 %, а смеси до 7 %, но дальнейшая эскалация непластичных материалов в композиции инициирует снижение показателей кирпича.

3. Информация по фактическим данным табл. 5 и 6 свидетельствует о минимальном количественном содержании в керамической композиции (шихте) пластичной связующей - 75 %, в противном случае (при последующем снижении) число пластичности снижается с 12 до 9, что негативно отражается на формировании образцов, на которых появляются мелкие трещины, вследствие неудовлетворительной связующей способности композиции

4. Установлено, что количественный рост непластичных материалов более 25 % заметно снижает технические показатели изделия. Предпочтительным составом для формирования кирпича марки M125 интенсифицируется состав № 4, включающий 18 % фосфорного шлака и 7 % золошлаковой смеси.

5. Использование крупнотоннажных отходов производств в производстве керамических стеновых материалов способствует утилизации промышленных отходов, охране окружающей среды и расширению сырьевой базы для получения керамических материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Захарова А.А., Лейцин В.Н. Зола-унос при производстве бетонов различного назначения и сухих строительных смесей // Строительство и реконструкция. 2023. № 5. С. 132–147. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-109-5-132-147>. EDN: CJJALC.
2. Балановская А.В., Абдрахимова Е.С. Вопросы экологического, экономического и практического рециклинга по использованию топливно-энергетического комплекса для получения теплоизоляционных материалов // Экология промышленного производства. 2021. № 3. С. 19–26. https://doi.org/10.52190/2073-2589_2021_3_19. EDN: HBGGHW.
3. Абдрахимов В.З. Получение на основе отходов горелых пород – межсланцевой глины и цветной металлургии – шлама щелочного травления сейсмостойкого кирпича // Экологические системы и приборы. 2021. № 7. С. 25–34. <https://doi.org/10.25791/esip.07.2021.1239>. EDN: UXKTKT.
4. Соколова С.В., Баранова М.Н., Васильева Д.И., Холопов Ю.А. Перспективы применения промышленных отходов для повышения долговечности и огнеупорности жаростойких бетонов // Строительство и реконструкция. 2023. № 2. С. 123–133. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-123-133>. EDN: ANWVDP.
5. Bouzit S., Laasri S., Taha M., Laghzizil A., Hajjaji A., Merli F. et al. Characterization of Natural Gypsum Materials and Their Composites for Building Applications // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. P. 1–15. <http://doi.org/10.3390/app9122443>.
6. Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. Use of Western Kazakhstan Raw Materials for Producing Acid-Resistant Materials // Refractories and Industrial Ceramics. 2023. Vol. 63. Iss. 6. P. 642–648. <https://doi.org/10.1007/s11148-023-00784-3>. EDN: HKJGPD.
7. Гальцева Н.А., Попов П.В., Котов Д.В., Голотенко Д.С. Вторичное использование отходов промышленности // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5. С. 572–581. EDN: AWIEIG.
8. Abdrakhimov V.Z. Influence of Ash and Slag on the Characteristics of Heat Insulation Based on Metallurgical Waste // Coke and Chemistry. 2023. Vol. 66. P. 310–315. <https://doi.org/10.3103/S1068364X23700874>.
9. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Oxidation Processes in the Firing of Porous Filler Based On Oil Production Wastes and Intershale Clay // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2020. Vol. 54. Iss. 4. P. 750–755. <https://doi.org/10.1134/S0040579519050026>. EDN: NWZUHD.
10. Абдрахимов В.З. Снижение экологического ущерба за счет использования отходов цветной металлургии и энергетики в производстве легковесных огнеупоров // Экологические системы и приборы. 2020. № 2. С. 23–34. <https://doi.org/10.25791/esip.02.2020.1137>. EDN: EOIRBT.
11. Баринов А.В., Кузнецова В.В. Современное состояние наличия вредных веществ и отходов производства на промышленном предприятии // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2013. № 2. С. 20–25. EDN: SCNRXB.
12. Ильина Л.А., Абдрахимов В.З. Экологические и экономические аспекты использования в производстве строительных материалов отходов топливно-энергетического комплекса и их классификация // Экологические системы и приборы. 2020. № 8. С. 28–44. <https://doi.org/10.25791/esip.08.2020.1173>. EDN: OUFYFK.
13. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R., Gaifullin A.R. Influence of the Addition of Dispersed Fine Polymineral Calcined Clays on the Properties of Portland Cement Paste // Advances in Cement Research. 2016. Vol. 29. Iss. 1. P. 21–32. <https://doi.org/10.1680/jadcr.16.00060>.
14. Земсков В.В., Прасолов В.И. Истощение минеральных ресурсов как угроза экономической безопасности России // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2021. Т. 11. № 10-1. С. 195–205. <https://doi.org/10.34670/AR.2021.76.61.023>. EDN: KVHANA.
15. Bogdanov A., Mavlyuberdivov A., Nurieva E. The Use of Nanosized Additives in the Modification of Brick Loam // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. P. 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127404005>.
16. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // Проблемы региональной экологии. 2019. № 4. С. 77–87. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-14077>. EDN: MNEMSX.
17. Бушумов С.А., Короткова Т.Г. Экологически безопасный сорбент из золошлаковых отходов теплоэнергетики // Тонкие химические технологии. 2023. Т. 18. № 5. С. 446–460. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-5-446-460>. EDN: HJLALY.
18. Vdovin E., Mavliev L., Stroganov V. Interaction of Clay Soil Components with Portland Cement and Complex Additive Based on Octyltriethoxysilane and Sodium Hydroxide // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 890. P. 1–9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012031>.
19. Abdrakhimov V.Z., Nikitina N.V. Phase Composition of Interstitial Clay and Gas Emissions on Heat Treatment // Coke and Chemistry. 2023. Vol. 66. P. 431–437. <https://doi.org/10.3103/S1068364X23701028>.

20. Abdrakhimov V.Z. Combustion Kinetics of Organic Components in Firing Porous Aggregates Based on Ash and Shale Clay // *Coke and Chemistry*. 2023. Vol. 66. P. 135–143. <https://doi.org/10.3103/S1068364X23700655>.
21. Волочко А.Т., Подболотов К.Б., Хорт Н.А., Манак П.И. Влияние комплексных видов отходов и цветонесущего сырья на свойства изделий строительной керамики // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. 2020. № 16. С. 42–46. EDN: WUWUBG.

REFERENCES

1. Puzatova A.V., Dmitrieva M.A.I., Zakharov A.An., Leitsin V.N. Fly Ash in The Production of Concrete for Various Purpose and Dry Construction Mixtures. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya*. 2023;5:132-147. (In Russ.). <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-109-5-132-147>. EDN: CJJALC.
2. Balanovskaya A.V., Abdrakhimova E.S. Issues of Environmental, Economic and Practical Recycling For the Use of the Fuel and Energy Complex for the Production of Thermal Insulation Materials. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2021;3:19-26. (In Russ.). https://doi.org/10.52190/2073-2589_2021_3_19. EDN: HBGGHW.
3. Abdrakhimov V.Z. Production on the Basis of Waste of Burnt Rocks – Inter-Shale Clay and Non-Ferrous Metallurgy – Alkaline Etching Mud of Earthquake-Resistant Bricks. *Ecological Systems and Devices*. 2021;7:25-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.25791/esip.07.2021.1239>. EDN: UXKKTK.
4. Sokolova S.V.I., Baranova M.N., Vasilieva D.Ig., Kholopov Yu.A.I. Possibilities of Using Industrial Waste to Improve Heat Resistant Concrete Durability and Refractoriness. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya*. 2023;2:123-133. (In Russ.). <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-123-133>. EDN: ANWVDP.
5. Bouzit S., Laasri S., Taha M., Laghzil A., Hajjaji A., Merli F. et al. Characterization of Natural Gypsum Materials and Their Composites for Building Applications. *Applied Sciences*. 2019;9:1-15. <http://doi.org/10.3390/app9122443>.
6. Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. Use of Western Kazakhstan Raw Materials for Producing Acid-Resistant Materials. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2023;63(6):642-648. <https://doi.org/10.1007/s11148-023-00784-3>. EDN: HKJGPD.
7. Galtseva N.A., Popov P.V., Kotov D.A., Golotenko D.S. Recycling of Industrial Waste. *Engineering Journal of Don*. 2022;5:572-581. (In Russ.). EDN: AWIEIG.
8. Abdrakhimov V.Z. Influence of Ash and Slag on the Characteristics of Heat Insulation Based on Metallurgical Waste. *Coke and Chemistry*. 2023;66:310–315. <https://doi.org/10.3103/S1068364X23700874>.
9. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Oxidation Processes in the Firing of Porous Filler Based On Oil Production Wastes and Intershale Clay. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2020;54(4):750-755. <https://doi.org/10.1134/S0040579519050026>. EDN: NWZUHD.
10. Abdrakhimov V.Z. Reduction of Environmental Damage Due To the Use of Waste of Non-Ferrous Metallurgy and Energy in the Production of Lightweight Refractories. *Ecological Systems and Devices*. 2020;2:23-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.25791/esip.02.2020.1137>. EDN: EOIRBT.
11. Barinov A.V., Kuznetsova V.V. Modern State of Harmful Agent's and Wastes of Production Presence on the Industrial Enterprise. *Scientific and Educational Problems of Civil Protection*. 2013;2:20-25. (In Russ.). EDN: SCNRXB.
12. Ilyina L.A., Abdrakhimov V.Z. Environmental and Economic Aspects of the Use in the Production of Construction Materials Waste Of the Fuel and Energy Complex and Their Classification. *Ecological Systems and Devices*. 2020;8:28-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.25791/esip.08.2020.1173>. EDN: OUFYFK.
13. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R., Gaifullin A.R. Influence of the Addition of Dispersed Fine Polyminal Calcined Clays on the Properties of Portland Cement Paste. *Advances in Cement Research*. 2016;29(1):21-32. <https://doi.org/10.1680/jadcr.16.00060>.
14. Zemskov V.V., Prasolov V.I. Mineral Resources Depletion as a Threat to the Economic Security of Russia. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2021;11(10-1):195-205. (In Russ.). <https://doi.org/10.34670/AR.2021.76.61.023>. EDN: KVHAHA.
15. Bogdanov A., Mavlyuberdinov A., Nurieva E. The Use of Nanosized Additives in the Modification of Brick Loam. *E3S Web of Conferences*. 2021;274:1-6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127404005>.
16. Pichugin E.A. Analytical Review of the Experience of Involving Ash Slag Waste of Thermal Power Plants in Economic Circulation in the Russian Federation. *Regional Environmental Issues*. 2019;4:77-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-14077>. EDN: MNEMSX.
17. Bushumov S.A., Korotkova T.G. Environmentally Safe Sorbent From Ash-And-Slag Waste of Heat Power Engineering. *Fine Chemical Technologies*. 2023;18(5):446-460. (In Russ.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-5-446-460>. EDN: HJLALY.

18. Vdovin E., Mavliev L., Stroganov V. Interaction of Clay Soil Components with Portland Cement and Complex Additive Based on Octyltriethoxysilane and Sodium Hydroxide. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;890:1-9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012031>.
19. Abdrakhimov V.Z., Nikitina N.V. Phase Composition of Interstitial Clay and Gas Emissions on Heat Treatment. *Coke and Chemistry*. 2023;66:431-437. <https://doi.org/10.3103/S1068364X23701028>.
20. Abdrakhimov V.Z. Combustion Kinetics of Organic Components in Firing Porous Aggregates Based on Ash and Shale Clay. *Coke and Chemistry*. 2023;66:135-143. <https://doi.org/10.3103/S1068364X23700655>.
21. Valochka A.T., Podbolotov K.B., Khort N.A., Manak P.I. Influence of Complex Types of Thinners and Color-Bearing Raw Materials on the Properties of Building Ceramics Products. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*. 2020;16:42-46. (In Russ.). EDN: WUWUBG.

Информация об авторе

Абдрахимов Владимир Закирович,
д.т.н., профессор кафедры землеустройства
и экологии, советник РААСН,
Самарский государственный экономический
университет,
443090, г. Самара, ул. Советской Армии, 141,
Россия,
✉e-mail: 3375892@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1832-2572>
Author ID: 620775

Information about the author

Vladimir Z. Abdrakhimov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
Land Management and Ecology,
Advisor to the RAACS,
Samara State University of Economics,
141 Sovetskoi Armii St., Samara 443090,
Russia,
✉e-mail: 3375892@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1832-2572>
Author ID: 620775

Вклад автора

Автор выполнил исследовательскую работу,
на основании полученных результатов провел
обобщение, подготовил рукопись к печати.

Автор имеет на статью исключительные
авторские права и несет ответственность
за плагиат.

Contribution of the author

The author performed the research, made
generalization based on the results obtained
and prepared the copyright for publication.

Author has exclusive author's right and bear
responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта
интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный
вариант рукописи.

Conflict of interests

The author declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved
by the author.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 30.04.2025.
Одобрена после рецензирования 22.05.2025.
Принята к публикации 23.05.2025.

Information about the article

The article was submitted 30.04.2025.
Approved after reviewing 22.05.2025.
Accepted for publication 23.05.2025.



Формирование территориально-распределенной сетевой структуры по выпуску домокомплектов заводской готовности в малоэтажном жилищном строительстве

О.А. Безруких

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. В статье рассматривается актуальная научная проблема, заключающаяся в фундаментальном структурном противоречии между стратегическими целями развития малоэтажного индустриального строительства в Российской Федерации на всех этапах жизненного цикла объектов и унаследованной производственно-технологической базой отрасли, основанной на модели стационарных домостроительных комбинатов. Целью исследования является разработка и апробация инструментария формирования территориально-распределенной сетевой структуры производственных мощностей предприятий по выпуску домокомплектов заводской готовности, способной преодолеть экономические и логистические барьеры классической модели, проявляющиеся на всех этапах жизненного цикла индустриального малоэтажного жилищного строительства. В рамках исследования был разработан инструментарий, включающий методику выбора опорных территорий и математическую модель оптимизации, решаемую методом «ветвей и границ». Практическая апробация инструментария была проведена на примере ретроспективного анализа задачи по ликвидации последствий чрезвычайной ситуации в г. Тулуне (Иркутская область, 2019 год). Путем сравнительного экономико-математического моделирования базового (доставка с удаленного ДСК) и инновационного (развертывание мобильного ДСК на месте) сценариев была проведена количественная оценка эффекта от применения предложенной модели. В результате исследования доказана экономическая, временная и социальная эффективность предложенной сетевой модели. Сделан вывод о том, что разработанный инструментарий является действенным средством повышения эффективности управления жизненным циклом малоэтажного жилищного строительства и может быть использован для решения задач как планового пространственного развития, так и оперативного реагирования в условиях чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: малоэтажное жилищное строительство, управление жизненным циклом, индустриальное домостроение, домостроительный комбинат, сетевая модель, мобильное производство, размещение производства

Для цитирования: Безруких О.А. Формирование территориально-распределенной сетевой структуры по выпуску домокомплектов заводской готовности в малоэтажном жилищном строительстве // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 409–419. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-409-419>. EDN: YSUDPD.

Original article

Formation of a geographically distributed network structure for the production of factory-ready housing kits in low-rise housing construction

Olga A. Bezrukikh

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The article considers an urgent scientific problem, which consists in a fundamental structural contradiction between the strategic goals of the development of low-rise industrial construction in the Russian Federation at all stages of the life cycle of facilities and the established industrial and technological base of the industry based on the model of stationary house-building complexes. The

purpose of the research is to develop and test tools for the formation of a geographically distributed network structure of production facilities of enterprises for the production of factory-ready housing kits, capable of overcoming the economic and logistical barriers of the classical model, manifested at all stages of the life cycle of industrial low-rise housing construction. Within the framework of the study, a toolkit was developed that includes a methodology for selecting reference territories and a mathematical optimization model solved by the "branches and boundaries" method. The practical testing of the toolkit was carried out using the example of a retrospective analysis of the emergency response in Tulun (Irkutsk region, 2019). A quantitative assessment of the effect of the proposed model was carried out by comparative economic and mathematical modeling of the basic (delivery from a remote DSC) and innovative (deployment of a mobile DSC on site) scenarios. As a result of the research, the economic, temporal and social effectiveness of the proposed network model has been proven. It is concluded that the developed toolkit is an effective means of improving the efficiency of life cycle management of low-rise residential construction and can be used to solve problems of both planned spatial development and rapid response in emergency situations.

Keywords: low-rise housing construction, life cycle management, industrial housing construction, housing construction plant, network model, mobile production, production placement

For citation: Bezrukikh O.A. Formation of a geographically distributed network structure for the production of factory-ready housing kits in low-rise housing construction. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):409-419. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-409-419>. EDN: YSUDPD.

ВВЕДЕНИЕ

Стратегический курс на развитие малоэтажного жилищного строительства, в том числе индустриальным способом, заданный «Стратегией развития строительной отрасли и ЖКХ РФ до 2035 г.», вступает в фундаментальное противоречие с унаследованной производственно-технологической базой отрасли [1, 2].

Основу этой базы исторически составляет модель стационарного домостроительного комбината (ДСК) – организационно-технологическая система, спроектированная для решения задач массового многоэтажного строительства в пределах крупных агломераций [3].

В современных условиях пространственного развития, характеризующихся необходимостью освоения удаленных территорий и формированием географически распределенного спроса, классическая модель ДСК демонстрирует свою системную несостоятельность. Ее эффективность жестко лимитирована экономически целесообразным радиусом доставки продукции, а производственная инертность не позволяет гибко реагировать на потребность в архитектурно разнообразном малоэтажном жилье.

Особенно остро эти ограничения проявляются в условиях чрезвычайных ситуаций, когда требуется экстренное развертывание производственных мощностей, что для капиталоемких стационарных производств невозможно [4].

Таким образом, формируется научная

проблема, заключающаяся в разрыве между стратегическими целями пространственного развития и неспособностью существующей производственной системы их обеспечить. Это предопределяет актуальность разработки и применения новых, адаптивных организационно-технологических моделей, способных обеспечить возведение индустриального малоэтажного жилья с учетом пространственных, социально-экономических и ресурсных особенностей конкретного региона, в том числе при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

МЕТОДЫ

Методы исследования основаны на анализе научных работ авторитетных российских и зарубежных ученых и практиков о прогнозно-пространственном размещении производительных сил (в том числе производства строительных материалов и конструкций), а также на применении методов системного и проектного анализа, метода «ветвей и границ» для решения целочисленной задачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Парадигма индустриального домостроения в России исторически базируется на модели ДСК – крупного промышленного комплекса с замкнутым производственным циклом, ориентированного на серийный выпуск унифицированных изделий по конвейерному принципу. Данная организационно-технологическая модель, доказав свою высокую эффективность в решении задач массового типового

строительства в пределах крупных городских агломераций, в современных условиях демонстрирует четко очерченные границы применимости [5–7].

Ключевым системным ограничением является жесткая территориальная привязка, обусловленная экономикой логистики крупногабаритных и тяжеловесных изделий. Это формирует пространственный парадокс – территории, наиболее нуждающиеся в индустриальных методах строительства для своего развития (удаленные опорные населенные пункты, зоны новых промышленных проектов), оказываются за пределами экономически целесообразного радиуса действия существующей производственной системы [8].

Выявленные границы эффективности классической модели служат научным обоснованием необходимости поиска и разработки новых, более гибких организационно-технологических решений, способных преодолеть логистические и экономические барьеры стационарных производств.

Таким образом, возникает научная проблема, заключающаяся в необходимости преодоления этого структурного разрыва. Центральным научным и практическим вопросом становится определение экономических, технологических и организационных условий, при которых децентрализация производственных мощностей путем развертывания мобильных комплексов является целесообразной.

Решение этой проблемы требует перехода от классической задачи размещения единичного предприятия к постановке и решению сложной, многокритериальной оптимизационной задачи. Оптимальная конфигурация производственной сети ДСК, включающей как стационарные, так и мобильные элементы, является функцией большого числа взаимосвязанных переменных, лежащих на стыке региональной экономики, транспортной логистики, строительных технологий и стратегического планирования.

Выбор локации для производственного объекта определяет его будущую экономическую эффективность, а в масштабах региона – возможность гибко реагировать на изменяющийся спрос и реализовывать масштабные программы освоения территорий [9, 10]. В рамках настоящего исследования под сетевым размещением понимается непрерывный процесс управления дислокацией производственных мощностей, что позволяет рассматривать его не как разовое действие, а как стратегический инструмент регионального развития.

Постановка задачи оптимального размещения элементов производственной сети относится к классу задач целочисленного линейного программирования.

Для ее решения в рамках настоящего исследования используется метод «ветвей и границ». Выбор данного метода обоснован тем, что он позволяет проводить направленный перебор вариантов для нахождения точного оптимального решения по критерию максимизации суммарного эффекта при соблюдении заданных бюджетных ограничений, систематически отсекая заведомо неоптимальные решения без полного перебора всех возможных комбинаций.

В качестве базового примера апробации была выбрана чрезвычайная ситуация, сложившаяся в г. Тулуне Иркутской области в результате катастрофического наводнения летом 2019 г.

Масштаб разрушений (более 12 тыс. поврежденных и утраченных жилых домов) сформировал совокупность экстремальных условий:

1. Директивные временные ограничения – необходимость обеспечения тысяч семей жильем до наступления зимнего периода, что требовало применения исключительно индустриальных технологий.

2. Концентрация спроса – одномоментное возникновение масштабной потребности в сотнях однотипных домокомплектов в одной территориальной локации.

3. Ресурсные ограничения – реализация проекта в условиях жестких бюджетных рамок и ограниченной логистической доступности территории.

В этих условиях задача строительства нового жилья, в частности 42 малоэтажных домов в микрорайоне Березовая роща, трансформировалась из рядового строительного проекта в стратегическую задачу по восстановлению жизнеспособности территории.

Данные вызовы делают этот проект репрезентативным объектом для апробации предложенной сетевой модели в условиях, когда скорость, стоимость и управляемость производственными процессами являются абсолютными приоритетами.

Микрорайон Березовая роща был запроектирован и построен на специально выделенной территории в г. Тулуне, расположенной на безопасном, незатопляемом удалении от русла р. Ия (рис. 1). До начала проектирования жилого района 98,6 % территории представляло собой территории лесов и природного ландшафта.

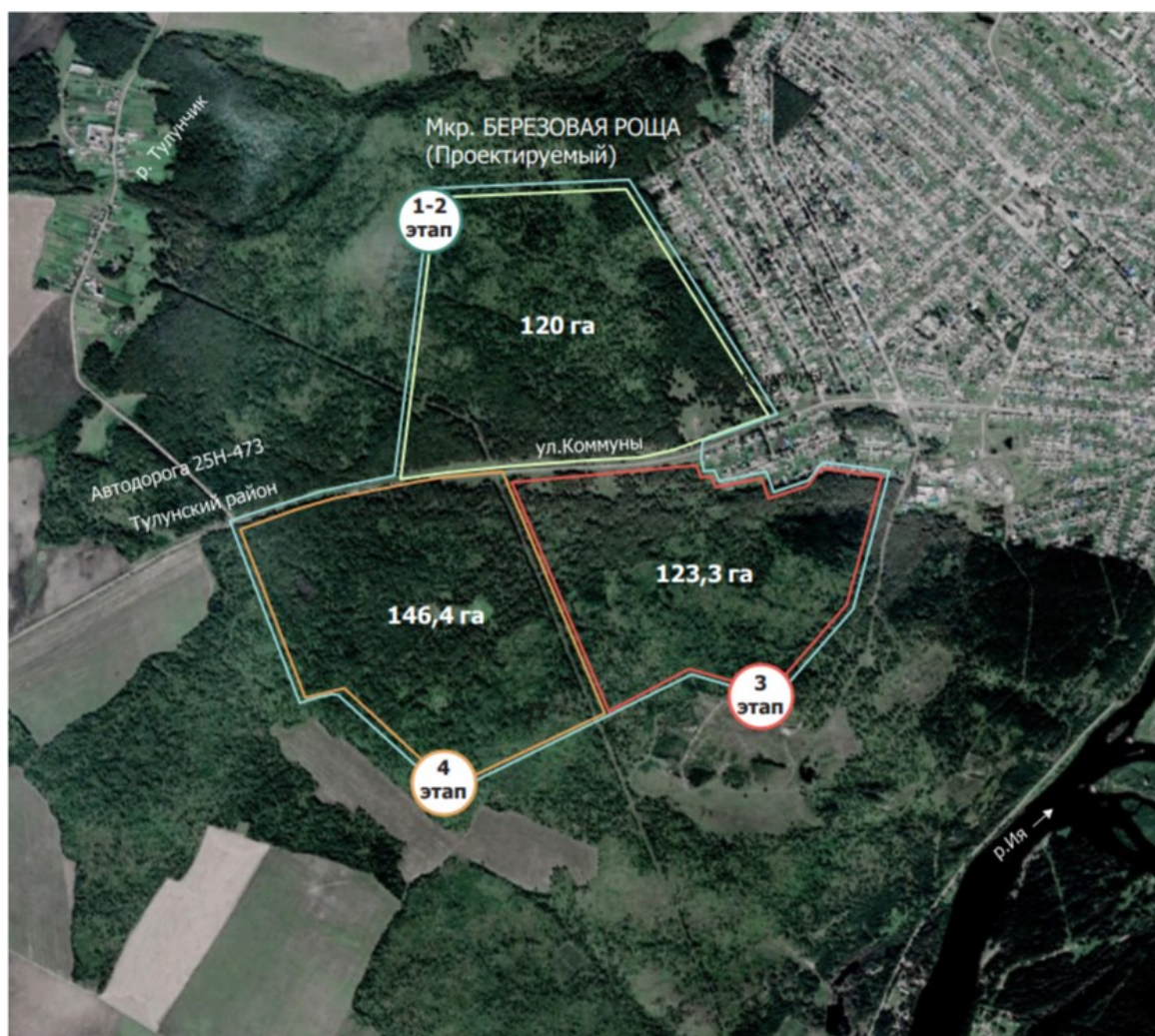


Рис. 1. Границы этапов проектируемого микрорайона Березовая роща в г. Тулуне Иркутской области
Fig. 1. Boundaries of the stages of the planned microdistrict Berezovaya Roshcha in the city of Tulun, Irkutsk region

Выбор данной площадки был обусловлен первоочередной задачей – гарантировать безопасность будущих жителей от повторения паводков. Проект предусматривал комплексное освоение территории, включая не только возведение индивидуальных жилых домов, но и последующее создание всей необходимой инженерной и социальной инфраструктуры, что соответствовало принципам создания новой, устойчивой городской среды.

На примере рассматриваемой территории было проведено формирование территориально-распределенной сетевой структуры производственных мощностей предприятий по выпуску домокомплектов заводской готовности. В базовом, фактически реализованном варианте, производство домокомплектов осуществляется за пределами г. Тулуна. Готовые элементы доставляются на строительную

площадку автомобильным транспортом. Эта схема соответствует стандартной схеме стационарного ДСК. Близлежащие к району малоэтажного строительства стационарные ДСК представлены на рис. 2 [11].

Как показывает рис. 2 самыми близкорасположенными являются стационарные ДСК г. Иркутска и Ангарска. Анализ показал, что данные ДСК были ориентированы на плановое многоэтажное строительство и не обладали свободными мощностями для экстренного выпуска сотен малоэтажных домокомплектов. Кроме того, их удаленность (> 500 км) делает логистику тяжелых железобетонных панелей долгой и дорогой. Оценка возможностей местных строительных организаций показала, что они работают по традиционным технологиям и не могут обеспечить требуемых темпов. Это констатирует наличие острейшего системного

разрыва и показывает необходимость применения мобильного ДСК, то есть обеспечение сети взаимосвязанных производственных

региональных структур стационарных и мобильных производств строительных конструкций [12].

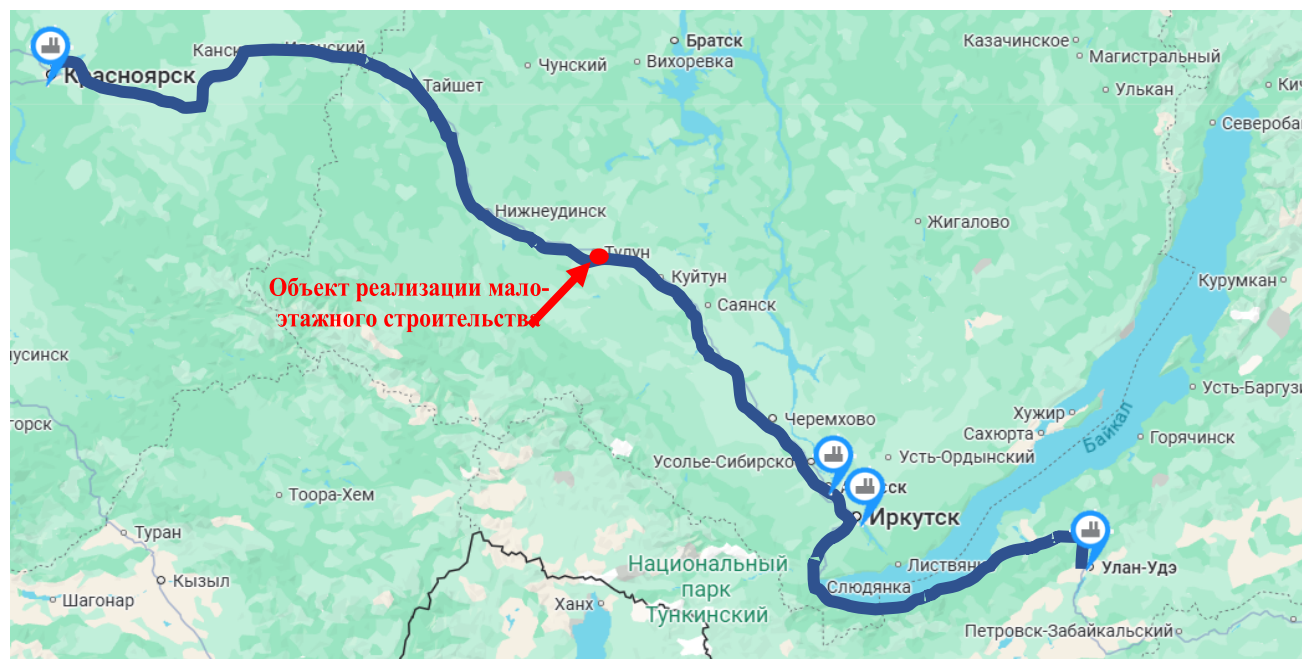


Рис. 2. Размещение стационарных домостроительных комбинатов на территории Иркутской области и прилегающих регионов
Fig. 2. Location of stationary house-building factories in the Irkutsk region and adjacent regions

В качестве сетевого ДСК был выбран мобильный завод компании ООО «ЧИОС Инжиниринг» [16].

Для выбора территории размещения сетевого домостроительного комбината необходимо учесть следующие минимальные требования:

1. Для монтажа мобильного завода и размещения склада готовой продукции территория должна быть ровной с уклоном не более 5°, иметь твердое покрытие и обустроенные подъездные пути.

2. Вся территория должна быть защищена от затопления талой водой и иметь организованный отвод ливневых вод. В зимнее время года производственная территория должна поддерживаться в рабочем состоянии (очищаться от снега, льда, посыпаться песком и др.), обеспечивая бесперебойное движение автотранспорта.

3. Планировочная отметка производственного помещения (цеха) должна иметь твердое покрытие и стоки для атмосферных вод, быть ровной с уклоном не более 2°, въезды в цех должны быть достаточными для обеспечения безопасных радиусов поворота (не менее 12 м).

4. При согласовании места и привязки мобильного завода учитывать соблюдение

санитарных и противопожарных норм и правил.

5. Кроме этого, площадка должна отвечать следующим техническим условиям:

- электроснабжение – 250 кВт;
- водоснабжение – 10 м³/сут. (возможна скважина);
- водоотведение – 5 м³/сут. (возможен септик);
- площадь участка 1200 – 2000 м², оптимальный размер (ширина×длина) 70×180 при условии сквозного проезда;
- размеры погрузочно-разгрузочных площадок должны обеспечивать размещение грузов, разьезды транспортных и грузоподъемных средств, расстояния между габаритами транспортных средств с грузом и размещенными на площадке грузами не менее 1 м;
- при погрузочно-разгрузочных работах вблизи зданий расстояние между зданием и транспортным средством с грузом должно быть не менее 0,8 м [16].

В соответствии с описанными требованиями был проведен анализ рельефа г. Тулуна с целью размещения сетевого ДСК. Рельеф города характеризуется преимущественно равнинным характером местности, хотя имеются некоторые участки, которые расположены

вдоль р. Ангара и Ия, где возможны незначительные понижения и заболоченность. Эти районы характеризуются повышенной влажностью почвы и рисками подтопления. Склоны и возвышенности – около городской черты располагаются небольшие склоны и невысокие горы, такие как хребты Хамардабан и Байкальские горы, находящиеся немного дальше от самого города.

Исходя из указанных особенностей региона, можно выделить следующие наиболее подходящие зоны для размещения домостроительного завода (рис. 3):

1. Северные окраины города, расположенные на некотором удалении от речной поймы и имеющие относительно плоский рельеф.

2. Западные районы, подальше от непосредственной близости к р. Ангаре, где чаще возникают проблемы с уровнем воды и затопляемостью.

3. Участки возле автомобильной трассы или железной дороги, позволяющие минимизировать затраты на логистику и повысить эффективность производственных процессов.

Для организации производства железобетонных панелей на мобильном ДСК г. Тулун требуются ресурсные базы цемента, песка, щебня и арматуры (рис. 4). Ближайшие заводы по производству цемента: «Ангарскцемент» (г. Ангарск), «Красноярский цемент» (г. Красноярск), «Тимлюйский цементный завод» (Бурятия, Кабанский р-н) [11].

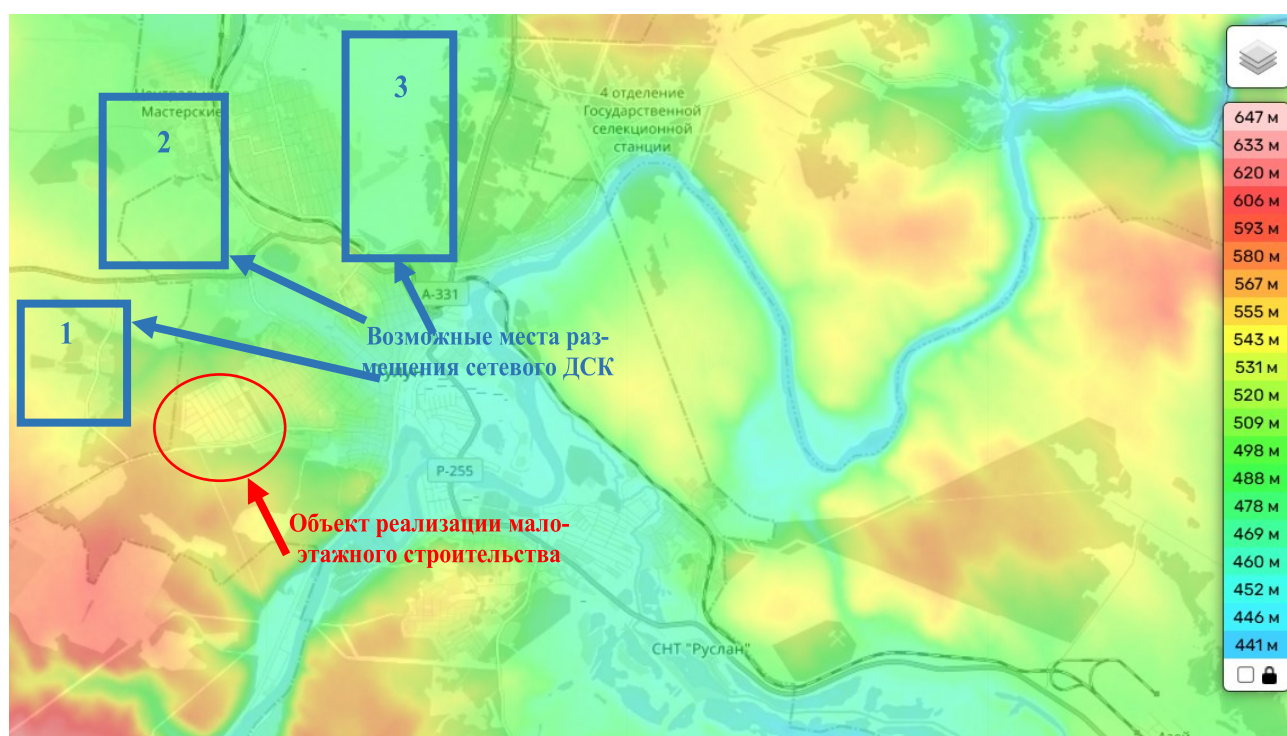


Рис. 3. Возможные места размещения мобильного домостроительного комплекса
Fig. 3. Possible locations for the mobile house-building plant

Щебень и песок можно приобрести непосредственно у местных поставщиков (речной песок – с Тулунского карьера, щебень – с карьера «Гора Холмушинская» (Тулунский р-н)). Для производства железобетонных панелей также требуется арматура и проволока, основными ближайшими поставщиками которых являются: «Дом Металла» (г. Тулун), «Иркутскметалл» (г. Иркутск), «МеталлПрофиль» (г. Ангарск), «СибСталь» (г. Шелехов) [11–13].

Как показывает проведенный анализ, для производства железобетонных панелей щебень, песок и арматура может поставляться от

местных производителей, а цемент – из г. Ангарска и Иркутска (самые ближайшие) посредством автомагистрали и железной дороги.

Для выбора площадки для сетевого ДСК используется метод «ветвей и границ».

Входными параметрами для задачи являются:

1. Набор территорий расположения ДСК: $X = (X_1, X_2, X_3)$.

2. Число ДСК: $k = 1$, которые нужно разместить на m территориях.

3. Бюджет (ограничение на бюджет) полагаем равным: $B = 293000$ тыс. руб.

(исходя из сметной стоимости строительства увеличенной на величину минимальных транспортных затрат).

4. Затраты на размещение–сетевого ДСК на каждой из m территорий:
 $b_1 = b_2 = b_3 = 246753.73$ тыс. руб.

5. Логистические затраты, которые включают в себя логистические затраты между стационарным домостроительным комбинатом

и предполагаемыми местами расположения сетевого ДСК, логистические затраты на доставку от предполагаемых мест расположения сетевого ДСК до строительной площадки и до сырьевой базы цемента (таблица). Сырьевые базы песка, щебня и арматуры в анализе не участвуют, так как находятся в границах рассматриваемой территории.

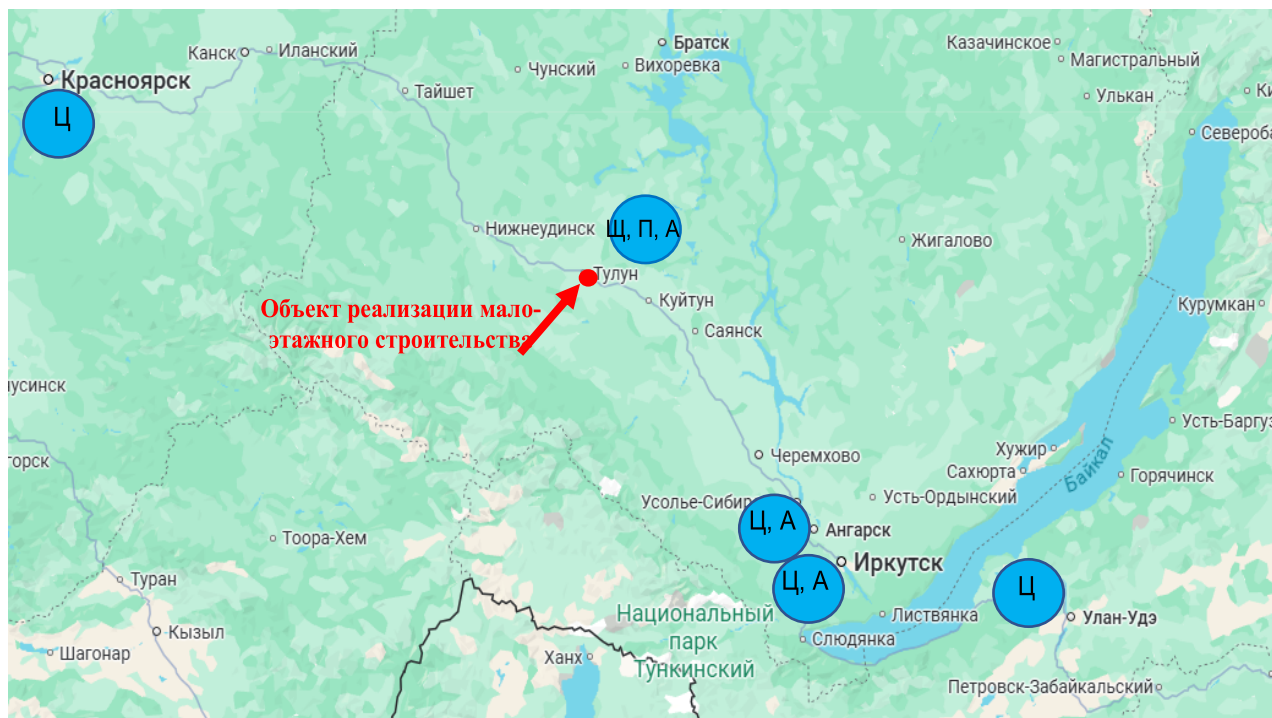


Рис. 4. Ресурсные базы для мобильного домостроительного комплекса в г. Тулун (Ц – цемент, Щ – щебень, П – песок, А – арматура)
Fig. 4. Resource bases for a mobile house-building plant in Tulun (C – cement, CS– crushed stone, P – sand, A – reinforcement)

Транспортные затраты до предполагаемых мест размещения сетевого домостроительного комплекса

Transportation costs to the proposed locations of the mobile precast concrete plant

	Территория 1	Территория 2	Территория 3
От стационарного ДСК	35 685,54	35 375,15	43 988,67
От строительной площадки	3740,29	5936,35	6634,74
От цементного завода (г. Ангарск)	9920,79	4290,80	5789,98
Итого	49 346,62	45 602,29	56 413,39

Таким образом: $C_1 = 49\,346,62$ тыс. руб., $C_2 = 45\,602,29$ тыс. руб., $C_3 = 56\,413,39$ тыс. руб.

1. Бюджет с учетом логистических затрат: $B_1 = 296\,100,35$ тыс. руб., $B_2 = 292\,356,02$ тыс. руб., $B_3 = 303\,167,12$ тыс. руб.

2. Доходы от деятельности ДСК: $a_1 = a_2 = a_3$.

При описанных выше условиях, а именно, равнозначных значениях $b_1 = b_2 = b_3$ и $a_1 = a_2 = a_3$

максимизация целевой функции

$$\max Z = \sum_{j=1}^m (a_j - (b_j + c_j))x_j \quad \text{сводится к минимизации}$$

затрат логистических издержек

$$\min Z_1 = \sum_{j=1}^m (c_j)x_j$$

Результаты решения задачи представлены на рис. 5.

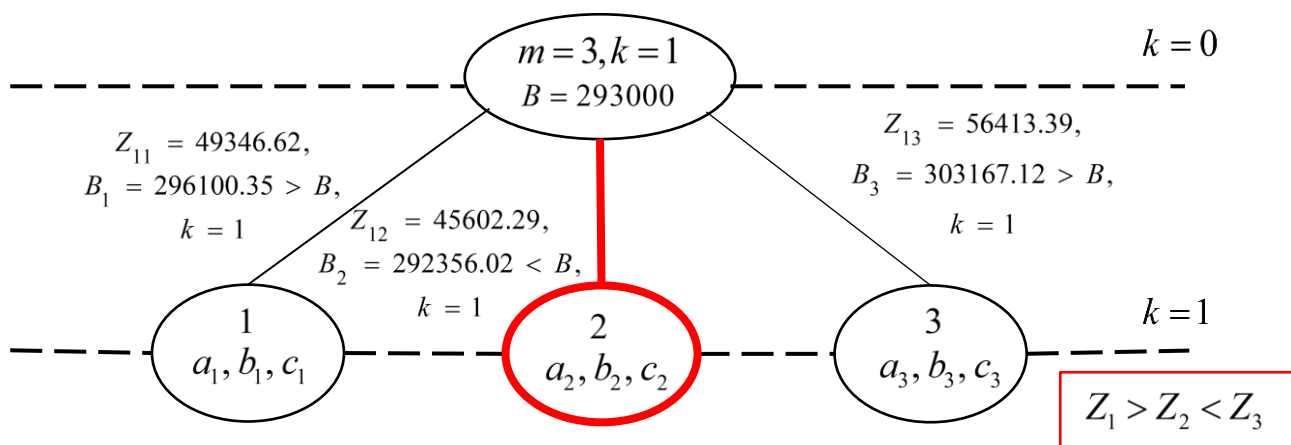


Рис. 5. Дерево решений задачи размещения сетевого домостроительного комплекса в г. Тулун

Fig. 5. Solution tree for the problem of locating a network house-building plant in Tulun

Согласно полученным результатам в качестве оптимального места размещения сетевого ДСК было выбрана территория под номером 2. С целью расчета экономического эффекта от реализации предложенной модели размещения сети взаимосвязанных

производственных региональных структур стационарных и мобильных производств строительных конструкций проведен расчет трех сценариев реализации проекта по строительству 42 домов в микрорайоне Березовая роща в г. Тулун (рис. 6).

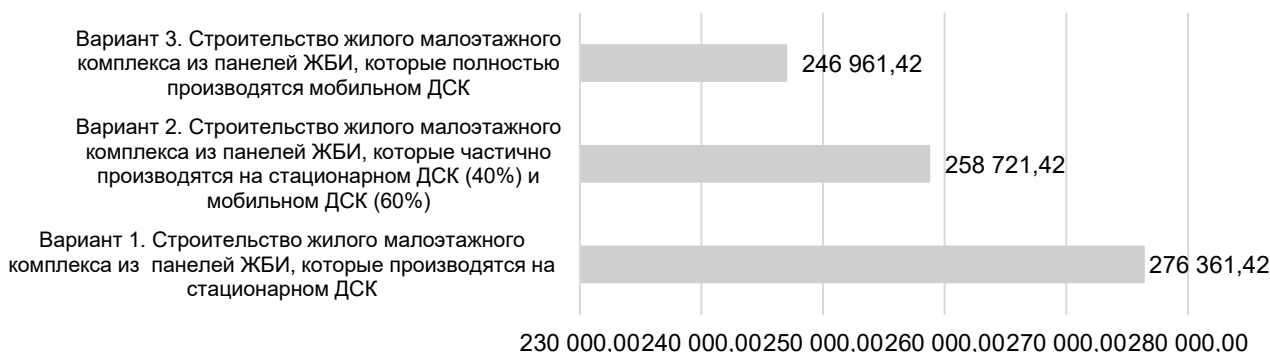


Рис. 6. Сравнение сметной стоимости при реализации трех вариантов строительства 42 домов в г. Тулун, тыс. руб.

Fig. 6. Comparison of estimated costs for the implementation of three options for the construction of 42 houses in the city of Tulun, thousand rubles

Первый – базовый сценарий предполагает производство домокомплектов из железобетонных изделий на стационарном ДСК в г. Иркутске и доставку на строительную площадку в г. Тулун автомобильным транспортом. Этот сценарий представляет собой базовую модель, которая применялась при реализации рассматриваемого проекта. Второй сценарий является реализацией оптимального размещения мобильного производства строительных конструкций ДСК непосредственно на выбранной площадке (рис. 5) в г. Тулуе. Третий сценарий моделирует ситуацию, при котором предполагается, что 40 % наиболее массовых

и тяжеловесных изделий (типовые стеновые панели, плиты перекрытий) производятся на мобильном комплексе в г. Тулуе, остальные 60 % изделий, включающие более сложные или нестандартные компоненты, а также полуфабрикаты, поставляются со стационарного ДСК в г. Иркутске.

Расчет показал, что показал эффективность предложенных в статье решений по формированию территориально-распределенной сетевой структуры производственных мощностей предприятий по выпуску домокомплектов заводской готовности.

Во-первых, экономическая выгода

достигается за счет снижения удельной себестоимости строительства. Этот эффект формируется за счет радикального сокращения логистических издержек – наиболее значимой статьи затрат при работе на удаленных территориях.

Во-вторых, дополнительную экономию обеспечивает возможность использования местных сырьевых ресурсов (в частности, инертных заполнителей), что снижает затраты на входящую логистику. Кроме этого, предложенная модель, за счет заложенной в нее возможности трансформации мобильного ДСК в региональные сервисные центры, позволяет существенно снизить совокупную стоимость владения жильем для конечного потребителя на этапе эксплуатации объектов малоэтажного жилищного строительства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что классическая модель стационарного ДСК, несмотря на доказанную в прошлом эффективность, в современных условиях демонстрирует свою неспособность адекватно отвечать на вызовы пространственного развития из-за жесткой территориальной привязки и высоких логистических издержек, что формирует объективную предпосылку для разработки новых организационно-технологических подходов.

В качестве решения данного противоречия в статье предложен и теоретически обоснован переход к территориально-распределенной сетевой структуре производственных мощностей, которая предполагает синергетическое взаимодействие стационарных технологических центров и гибких мобильных производственных комплексов. Разработанный в рамках исследования инструментарий,

включающий методику многокритериального выбора локаций и математическую модель оптимизации их размещения, представляет собой научно-методологическую основу для практического формирования таких сетей. Практическая апробация предложенного инструментария, проведенная на примере ретроспективного анализа задачи по ликвидации последствий чрезвычайной ситуации в г. Тулуне, доказала его полную состоятельность и практическую значимость.

Моделирование различных сценариев организации производства позволило дать количественную оценку комплексного эффекта от внедрения сетевой модели.

Доказано, что размещение мобильного производственного комплекса непосредственно в зоне спроса позволяет нивелировать ключевой недостаток стационарных ДСК – высокие логистические издержки, – обеспечивая тем самым значительное сокращение как сметной стоимости, так и общего инвестиционно-строительного цикла.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что формирование территориально-распределенной сетевой структуры производственных мощностей предприятий по выпуску домокомплектов заводской готовности является не только теоретической концепцией, но и действенным, экономически обоснованным инструментом для обеспечения качества и доступности малоэтажного жилья на удаленных и стратегически важных территориях. В том числе при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций природного характера, что в полной мере соответствует целям пространственного и технологического развития Российской Федерации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Николаев С.В. Возрождение домостроительных комбинатов на отечественном оборудовании // Жилищное строительство. 2015. № 5. С. 4–8. EDN: ТТУНУВ.
2. Безруких О.А., Матвеева М.В. Управление процессами организации строительства при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, вызванных наводнениями // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 3. С. 422–431. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-3-422-431>. EDN: MYJDSA.
3. Шульгина Е.Ю. Массовая жилая застройка как решение проблемы расселения рабочего класса и малоимущих слоев населения в первой половине XX века // Научный результат. Социальные и гуманитарные исследования. 2023. Т. 9. № 1. С. 126–139. <https://doi.org/10.18413/2408-932X-2023-9-1-0-10>. EDN: VXNEXN.
4. Пахомова Л.А., Олейник П.П. Комфортное жилье нового индустриального поколения // Строительное производство. 2020. № 2. С. 23–28. https://doi.org/10.54950/26585340_2020_2_23. EDN: TIRTYF.
5. Абмаева Е.М., Добышева Т.В., Ямщикова И.В. Жилищное строительство в России: анализ состояния и перспективы развития // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 2. С. 192–200. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-2-192-200>. EDN: ERKYGP.
6. Саландаева О.И. Архитектура жилых зданий из крупных панелей – тенденции формирования // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 3. С. 544–561. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-3-544-561>. EDN: XQNEKD.

7. Гурьев В.В., Яхкинд С.И. Основные тенденции развития гражданского строительства на современном этапе // Academia. Архитектура и строительство. 2022. № 3. С. 97–103. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2022-3-97-103>. EDN: UEPRMZ.
8. Матвеева М.В., Пешков В.В., Калюжная Н.Я., Захаров С.В., Ван Х. Пространственная организация национальной экономики // Инновации и инвестиции. 2023. № 8. С. 366–368. EDN: VYLNBC.
9. Gallagher R.J., Young J.-G., Foucault Welles B. A Clarified Typology of Core-Periphery Structure in Networks // Science Advances. 2021. Vol. 7. Iss. 12. P. 1–11. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc9800>.
10. Казаков Ю.Н. Технологии быстрого строительства экономичных малоэтажных жилых домов на основе оптимизированных легких сэндвич-панельных систем // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 4. С. 95–102. EDN: ZXIRND.
11. Николаев С.В. Оптимизированные параметры панелей для индивидуального жилищного строительства // Жилищное строительство. 2025. № 3. С. 3–10. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2025-3-3-10>. EDN: QFCUYF.
12. Афанасьев А.В., Афанасьев В.А. Организация строительства быстровозводимых зданий и сооружений // Быстровозводимые и мобильные здания и сооружения: перспективы использования в современных условиях. СПб: Стройиздат, 1998. С. 226–230.
13. Казин А.С. Технологический суверенитет в строительной индустрии России // Жилищное строительство. 2024. № 3. С. 8–11. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-3-8-11>. EDN: WFVKSV.

REFERENCES

1. Nikolaev S.V. Revival of House Building Factories On The Basis of Domestic Equipment. *Housing Construction*. 2015;5:4-8. (In Russ.). EDN: TTYHYB.
2. Bezrukikh O.A., Matveeva M.V. Managing Construction Processes In Emergency Response to Floods. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(3):422-431. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-3-422-431>. EDN: MYJDSA.
3. Shulgina E.Yu. Mass Housing as a Solution to The Resettlement Problem of a Working Class and Disadvantaged Segments of a Population in the First Half Of The 20th Century. *Research Result. Social Studies and Humanities*. 2023;9(1):126-139. (In Russ.). <https://doi.org/10.18413/2408-932X-2023-9-1-0-10>. EDN: VXNEXN.
4. Pakhomova L.A., Oleinik P.P. Comfortable Housing of the New Industrial Generation. *Construction Production*. 2020;2:23-28. (In Russ.). https://doi.org/10.54950/26585340_2020_2_23. EDN: TIRTYF.
5. Abmaeva E.M., Dobysheva T.V., Yamshchikova I.V. Housing Construction in Russia: State and Development Prospects. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(2):192-200. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-2-192-200>. EDN: ERKYGP.
6. Salandaeva O.I. Architecture of Prefabricated Large-Panel Housing – Tendencies in Development. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(3):544-561. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-3-544-561>. EDN: XQNEKD.
7. Guryev V.V., Yakhkind S.I. The Main Trends in the Development of Civil Engineering at the Present Stage. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo*. 2022;3:97-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2022-3-97-103>. EDN: UEPRMZ.
8. Matveeva M.V., Peshkov V.V., Kalyuzhnaya N.Ya., Zakharov S.V., Wang H. The Spatial Organisation of the National Economy. *Innovation & Investment*. 2023;8:366-368. (In Russ.). EDN: VYLNBC.
9. Gallagher R.J., Young J.-G., Foucault Welles B. A Clarified Typology of Core-Periphery Structure in Networks. *Science Advances*. 2021;7(12):1-11. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc9800>.
10. Kazakov Yu.N. High-Speed Construction of Economical and Comfortable Low-Rise Residential and Public Buildings on The Basis of Optimized Lightweight Frame-Panel Systems. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo*. 2017;4:95-102. (In Russ.). EDN: ZXIRND.
11. Nikolaev S.V. Optimized Panel Parameters for Individual Housing Construction. *Housing Construction*. 2025;3:3-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2025-3-3-10>. EDN: QFCUYF.
12. Afanasev A.V., Afanasev V.A. Organization of Construction of Prefabricated Buildings and Structures. In: *Prefabricated and Mobile Buildings and Structures: Prospects for Use in Modern Conditions*. Saint Petersburg: Stroyizdat, 1998. P. 226–230. (In Russ.).
13. Kazin A.S. Technological Sovereignty in the Russian Construction Industry. *Housing Construction*. 2024;3:8-11. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-3-8-11>. EDN: WFVKSV.

Информация об авторе**Безруких Ольга Андреевна**

Старший преподаватель кафедры экспертизы и управления недвижимостью, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия, ✉e-mail: olga.bezrukikh11@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-2301-3205>
Author ID: 1046586

Вклад автора

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Автор имеет на статью исключительные авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 22.04.2025.
Одобрена после рецензирования 19.05.2025.
Принята к публикации 20.05.2025.

Information about the author**Olga A. Bezrukikh**

Senior Lecturer, Department of Real Estate Expertise and Management, Irkutsk National Research Technical University, 664074, Irkutsk, Lermontov St., 83, Russia, ✉e-mail: olga.bezrukikh11@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-2301-3205>
Author ID: 1046586

Contribution of the author

The author performed the research, made generalization based on the results obtained and prepared the copyright for publication.

Author has exclusive author's right and bear responsibility for plagiarism.

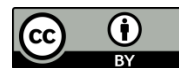
Conflict of interests

The author declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Information about the article

The article was submitted 22.04.2025.
Approved after reviewing 19.05.2025.
Accepted for publication 20.05.2025.



Исследование техногенных циклов обращения ресурсов и продукции как информационно-аналитическая база прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера

И.В. Влад^{1✉}, Э.С.Цховребов², А.Е. Лебедев³, О.П. Филиппова⁴

^{1,2}Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий), Москва, Россия

^{3,4}Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

Аннотация. Актуальность проводимого исследования заключается в нерешенной проблеме предупреждения социально-экономических, экологических и иных последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера. Целью работы послужило исследование техногенных циклов обращения ресурсов и продукции в формате формирования информационно-аналитической базы прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера. Задачи исследования: анализ литературных источников по теме работы с выбором стратегии и тактики проводимого исследования, изучения этапов техногенных циклов оборота продукции и сырья, объектов и процессов негативного воздействия на окружающую среду как потенциальных источников возникновения, так и развития чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, выработка предложений по экологизации техногенных циклов в целях обеспечения безопасности жизнедеятельности населения и экологической безопасности территорий. Представленные авторами результаты исследования не являются окончательными, они будут использованы в качестве информационно-аналитической базы в процессе научно-методического обоснования прогнозирования опасных техногенных событий и процессов в целях предупреждения аварий, катастроф, штатных ситуаций, несущих опасность для природной среды, жизни и здоровья нынешнего и будущих поколений российских граждан.

Ключевые слова: экологическая безопасность, прогнозирование, техногенные циклы, мониторинг, техносферная опасность, жизнеобеспечение территорий, городское хозяйство, чрезвычайные ситуации, предупреждение последствий

Для цитирования: Влад И.В., Цховребов Э.С., Лебедев А.Е., Филиппова О.П. Исследование техногенных циклов обращения ресурсов и продукции как информационно-аналитическая база прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 420–432. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-420-432>. EDN: EYLCGW.

Original article

Research of technogenic cycles of resource and product circulation as an information and analytical base for forecasting and preventing technogenic emergencies

Igor V. Vlad^{1✉}, Eduard S. Tshovrebov², Anton E. Lebedev³, Olga P. Filippova⁴

^{1,2}All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the Ministry of Emergency Situations, Moscow, Russia

^{3,4}Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

Abstract. The relevance of the research lies in the unresolved problem of preventing socio-economic, environmental and other consequences of technogenic emergencies. The purpose of the work was to

© Влад И.В., Цховребов Э.С., Лебедев А.Е., Филиппова О.П., 2025

study technogenic cycles of resource and product circulation in the format of forming an information and analytical database for forecasting and preventing technogenic emergencies. Research objectives: analysis of literary sources on the topic of working with the choice of strategy and tactics of the conducted research, study of the stages of technogenic cycles of turnover of products and raw materials, objects and processes of negative impact on the environment as potential sources of occurrence and development of natural and technogenic emergencies, development of proposals for the greening of technogenic cycles in order to ensure the safety of the population and the environmental safety of the territories. The research results presented by the authors are not final, they will be used as an information and analytical base in the process of scientific and methodological substantiation of forecasting dangerous technogenic events and processes in order to prevent accidents, disasters, emergency situations that pose a danger to the natural environment, life and health of the future and future generations of Russian citizens.

Keywords: environmental safety, forecasting, technogenic cycle, monitoring, technosphere hazard, life support of territories, urban economy, emergency situations, prevention of consequences

For citation: Vlad I.V., Tshovrebov E.S., Lebedev A.E., Filippova O.P. Research of technogenic cycles of resource and product circulation as an information and analytical base for forecasting and preventing technogenic emergencies. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2025;15(3):420-432. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-420-432>. EDN: EYLCGW.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие и совершенствование научно-методической базы в области прогнозирования и предупреждения техногенных угроз экологической безопасности установлено «Стратегией экологической безопасности Российской Федерации» в качестве одной из основ достижения экологической безопасности в нашей стране.

Жизнеспособность социо-природно-техногенной системы характеризуется ее способностью к сохранению или адаптации к изменяющимся внешним условиям без деградации образующих ее компонентов. Создавая и всемерно развивая искусственную среду своего обитания, измененную в результате жизнедеятельности и удовлетворения своих потребностей (техносферу), человек постепенно начинает осознавать, что уйти от законов природы невозможно, их необходимо учитывать и следовать им в ходе своего развития. Наиболее сложные противоречия у людей всегда вызывал циклический характер всего происходящего вокруг.

Действительно, рассматривая любое развитие в достаточно большом временном интервале, проявляется его неотъемлемое свойство – цикличность, которая приносит нам все новое, неизвестное и забирает все старое, к чему мы привыкли. Экономические и экологические кризисы, социальные конфликты определяют ход истории развития нашей цивилизации. Все они являются результатом субъективного стремления общества (или его части) быстро достичь нового или любой ценой сохранить старое. Все живое на нашей планете зависит миллионы лет от различных

циклов: временных, погодных, климатических, уровня Мирового океана, геологических ритмов Земли, динамики численности и ареалов биологических видов, круговорота и оборота различных видов ресурсов, продукции, энергии, веществ и многих других факторов. Синхронность и динамика протекания большинства этих циклов нарушена негативным антропогенным воздействием, что создает угрозу для безопасности человечества.

В связи с этим возникает сложно разрешимое противоречие: при желании сохранить вечные ценности, в первую очередь, неповторимый окружающий природный мир, человек стремится реализовать максимум возможных технологических новаций в целях улучшения своего благосостояния, комфортности, благоприятности жизнедеятельности. В этом процессе упускается из виду важнейший фактор обеспечения продолжения жизни на планете – состояние защищенности человека, природной среды, территорий и объектов жизнеобеспечения от внешних негативных воздействий, вызванных опасными проявлениями техногенеза, а именно – безопасность. Это понятие включает в себя весь комплекс и многофакторные аспекты рассматриваемого циклического процесса: безопасность жизнедеятельности, экологическая, санитарно-эпидемиологическая, техническая, радиационная, пожарная, а также безопасность при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций.

Одним из важнейших механизмов предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера служит прогнозирование возникновения и развития техногенных событий и

процессов. Эти события и процессы напрямую связаны с жизнедеятельностью человека, т. е. с социальным фактором. С другой стороны, они связаны с циклическими процессами добычи природных ресурсов, производством из них продукции (строительной, технической, пищевой и пр.), ее использованием, эксплуатацией, потреблением. Заканчивается данный цикл образованием, в результате жизнедеятельности людей, морального и физического износа, ликвидацией и технологическим переделом продукции опасных предметов, веществ, соединений, представленных в различных фазах: жидкой (сбросы сточных вод), газообразной (выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух), твердой и жидкой (отходы производства и потребления).

Все эти экологически опасные конечные результаты техногенного цикла обладают свойствами в разной степени высокой реакционной способности, токсичности, взрыво- и пожароопасности. Они служат потенциальными источниками возникновения техногенных чрезвычайных ситуаций (аварии, взрывы, пожары и пр.) с образованием впоследствии неблагоприятных экологических, социально-экономических и иных последствий. Поэтому прикладные междисциплинарные научные исследования, направленные на поиск, разработку, совершенствование методов, механизмов, организационно-технических решений и мер, прогрессивных технологий и технических средств, обеспечивающих предупреждение, снижение, снижение техногенной опасности на каждом этапе техногенных циклов обращения ресурсов и продукции, являются чрезвычайно актуальными и значимыми.

Авторы статьи проанализировали взаимосвязь техногенных циклов ресурсов и продукции с социально-природными и экологическим факторами и дали свои рекомендации по дальнейшим направлениям научных исследований в этой социально значимой для устойчивого развития человечества области знаний.

МЕТОДЫ

Материалами для проведения исследования являлись опубликованные в открытом доступе научно-практические результаты отечественных и зарубежных ученых в области анализа рисков угроз чрезвычайных ситуаций [1–5], предотвращения, уменьшения, снижения уровня техногенных загрязнений [6–10], экологической безопасности [11–15], техногенного воздействия процессов обращения опасных отходов [16–20], ресурсосберегающих систем экологически безопасного обращения вторичных ресурсов [21–25]. В работе использованы результаты собственных исследований

авторов [26–30]. Методов исследования: систематизация, композиция, ретроспективный, сравнительный и логический анализ собранных информационных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследования дана оценка цикличности хозяйственной деятельности человека, носящей техногенный характер.

Исследование проведено на примере городского хозяйства и строительства как основных видов деятельности по обеспечению жизнеобеспечения селитебных территорий. Так, основными этапами жизненного цикла объекта недвижимости комплекса жизнеобеспечения являются:

- организационно-технический замысел и намерение создать объект недвижимости;
- размещение объекта;
- технико-экономическое обоснование инвестиционного предложения и оценка воздействия на окружающую среду;
- проектирование;
- ввод в эксплуатацию;
- функционирование, эксплуатация предприятия;
- реконструкция, техническое перевооружение, модернизация предприятия;
- ликвидация (снос, демонтаж).

Результаты хозяйственной деятельности человека, использованные материалы, сырье, продукция, товары и изделия, проходят через вышеперечисленные этапы и так попадают в природную среду. Большинство из них имеют вид, характер отходов, обладающих свойствами экологической опасности для компонентов природной среды, и токсичны для человека и всех видов биологических ресурсов. Образуемые в результате реализации отдельных этапов циклических техногенных процессов, опасные техносферные объекты создают угрозу устойчивому развитию человеческого общества, сохранению природной среды и природных ресурсов (рис. 1). Циклический характер носят многие виды антропогенной деятельности: обращение с отходами, водопользование или смена агроценозов при интенсивном сельском хозяйстве. Циклическостью отличаются все технологические процессы, даже в атомной энергетике. Неправильно планировать или анализировать природоохранную деятельность без определения техногенных циклов, с которыми она связана и на которые она может повлиять. Основная разница между циклами природными и техногенными состоит в том, что первые человек не может прервать, а может только изменить, а вторые он часто прерывает, точнее не заканчивает из субъективных побуждений развития своего благосостояния.



Рис. 1. Графическое отображение последовательности анализируемых процессов
Fig. 1. Graphical representation of the sequence of analyzed processes

Нарушение производственных циклов в результате антропогенной деятельности наносит непоправимый ущерб природной среде, благоприятности, безопасности жизнедеятельности населения, способствует возникновению чрезвычайных ситуаций техногенного характера с неблагоприятными социально-экономическими, экологическими и иными

последствиями. Классификация опасных техногенных процессов и событий, источников возникновения чрезвычайных ситуаций, вызванных допущенными нарушениями установленных требований, стандартов, правил, нормативов и иных правовых актов в ходе осуществления антропогенной деятельности человеком, представлена на схеме (рис. 2).

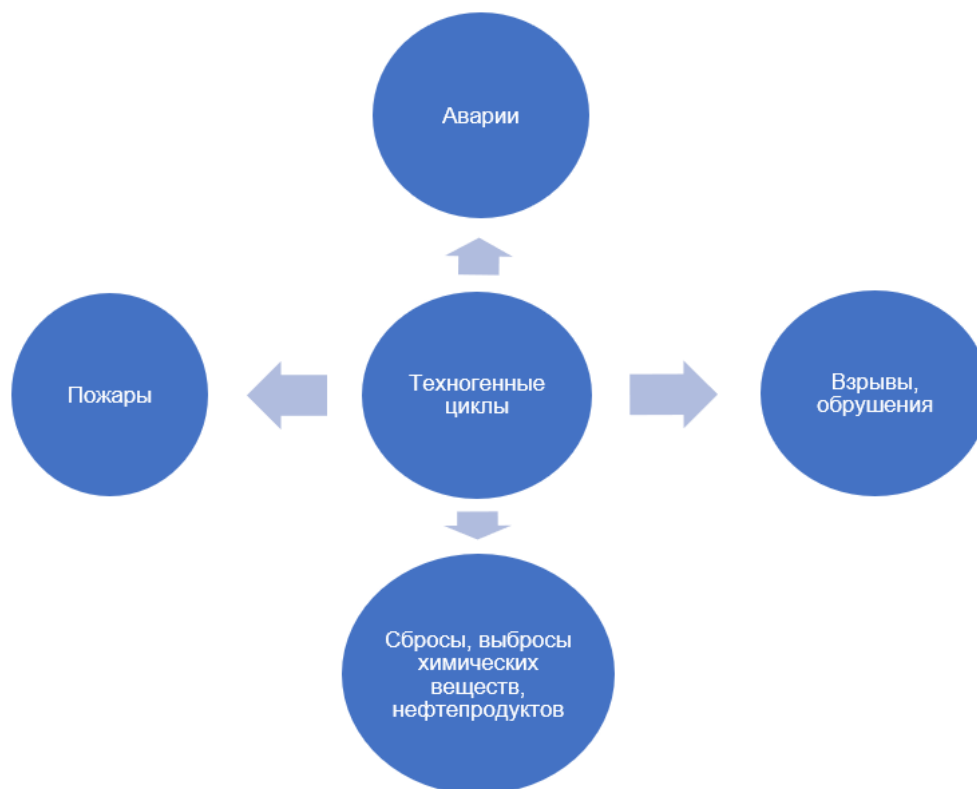


Рис. 2. Опасные последствия реализации техногенных циклов
Fig. 2. Dangerous consequences of the implementation of technogenic cycles

Для выработки экологически ориентированных стратегий безопасности жизнедеятельности от локального до глобального уровня, отвечающих концепции устойчивого развития и вышеназванным принципам организации деятельности по экологической безопасности, необходимо понимать, что они должны быть выстроены с учетом циклического характера развития ее системных единиц. Организация экологически безопасной деятельности должна быть направлена на выявление техногенных циклов, свойственных данному уровню управления деятельностью, и обеспечения его непрерывного, законченного движения с рациональной скоростью. Основными уровнями организации означенной деятельности являются: личностный, производственный, муниципальный, районный, субъектовый, национальный и международный.

Эксплуатация автотранспорта и утилизация пришедших в негодность автомобилей сопряжена со многими видами негативного воздействия на окружающую среду. Отсутствует прямая норма российского права, предписывающая сдавать на утилизацию отработавшую свой срок технику, нет определенного места, куда ее можно сдать. Существует рентабельность в приеме ряда составляющих автомобиля (аккумулятор, ходовая и двигатель), а вот целиком его не берут. Полноценная разборка с утилизацией отдельных составляющих сегодня себя не окупает, а об оплате за старый, побывавший во многих руках автомобиль, сегодня только говорят, так как эта обязанность должна лечь на последнего пользователя. Независимо от того, где закончил свой пробег автомобиль, в родном дворе, овраге или на свалке с частичной разборкой и прессованием кузова, он является экологической проблемой, которую общество должно решить. Ее нельзя решить на уровне простого автолюбителя или предприятия, вследствие чего и происходит разрыв антропогенного цикла эксплуатации автомобиля. Датировать данный вид можно за счет специальных платежей при продаже автотранспорта, что по нынешнему состоянию автомобильной отрасли в России является обыкновенным популяционизмом. Однако решить эту невыгодную для автомобильной промышленности проблему можно на государственном (национальном) уровне.

Для решения утилизации автомобилей важным является создание сети предприятий по утилизации автомобилей, эффективность которых напрямую будет связана со схемой их размещения и мощностью, а также правильностью распределения компенсационных средств. Эту сторону проблемы логичнее

решить на уровне региона. Немаловажную роль имеет и муниципальный уровень, который должен упростить процедуру приема для своих жителей и предприятий и проконтролировать их добросовестность по передаче автомобиля на утилизацию.

Техногенные циклы частично совпадают с природными циклами. В этой части они способны образовать сложные экологические проблемы, которые невозможно решить без правильного системного подхода. Возьмем круговорот углерода в природе, который значительно расширился в связи с выбросами за счет ряда антропогенных процессов. Для схематичности возьмем только теплоэнергетику городского хозяйства.

В антропогенном цикле оборота углерода в теплоэнергетике можно условно выделить следующие этапы движения углерода, содержащегося в топливе:

- выделение углекислого газа как продукта эмиссии почв, жизнедеятельности организмов, вулканической деятельности и пожаров естественного происхождения;
- содержание углекислого газа в выхлопных газах транспортных средств;
- формирование новых топливных ресурсов;
- частичное депонирование в почвенных и иных покровах Земли.
- отведение дымовых газов, в том числе углекислого и угарного, от тепловых агрегатов, с частичной очисткой.

Рассмотрим данную схему с использованием тепловой энергии торфа и дров, где выбросы углекислого газа компенсируются естественным путем, если объем их добычи не превышает величину естественного прироста этих природных ресурсов. Своевременное удаление перестоялой и больной древесины, а также отходов заготовки леса, важная природоохранная задача, решение которой надо искать в повышении привлекательности использования этого вида топлива для получения тепла и электроэнергии для местных нужд, а также в приготовлении древесного угля.

На основе вышесказанного, логично предположить проведение только санитарно-гигиенического нормирования выбросов углекислого газа от этих видов топлива и не ограничивать эти выбросы в глобальных масштабах (т. е. они должны быть вне лимитов, определенных «Киотским протоколом»). За эти выбросы также не следует проводить компенсационных платежей, так как при соблюдении технологии добычи торфа и лесозаготовки, с последующим их восстановлением, они являются законченным антропогенным циклом, синхронно

развивающимся с природным циклом круговорота углерода.

Следовательно, по основным технологическим свойствам, торф и дрова значительно уступают невосполнимым видам топлива, таким как уголь, нефть и газ. Введение экологического компенсационного платежа позволит пересмотреть их привлекательность для потребителя.

Вклад выбросов углекислого газа от теплоэнергетики сопоставим с вкладом животноводства в парниковый эффект. Формально антропогенный цикл оборота углерода в животноводстве полный и близок к природному циклу. Только роль природных экосистем передана агроэкосистемам. Однако отличие в них значительное. В естественных условиях все нагрузки по обороту углерода распространены по площади относительно равномерно, а в агроэкосистемах нет. Углерод не возвращается в землю, где содержание и выпас скота, а также внесение органических удобрений запрещено до мест, где его избыточно много. Просчитать точный баланс углерода достаточно трудно, но основные подходы к его оценке не так сложны:

- должны соблюдаться наилучшие технологии удаления биологических остатков из помещений содержания скота;
- навозохранилища по инфраструктуре и вместимости должны обеспечивать оптимальные условия перегнивания;
- транспортировка навоза должна осуществляться герметично;
- навозная жижа и сбросы ливнестоков с территории животноводческого комплекса должны эффективно очищаться.

К дополнительным требованиям в этой области следует отнести сбор и использование газов, отходящих от навозохранилища, и утилизация на таких объектах отходов с биологической составляющей – от соломы и древесины до самых мелких фракций бытового мусора и отдельных илов очистных сооружений.

Схема показывает необходимость увеличения поглощения углерода и сокращения выбросов. Для стимулирования реализации этих мероприятий необходимо внедрение соответствующих платежей, которые должны начисляться от вида и объема используемого топлива. Исключительно неэффективен современный российский подход к платежам от стационарных источников загрязнения, размер которого зависит от фактических объемов загрязнения. Эта процедура, сама по себе достаточно трудоемкая, обладает невысокой достоверностью и дает возможность манипулировать полученными результатами.

Процедура экологического нормирования выбросов загрязняющих веществ дублирует процедуру санитарно-гигиенического нормирования, а современные платежи слабо стимулируют внедрение пылегазоочистного оборудования. Упразднение подобной процедуры позволит заодно освободить многие тысячи экологических инспекторов и переориентировать их на наблюдение за эффективностью реализуемых природоохранных мероприятий.

Существующую систему платежей нужно заменить на другую, где объем платежей будет определяться в зависимости от характеристики и объема используемого топлива. Они станут просты в расчете и проверке правильности, а в размер платы легко можно заложить нормативы средств, необходимых на очистку их выбросов. Они будут стимулировать экономию топлива и повышение эффективности его использования. Часть средств следует направлять на технические мероприятия, напрямую связанные с оборотом углерода. Их можно реализовывать вне национальных рамок на выгодных условиях по разделу полученной в дальнейшем древесины. Россия богата не только природными ресурсами, но и многими сотнями тысяч гектаров техногенных пустынь, которые позволили на долгие годы покрыть мировые потребности в свободных землях, подлежащих лесорекультивации.

Размер платежа за топливо будет напрямую зависеть от его экологических характеристик. Топливо с большим объемом вредных примесей станет менее привлекательным на рынке и, как следствие, можно ожидать сокращение объемов его добычи.

Рассмотрим еще один техногенный цикл, частично совпавший с природным циклом, процесс выделения твердых частиц в атмосферный воздух от использования инертных материалов (это песок, гравий и т. д.), который накладывается на естественное запыление атмосферного воздуха. Важно изначально понимать, что товарный объем инертного материала, изъятый из недр, постоянно, под воздействием природных условий и антропогенной деятельности, уменьшается в объеме. Рассмотрим только один аспект этих потерь – образование пыли на всем пути производственного цикла обращения инертных материалов.

Основными этапами этого цикла:

- выделение пыли на всех этапах обращения с инертным материалом, от его добычи до стадии физического износа полученной из него продукции;
- запыление атмосферного воздуха;
- оседание пыли на поверхности;

- попадание большей части пыли в водные объекты;
- смыв заиленных частиц пыли в мировой океан и замкнутые акватории;
- геологический процесс формирования осадочных пород.

Таким образом, этапы цикла круговорота частиц инертного материала значительно различаются по продолжительности. Так, если срок нахождения этой частицы в атмосферном воздухе составляет несколько дней, то в геологических процессах формирования осадочных пород она будет участвовать десятки и сотни миллионов лет. И хотя частицы пыли инертных материалов, особенно с высоким содержанием кремния, представляют опасность для здоровья человека, а с уменьшением своей дисперсности возрастает их способность адсорбировать на себе вредные вещества, имеющие газообразное и жидкое состояние, негативное следствие этого вида воздействия носит локальный характер, не выходящий за рамки муниципальных образований. Основную опасность запыление атмосферного воздуха несет как дополнительный фактор заливания малых и средних водотоков, состояние которых в последнее время стало в России критическим.

Какие мероприятия следует провести, чтобы повысить уровень экологической безопасности? Во-первых, компенсационные платежи должны взиматься на начальной стадии добычи песка, платеж должен быть паритетным – поставщика и покупателя (по месту фактического размещения объектов добычи и переработки). Это позволит легко отслеживать объемы инертного материала, добываемого на законном основании (трудно дать оценку, но по этим видам ископаемых ресурсов в России высок объем добычи без лицензий, а это не только отсутствие средств в бюджетах разных уровней, но и вероятность низкого качества исходного сырья). Платежи должны взиматься соответственно с объемов добываемых ископаемых, а не по каждому предприятию их использующему. Во-вторых, они должны направляться на очистку водотоков и организацию локальных очистных сооружений поверхностных вод. Рекультивация карьеров, газо- и пылеочистное оборудование должны финансироваться из собственных средств организаций, их добывающих и перерабатывающих. По рекультивации необходим сбор заемных средств от природопользователя, начиная с первых лет эксплуатации месторождения. Развитие средств локальной очистки поверхностных стоков с территории антропогенных объектов должно быть сопряжено с развитием видов вторичного использования большинства илов

от этих сооружений. Вопросы регулирования уровня загрязнения атмосферного воздуха от объектов обращения с инертными материалами следует решать на муниципальном или на уровне субъекта. На местах следует решить вопрос установления повышающих коэффициентов размера компенсационной платы.

Круговорот воды в природе является основным механизмом очистки поверхностных вод. Антропогенный цикл использования вод может завершаться без ущерба для природной среды если за негативный аспект их использования принять предупреждение загрязнения химическими веществами от антропогенных объектов, таких как жилищно-коммунальный сектор и промышленность.

Вопросы охраны вод и их рационального использования носит межрегиональный, для малых по площади стран национальный, а для территорий, испытывающих дефицит воды, межнациональный характер. Скорость течения этих циклов небольшая, особенно если сравнивать с предыдущим. Поэтому определенные научным и экспертным сообществом основные направления охраны вод, известные не одно десятилетие, необходимо реализовать только на практике на научно-методической основе (рис. 3).

Все они вписываются в предложенную схему экологизации техногенных циклов. Эта схема похожа на всем известную, которая называется «Проникновение загрязняющих веществ в круговорот воды». Принципиальное различие в том, что в этом случае формируются два частично совместимых цикла: круговорот воды в природе и техногенный цикл использования вод. В первом случае, изучая схему проникновения загрязняющих веществ в круговорот воды, даются только предложения, препятствующие этому проникновению в целях сохранения стратегического запаса пресных вод и обеспечения их защиты и охраны от загрязнения и истощения. Во втором случае целесообразно сформировать комплекс таких превентивных мероприятий и решений на этапе хозяйственной деятельности.

Во-первых, признание работы по извлечению полезных компонентов из вод или со дна мирового океана, не приводящих к повышению содержания других загрязняющих веществ, без использования невозполнимых видов топлива энерго- и ресурсосберегающей деятельностью. Она не должна подлежать жесткому государственному регулированию, а проводится на заявительной основе, при условии согласования мест расположения инфраструктуры и процедуры подтверждения требований по сохранению объемов и многообразию

биологических ресурсов. Во-вторых, подобная деятельность должна быть освобождена от компенсационных экологических платежей и проводится на основе обязательной сертификации добываемого сырья. Изменение последовательности размещения на водотоках водозаборных узлов и очистных сооружений – последние должны быть выше первых по

течению реки. Компенсационные платежи за сброс загрязняющих веществ в водные объекты должен осуществляться с учетом естественного фона вод до их использования (в настоящее время платежи осуществляются за весь объем сброса загрязняющих веществ). Более детальная проработка схемы позволит значительно увеличить число предложений.



Рис. 3. Меры по экологизации техногенного цикла использования вод
Fig. 3. Measures for greening the anthropogenic cycle of water use

Говоря о сравнительном анализе всех трех схем, необходимо отметить, что эксплуатация неисчерпаемого ресурса, влекущая за собой снижение потребительских качеств этих ресурсов (в наших случаях использование пресных вод), требует компенсационных экологических платежей за объем произведенного негативного воздействия. Использование неисчерпаемого ресурса без снижения потребительских качеств этих ресурсов (запасов углерода в виде торфа и дров) следует проводить без проведения подобных платежей. Эксплуатация практически исчерпанного ресурса требует компенсационных экологических платежей на стадии добычи (реализации) сырья. Подход к этому решению очень прост, надо стимулировать завершение антропогенных циклов и уменьшать неблагоприятное воздействие на окружающую среду, проводить мероприятия по предупреждению такого воздействия.

Циклический подход в целях обеспечения экологической безопасности, как и многие другие, строго научные методы, не дает ответа на главный вопрос – где тот предел жизнеспособности современного общества, когда

суммарное негативное антропогенное воздействие разрушит цивилизацию, его порождающую. Однако экологические факторы внешнего воздействия взаимодействуют между собой гораздо сложнее, чем применяемые сегодня схемы взаимодействия, учитывающие от одного до четырех их лимитирующих видов. Это определяет не только недостаточную эффективность реализуемых в отношении их природоохранных мероприятий, но и достоверность любых прогнозов.

Основной идеологии экологической безопасности техногенных циклов могут служить:

- стремление к более полному возвращению природных ресурсов в начало цикла за более короткий срок;
- взятие собственником обязательств компенсации (возмещения) негативных последствий, нанесенных природным объектам, являющихся элементами соответствующих циклов;
- выявление многофакторности техногенных циклов основной элемент определения ответственности, в том числе комплексной, за состояние отдельных элементов окружающей природной среды;

– соотношение техногенных циклов с природными, во всех случаях, когда их последствия полностью не компенсируются собственником.

Игнорирование этих положений не позволит создать требуемый уровень безопасности техногенных циклов, а, следовательно, эффективно организовать систему комплексной безопасности населения, основой которой служат обеспечение безопасности жизнедеятельности человека и экологической безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение техногенных циклов с точки зрения обеспечения экологической безопасности и предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера имеет важное научно-практическое значение.

По результатам проведенных исследований в работе выделен ряд принципов, которые следует учитывать при анализе техногенных циклов:

1. Определение комплексного воздействия негативной антропогенной деятельности в планетарном (глобальном) масштабе.

2. Необходимость ранжирования видов негативного антропогенного воздействия на глобальные, межнациональные, национальные, региональные и муниципальные следует проводить на основе анализа соответствующих техногенных циклов. Это способствует определению уровня власти, которая сможет наиболее эффективно осуществить регулирование и надзор за тем или иным видом вредного воздействия.

3. Техногенное преобразование природной среды – процесс объективный. Он должен учитывать обоснованность сокращения естественных и увеличения техногенных

территорий, рациональности использования земель, минимизации использования малоосвоенных территорий и сохранения особо охраняемых природных территорий (биологическое многообразие – важная составляющая гомеостаза биосферы).

4. Природопользование должно быть рациональным (разумным), т. е. воздействие на природную среду должно компенсироваться конкретными мероприятиями по обеспечению безопасности и предупреждению чрезвычайных ситуаций.

5. Определение видов и размеров компенсационных экологических платежей от отдельных антропогенных циклов, а также направлений использования этих средств, должно стать важнейшим принципом организации природоохранного дела, при правильном планировании стратегий развития народнохозяйственных комплексов.

6. Признание идеологии техногенной цикличности, ее интеграция со смежными дисциплинами (экологическая безопасность, экономика, управление, организация и технологии) предоставит возможность принятия обоснованных стратегических решений в области мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного характера, предупреждения и ликвидации их неблагоприятных социально-экономических, экологических и иных последствий.

Предложенный авторами научно-методический подход был использован при разработке методических рекомендаций по прогнозированию чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, применяемых в настоящее время в работе МЧС России и его территориальных органов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Акимов В.А., Олтян И.Ю., Иванова Е.О. Методика ранжирования чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера по степени их катастрофичности // Технологии гражданской безопасности. 2021. Т. 18. № 1. С. 4–7. <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2021.18.1.67.1.4>. EDN: IOGGXC.
2. Ломакин М.И., Докукин А.В., Мошков В.Б., Олтян И.Ю., Ниязова Ю.М. Оценка ущерба от чрезвычайной ситуации в условиях неполных данных // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 3. С. 32–36. <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2022.19.3.73>. EDN: ZUSCWO.
3. Арефьева Е.В., Олтян И.Ю. Роль международного сотрудничества в области совершенствования прогнозирования рисков бедствий с учетом глобальных климатических изменений // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2017. № 2. С. 7–9. EDN: ZBGXSB.
4. Фалеев М.И., Олтян И.Ю., Арефьева Е.В., Болгов М.В. Методология и технология дистанционной оценки риска // Проблемы анализа риска. 2018. Т. 15. № 4. С. 6–19. EDN: YCNCAP.
5. Oltyan I.Y., Arefyeva E.V., Kotosonov A.S. Remote Assessment of an Integrated Emergency Risk Index // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 962. P. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042053>.
6. Суздалева А.Л. Экологическая глобалистика и устойчивое развитие на этапе техногенной трансформации биосферы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 1. С. 6–11. <https://doi.org/10.31857/S0869780920010196>. EDN: HKJMPL.

7. Goldstein B., Rasmussen F. LCA of Buildings and the Built Environment // *Life Cycle Assessment. Theory and Practice*. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018. P. 695–720. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_28.
8. Hertwich E., Lifset R., Pauliuk S., Heeren N. Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. Nairobi, Kenya: UNESCO, 2020. 179 p.
9. Пупырев Е.И. Системы жизнеобеспечения городов. М.: Наука, 2006. 246 с.
10. Lundström S., De Haan J., Sturm J.-E. Market-Oriented Institutions and Policies and Economic Growth: A Critical Survey // *Journal of Economic Surveys*. 2006. Vol. 20. Iss. 2. P. 157–191. <https://doi.org/10.1111/j.0950-0804.2006.00278.x>.
11. Куценко В.В., Гурова Т.Ф. Экологическая безопасность: методологические подходы и способы реализации. М.: МНЭПУ. 2003. 158 с. EDN: QJITLB.
12. Теличенко В.И., Бенуж А.А., Глотова Е.П. Экологическая безопасность строительства в России: реальность и перспективы // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году*. М.: Изд-во АСВ, 2022. С. 441–449. EDN: CBIYVG.
13. Цховребов Э.С. Новый подход к оценке параметров устойчивого развития в формате предотвращенной экологической опасности // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2023. № 3. С. 50–68. EDN: EHNHBO.
14. Графкина М.В., Потапов А.Д. Оценка экологической безопасности строительных систем как природно-техногенных комплексов (теоретические основы) // *Вестник МГСУ*. 2008. № 1. С. 23–28. EDN: MVHAJP.
15. Azarov V.N., Manzhilevskaya S.E., Petrenko L.K. Organizational and Economic Problems of Ecological Safety in Construction // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 698. P. 1–8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/5/055007>.
16. Владимиров С.Н. Проблемы переработки отходов строительной индустрии // *Системные технологии*. 2016. № 19. С. 101–105. EDN: WCNXNV.
17. Petropavlovskaya V.B., Artamonova S.V., Shchipsanskaya E.O., Ratkevich E.A., Petropavlovskii K.S. Environmental Management in Ash and Slag Waste Management in Russia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1010. P. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012135>.
18. Sereda T.G., Kostarev S.N., Novikova O.V., Ivanova I.E. Study of Solid Municipal Waste Accumulation Rates in Penitentiary Facilities in Perm Krai During the Pandemic of 2020 // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1043. P. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012005>.
19. Волынкина Е.П. Анализ состояния и проблем переработки техногенных отходов в России // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2017. № 2. С. 43–49. EDN: YTOUCP.
20. Elgizawy S., El-Haggag S., Nassar K. Slum Development Using Zero Waste Concepts: Construction Waste Case Study // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 145. P. 1306–1313. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.168>.
21. Ehresman T.G., Okereke C. Environmental Justice and Conceptions of the Green Economy // *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*. 2015. Vol. 15. P. 13–27. <https://doi.org/10.1007/s10784-014-9265-2>.
22. Chernykhivska A.V. Modern Perspectives of Development of “Green” Economy // *Economic Processes Management: International Scientific E-Journal*. 2015. Vol. 1. P. 1–8.
23. Domenech T., Bahn-Walkowiak B. Transition Towards a Resource Efficient Circular Economy in Europe: Policy Lessons From the EU and the Member States // *Ecological Economics*. 2019. Vol. 155. P. 7–19. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.001>.
24. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the Circular Economy: an Analysis of 114 Definitions // *Resources, Conservation & Recycling*. 2017. Vol. 127. P. 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
25. Hart J., Adams K., Giesekam J., Densley Tingley D., Pomponi F. Barriers and Drivers in a Circular Economy: The Case of the Built Environment // *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 80. P. 619–624. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.015>.
26. Цховребов Э.С. Формирование региональных стратегий управления обращением с вторичными ресурсами // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 4. С. 450–463. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.4.450-463>. EDN: EPNQHR.
27. Цховребов Э.С. Эколого-экономические аспекты планирования размещения и проектирования промышленных объектов по обработке, утилизации, обезвреживанию отходов // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 11. С. 1326–1340. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.11.1326-1340>. EDN: YQNVNJ.
28. Kalaeva S., Tshovrebov E., Gennadieva A., Kalaev R. New Approaches to Oily Waste Treatment to Minimise Technology-Related Threats and Risks // *Reliability: Theory & Applications*. 2024. Vol. 19. Iss. 6. P. 886–892.

29. Tskhovrebov E., Velichko E., Niyazgulov U. Planning Measures for Environmentally Safe Handling with Extremely and Highly Hazardous Wastes in Industrial, Building and Transport Complex // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. P. 988–994. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.988>.
30. Tshovrebov E., Moshkov V., Oltyan I., Niyazgulov F. A New Approach to Assessing the Accuracy of Forecasting of Emergencies with Environmental Consequences Based on the Theory of Fuzzy Logic // *Nature Environment and Pollution Technology*. 2024. Vol. 23. Iss. 4. P. 2477–2481. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2024.v23i04.054>.

REFERENCES

1. Akimov V.A., Oltyan I.Yu., Ivanova E.O. Natural, Anthropogenic and Biological and Social Emergency Situations Ranking Technique by Catastrophic Degree. *Civil Security Technology*. 2021;18(1):4-7. (In Russ.). <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2021.18.1.67.1.4>. EDN: IOGGXC.
2. Lomakin M.I., Dokukin A.V., Moshkov V.B., Oltyan I.Yu., Niyazova Ju.M. Emergency Situation Damage Assessment in the Conditions of Incomplete Data. *Civil Security Technology*. 2022;19(3):32-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2022.19.3.73>. EDN: ZUSCWO.
3. Arefeva E.V., Oltyan I.Yu. The Role of International Cooperation for Better Disaster Risk Forecast in the Context of Ongoing Climate Change. *Scientific and Educational Problems of Civil Protection*. 2017;2:7-9. (In Russ.). EDN: ZBGXSB.
4. Faleev M.I., Oltyan I.Yu., Arefeva E.V., Bolgov M.V. Methodology and Technology of Remote Risk Assessment. *Issues of Risk Analysis*. 2018;15(4):6-19. (In Russ.). EDN: YCNCAP.
5. Oltyan I.Y., Arefyeva E.V., Kotosonov A.S. Remote Assessment of an Integrated Emergency Risk Index. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;962:1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042053>.
6. Suzdaleva A.L. Ecological Globalistics and Sustainable Development at the Stage of Technogenic Transformation of the Biosphere. *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2020;1:6-11. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869780920010196>. EDN: HKJMPL.
7. Goldstein B., Rasmussen F. LCA of Buildings and the Built Environment. In: *Life Cycle Assessment. Theory and Practice*. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018. P. 695–720. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_28.
8. Hertwich E., Lifset R., Pauliuk S., Heeren N. *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*. Nairobi, Kenya: UNESCO, 2020. 179 p.
9. Pupyrev E.I. *Life Support Systems of Cities*. Moscow: Nauka, 2006. 246 p. (In Russ.).
10. Lundström S., De Haan J., Sturm J.-E. Market-Oriented Institutions and Policies and Economic Growth: A Critical Survey. *Journal of Economic Surveys*. 2006;20(2):157-191. <https://doi.org/10.1111/j.0950-0804.2006.00278.x>.
11. Kutsenko V.V., Gurova T.F. *Environmental Safety: Methodological Approaches and Methods of Implementation*. Moscow: MNEPU. 2003. 158 p. (In Russ.). EDN: QJITLB.
12. Telichenko V.I., Benuzh A.A., Glotova E.P. Environmental Safety of Construction In Russia: Reality and Prospects. In: *Fundamental, exploratory and applied research of RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021*. Moscow: ASV Publishing House, 2022. P. 441–449. (In Russ.). EDN: CBIYVG.
13. Tskhovrebov E.S. A New Approach to Assessing the Parameters of Sustainable Development in the Format of the Magnitude of the Prevented Environmental Hazard. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2023;3:50-68. (In Russ.). EDN: EHNHBO.
14. Grafkina M.V., Potapov A.D. Assessment of Environmental Safety of Building Systems as Natural-Technogenic Complexes (Theoretical Foundations). *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2008;1:23-28. (In Russ.). EDN: MVHAJP.
15. Azarov V.N., Manzhilevskaya S.E., Petrenko L.K. Organizational and Economic Problems of Ecological Safety in Construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;698:1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/5/055007>.
16. Vladimirov S.N. Problems of Recycling Construction Industry Waste. *System Technologies*. 2016;19:101-105. (In Russ.). EDN: WCNXNV.
17. Petropavlovskaya V.B., Artamonova S.V., Shchipanskaya E.O., Ratkevich E.A., Petropavlovskii K.S. Environmental Management in Ash and Slag Waste Management in Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1010:1-6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012135>.
18. Sereda T.G., Kostarev S.N., Novikova O.V., Ivanova I.E. Study of Solid Municipal Waste Accumulation Rates in Penitentiary Facilities in Perm Krai During the Pandemic of 2020. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1043:1-6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012005>.
19. Volynkina E.P. Analysis of the State and Problems of Processing Industrial Waste in Russia. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2017;2:43-49. (In Russ.). EDN: YTOUCP.

20. Elgizawy S., El-Haggar S., Nassar K. Slum Development Using Zero Waste Concepts: Construction Waste Case Study. *Procedia Engineering*. 2016;145:1306-1313. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.168>.
21. Ehresman T.G., Okereke C. Environmental Justice and Conceptions of the Green Economy. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*. 2015;15:13-27. <https://doi.org/10.1007/s10784-014-9265-2>.
22. Chernykhivska A.V. Modern Perspectives of Development of "Green" Economy. *Economic Processes Management: International Scientific E-Journal*. 2015;1:1-8.
23. Domenech T., Bahn-Walkowiak B. Transition Towards a Resource Efficient Circular Economy in Europe: Policy Lessons From the EU and the Member States. *Ecological Economics*. 2019;155:7-19. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.001>.
24. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the Circular Economy: an Analysis of 114 Definitions. *Resources, Conservation & Recycling*. 2017;127:221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
25. Hart J., Adams K., Giesekam J., Densley Tingley D., Pomponi F. Barriers and Drivers in a Circular Economy: The Case of the Built Environment. *Procedia CIRP*. 2019;80:619-624. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.015>.
26. Tskhovrebov E.S. Formation of Regional Management Strategies of Secondary Resource Handling. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2019;14(4):450-463. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.4.450-463>. EDN: EPNQHR.
27. Tskhovrebov E.S. Ecological and Economic Aspects of Planning Of Placing and Designing Of Industrial Targets on Processing, Recyclings, To Neutralisation of A Waste. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2018;13(11):1326-1340. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.11.1326-1340>. EDN: YQNVNJ.
28. Kalaeva S., Tshovrebov E., Gennadieva A., Kalaev R. New Approaches to Oily Waste Treatment to Minimise Technology-Related Threats and Risks. *Reliability: Theory & Applications*. 2024;19(6):886-892.
29. Tskhovrebov E., Velichko E., Niyazgulov U. Planning Measures for Environmentally Safe Handling with Extremely and Highly Hazardous Wastes in Industrial, Building and Transport Complex. *Materials Science Forum*. 2019;945:988-994. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.988>.
30. Tshovrebov E., Moshkov V., Oltyan I., Niyazgulov F. A New Approach to Assessing the Accuracy of Forecasting of Emergencies with Environmental Consequences Based on the Theory of Fuzzy Logic. *Nature Environment and Pollution Technology*. 2024;23(4):2477-2481. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2024.v23i04.054>.

Информация об авторах

Влад Игорь Викторович,

научный сотрудник,
Всероссийский научно-исследовательский
институт по проблемам гражданской обороны
и чрезвычайных ситуаций МЧС России
(федеральный центр науки и высоких
технологий),
121352, г. Москва, ул. Давыдовская, 7, Россия,
✉e-mail: viv23121963@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-2818-1171>
Author ID: 1149402

Цховребов Эдуард Станиславович,

к.э.н., доцент, старший научный сотрудник,
Всероссийский научно-исследовательский
институт по проблемам гражданской обороны
и чрезвычайных ситуаций МЧС России
(федеральный центр науки и высоких
технологий)
121352, г. Москва, ул. Давыдовская, 7, Россия,
e-mail: rebrovstanislav@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9481-3832>
Author ID: 470064

Information about the authors

Igor V. Vlad,

Research Associate,
All-Russian Scientific Research Institute on Civil
Defense and Emergency Situations of the Russian
Ministry of Emergency Situations (Federal Center
for Science and High Technologies),
7, Davydkovskaya St., Moscow 121352,
Russia,
✉e-mail: viv23121963@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-2818-1171>
Author ID: 1149402

Eduard S. Tshovrebov,

Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor,
Research Associate,
All-Russian Scientific Research Institute on Civil
Defense and Emergency Situations of the Russian
Ministry of Emergency Situations (Federal Center
for Science and High Technologies),
7, Davydkovskaya St., Moscow 121352, Russia,
e-mail: rebrovstanislav@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9481-3832>
Author ID: 470064

Лебедев Антон Евгеньевич,

д.т.н., профессор кафедры технологические
машины и оборудование,
Ярославский государственный технический
университет,
150023, г. Ярославль, Московский пр-т, 88,
Россия,
e-mail: lebedevae@ystul.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8193-8655>
Author ID: 365728

Anton E. Lebedev,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
of Technological Machines and Equipment,
Yaroslavl State Technical University,
88, Moskovsky Ave., Yaroslavl 150023,
Russia,
e-mail: lebedevae@ystul.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8193-8655>
Author ID: 365728

Филиппова Ольга Павловна,

д.т.н., профессор кафедры охрана труда
и природы,
Ярославский государственный технический
университета;
150023, г. Ярославль, Московский пр-т, 88,
Россия,
e-mail: filippovaop@ystu.ru
<https://orcid.org/0009-0009-5561-6316>
Author ID: 1087987

Olga P. Filippova,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
of Labor and Nature Protection,
Yaroslavl State Technical University,
88, Moskovsky Ave., Yaroslavl 150023,
Russia,
e-mail: filippovaop@ystu.ru
<https://orcid.org/0009-0009-5561-6316>
Author ID: 1087987

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 14.04.2025.
Одобрена после рецензирования 07.05.2025.
Принята к публикации 12.05.2025.

Information about the article

The article was submitted 14.04.2025.
Approved after reviewing 07.05.2025.
Accepted for publication 12.05.2025.



Водоочистка техногенных растворов от ионов никеля (II) комбинированным процессом

Н.В. Иринчинова¹, Е.Г. Филатова², В.И. Дударев³✉, В.Н. Кульков⁴

^{1,2,3,4}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Вариант комбинированной очистки водных растворов от ионов никеля (II) опирается на сорбционные технологии с применением электрогенерируемого гидроксида алюминия с аморфной пористой структурой в виде гидрогеля и развитой сорбирующей поверхностью. Такой гидроксид алюминия обладает мицелярным строением и может быть описан коллоидной частицей: $\{[m \text{ Al}(\text{OH})_3] n \text{ Al}(\text{OH})_2^+ (n-x) \text{ OH}^-\}^{x+} x \text{ OH}^-$. Очистка связана с явлением сорбции загрязняющего иона на поверхности сорбента за счет дисперсионного взаимодействия. Предельная величина адсорбции никеля при 298 К и pH 7,6 составила 8,3 ммоль/г, Расход количества электричества соответствовал 9,5 А·ч при оптимальном времени электрокоагуляции десять минут и плотности тока 1,6 мА/см². Преимущества метода электрокоагуляции с применением алюминиевых электродов, в сравнении с другими методами очистки сточных вод, заключаются в простоте изготовления аппаратов и простоте их обслуживания. Эффективность очистки при электрокоагуляционной обработке составила 86 %. Доочистку техногенных водных растворов выполняли с использованием углеродных сорбентов в слабощелочной среде при pH 9,8. Величина сорбции никеля достигает 0,25 ммоль/г. Особенностью комбинированной технологии извлечения никеля из водных растворов является обеззараживание воды с улучшением ее органолептические показатели и возможностью избежать вторичного загрязнения очищаемых водных растворов вносимыми реагентами.

Ключевые слова: очистка, техногенные растворы, медь, сорбция

Для цитирования: Иринчинова Н.В., Филатова Е.Г., Дударев В.И., Кульков В.Н. Водоочистка техногенных растворов от ионов никеля (II) комбинированным процессом // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 433–441. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-433-441>. EDN: FPTQIO.

Original article

Water purification of technogenic solutions from nickel (II) ions by a combined process

Nadezhda V. Irinchinova¹, Elena G. Filatova²,
 Vladimir I. Dudarev³✉, Viktor N. Kulikov⁴

^{1,2,3,4}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The option of combined purification of aqueous solutions from nickel (II) ions is based on sorption technologies using electrically generated aluminum hydroxide with an amorphous porous structure in the form of a hydrogel and a developed sorbing surface. Such aluminum hydroxide has a micellar structure and can be described by a colloidal particle: $\{[m \text{ Al}(\text{OH})_3] n \text{ Al}(\text{OH})_2^+ (n-x) \text{ OH}^-\}^{x+} x \text{ OH}^-$. Purification is associated with the phenomenon of sorption of a contaminating ion on the surface of the sorbent due to the dispersion interaction. The limiting value of nickel adsorption at 298 K and pH 7.6 was 8.3 mmol/g, the consumption of electricity corresponded to 9.5 A.h with an optimal electrocoagulation time of ten minutes and a current density of 1.6 mA/cm². The advantages of the electrocoagulation method using aluminum electrodes, in comparison with other wastewater treatment methods, are the simplicity of the equipment manufacturing and ease of maintenance. The purification efficiency during

© Иринчинова Н.В., Филатова Е.Г., Дударев В.И., Кульков В.Н., 2025

electrocoagulation treatment was 86%. Aftertreatment of technogenic aqueous solutions was performed using carbon sorbents in a slightly alkaline medium at pH 9.8. The sorption value of nickel reaches 0.25 mmol/g. A feature of the combined technology for extracting nickel from aqueous solutions is the disinfection of water with an improvement in its granoleptic properties and the possibility of avoiding secondary contamination of the treated aqueous solutions with applied reagents.

Keywords: purification, technogenic solutions, copper, sorption

For citation: Irinchinova N.V., Filatova E.G., Dudarev V.I., Kulkov V.N. Water purification of technogenic solutions from nickel (II) ions by a combined process. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):433-441. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-433-441>. EDN: FPTQIO.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение водных объектов ионами никеля происходит из-за техногенных стоков, образующихся при добыче и обогащении руды [1–3], выплавке сплавов [4], электрохимическом извлечении никеля из растворов [5–7], производстве и утилизации различных электротехнических изделий на гальванических производствах [8–10]. Основным источником ионов никеля (II) на предприятиях, использующих гальваническое производство, являются цианистые стоки, образующиеся при промывке после гальванопокрытий из цианистых ванн (цинкование, никелирование, меднение, кадмирование), осветление и обезжиривания деталей, которые содержат от 50 до 100 мг/дм³ комплексных цианидов тяжелых металлов [4]. Цианистый сток недопустимо смешивать с кислым во избежание образования летучих высокотоксичных соединений. Стоки мало агрессивны, но склонны к образованию отложений на стенках труб и резервуаров, и их сброс в системы канализации строго регламентирован [11, 12]. Обработка реагентами сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, позволяет в большинстве случаев снизить содержание ионов до величин, позволяющих осуществлять сброс условно очищенной воды в системы канализации. Когда требуется более глубокая очистка сточных вод, использование только реагентов не дает необходимого эффекта [13]. Метод не обеспечивает необходимой степени извлечения из сточных вод ионов никеля (II). Происходит дополнительное загрязнение стоков за счет внесения в них катионов и анионов реагентов [14]. Накапливаются большие объемы трудно обезвоживаемого и не утилизируемого осадка [15]. Серьезные трудозатраты связаны с эксплуатацией, необходимостью организации и содержания реагентного хозяйства с коррозионно-устойчивым специальным оборудованием и дозирующими устройствами [16]. Для обеспечения высокой степени очистки произ-

водственных сточных вод от ионов никеля (II) целесообразно использовать физико-химические методы очистки, основанные на вариантах сорбции [17, 18]. Так, метод электрокоагуляции с применением алюминиевых электродов имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами очистки сточных вод:

- простота изготовления аппаратов и несложность их обслуживания;
- возможность регулирования степени очистки путем изменения только одного параметра;
- отсутствие вращающихся частей в рабочей зоне аппарата [19].

Целью данной работы является разработка комбинированного процесса очистки водных растворов от ионов никеля (II), опирающегося на сорбционные технологии.

МЕТОДЫ

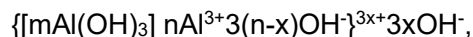
Изучение сорбционного процесса извлечения ионов никеля (II) из водных растворов проводили на модельных растворах, приготовленных из соли NiSO₄·7H₂O квалификации «хч» и дистиллированной воды. Усредненный состав производственных сточных вод послужил основой для создания рабочих концентраций модельных растворов [4, 11]. При моделировании техногенных стоков электрохимических производств готовили растворы варьируя концентрации ионов никеля (II) от 5 до 70 мг/м³. Концентрации ионов металла в растворах устанавливали по стандартным методикам [20]. При получении адсорбционных характеристик материалов использовали методы переменных концентраций, от 1 до 70 мг/дм³, и неизменных навесок – 0,1 г. В исследуемых растворах (100 см³) массовое соотношение жидкой и твердой фаз составляло 1:100. Величину адсорбции (A , ммоль/г) вычисляли по формуле: $A = (C_0 - C_{равн}) V / m$, где C_0 и $C_{равн}$ – исходная и равновесная концентрации металла в растворе, ммоль/дм³; V – объем раствора, дм³; m – масса сорбента, г.

Опыты проводили в термостатированных условиях при постоянной скорости перемешивания растворов для исключения влияния на процесс динамики перемещения ионов. Установка для электрокоагуляционного процесса извлечения никеля с помощью гидроксида алюминия включала источник питания Б5-71, амперметр М-1104, вольтметр М-243, электрохимическую ячейку объемом 100 см³ с алюминиевыми электродами, кулонометр и реостат, термостат UNU-4. Силу тока варьировали от 4 до 160 мА при напряжении 12 В. Остаточные количества ионов никеля (II) доизвлекали адсорбционными приемами с использованием углеродных сорбентов [21].

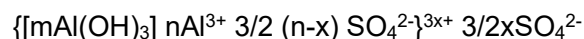
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При электрокоагуляции с алюминиевыми электродами происходит изменение физико-химических и фазово-дисперсных характеристик загрязнений, что способствует их обезвреживанию и более быстрому извлечению из воды [22]. Взаимодействие поллютантов с образующимися частицами адсорбентов является достаточно сложным. Наряду с воздействием на дисперсную систему электрического поля существенное влияние оказывают продукты электродных реакций, а также окислительно-восстановительные реакции на электродах [23]. Эффективность коагуляции и адсорбции частиц загрязнителей определяется их размерами, электрическими свойствами, материалом электродов, технологическими параметрами электролиза, ионным составом воды и т. д. [24]. В результате электрокоагуляционного процесса в сточных водах образу-

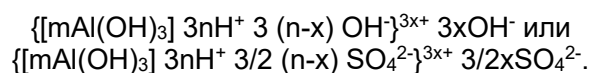
ется дисперсный раствор, состоящий из коллоидных частиц. Структуру мицеллы гидроксида алюминия можно представить формулой:



если в сточной воде присутствуют сульфат ионы, мицелла может иметь вид



В предположении, что потенциалопределяющим ионом является Н⁺, мицеллы гидроксида алюминия могут иметь следующие строение



Исследование показало, что полученный электролитическим путем, гидроксид алюминия имеет пористую структуру гидрогеля и способен активно сорбировать на своей поверхности ионы тяжелых металлов. При значении рН 7,6 зафиксирован минимальный расход алюминия и минимальный расход количества электричества составляющий 3,2 г алюминия для удаления 1 г никеля при расходе количества электричества – 9,5 А·ч.

Оптимальная плотность тока для электрокоагуляционного извлечения ионов никеля (II) составила 1,6 мА/см². Адсорбция при этом удовлетворительно описывается изотермами Лэнгмюра и Фрейндлиха. Предельная величина сорбции достигала значений 8,3 ммоль/г (табл. 1).

Таблица 1. Значения предельной сорбции и константы сорбционного равновесия при оптимальных плотностях тока (R²=0,98)

Table 1. Values of Ultimate Sorption and Sorption Equilibrium Constant at optimal current densities (R²=0,98)

Ион	Температура, К	Уравнение изотермы сорбции Лэнгмюра	Предельная адсорбция A _∞ ,		Константа сорбционного равновесия K
			ммоль/г	мкг/мг	
Ni ²⁺	298	c/A= 0,1200c+0,0138	8,3	487,0	14 174
	318	c/A= 0,0320c+0,0025	31,2	1831,4	12 820
	338	c/A= 0,2150c+0,0021	40,0	298,5	11 905

Изучение влияния температуры на сорбируемость ионов никеля (II) показало (рис. 1), что с ростом температуры величина сорбции увеличивается.

Термодинамические расчеты процесса сорбции гидроксидом алюминия выполняли на основании уравнения Лэнгмюра. Для этого использовали изотермы сорбции, которые представляли в виде линейной зависимости

c/A= f(c) при различных температурах. Значение дифференциальной теплоты сорбции для ионов никеля (II) 39,3 кДж/моль указывают на смешанный характер процесса, который заключается в том, что в начале имеет место хемосорбция, а затем физическая адсорбция. Полученное значение кажущейся энергии активации 22,9 кДж/моль свидетельствует о протекании процесса сорбции в диффузион-

ной области. Следовательно, скорость процесса сорбции зависит от перемешивания и концентрации растворителя. Такой эффект объясняется тем, что при увеличении скорости воды в электродном пространстве элек-

тролитической ячейки происходит вынос хлопьев гидроксида алюминия, уменьшается толщина диффузионного приэлектродного слоя, а также резко сокращается газонакопление в сточной воде.

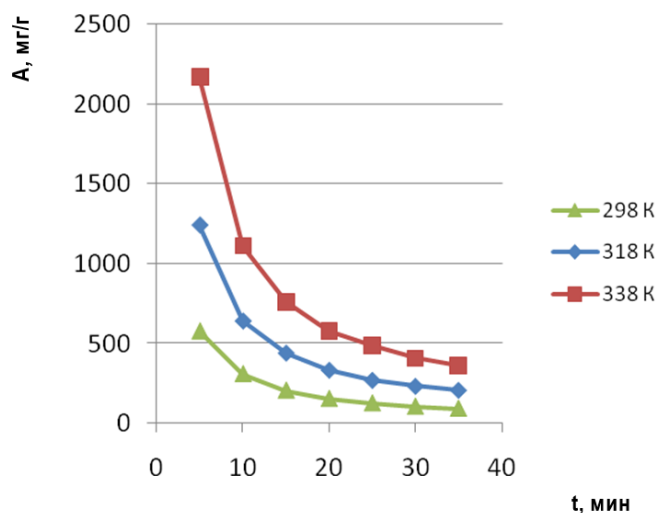


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции ионов никеля на гидрогеле при разных температурах среды

Fig. 1. Kinetic curves of sorption of nickel ions on a hydrogel at different temperatures of the medium

Результаты проведенных кинетических экспериментов свидетельствуют об уменьшении сорбции ионов металла во времени, что связано с изменением пористой структуры гидрогеля в результате кристаллизации. С течением времени самопроизвольно начинает протекать процесс старение коагулянта, направленный в сторону увеличения пассивности системы в отношении поверхностных явлений. Исходя из этого оптимальное время проведения электрокоагуляции составляет 10 мин. При оптимальном времени проведения электрокоагуляции, максимальная величина сорбции для ионов никеля 432 мкг/мг, а эффективность удаления ионов никеля из гальванических стоков находится в пределах 86 %. Для достижения предельно допустимых концентраций ионов никеля (II) в очищенных водах был изучен процесс доизвлечения металла с использованием углеродных сорбентов [25]. Углеродные сорбенты представляют собой темные пористые гранулы неправильной формы от 0,5 до 2,0 мм.

Суммарная пористость, представленная в основном микропорами, составляет 0,69 см³/г, а удельная поверхность 550 м²/г [26]. Выявлено, что угольно-сорбционный процесс существенно зависит от кислотности среды. Наибольшая величина адсорбции катионов никеля (II) наблюдается в слабощелочной среде при pH = 9,8.

Кинетические исследования показали, что адсорбционное равновесие в системе металлосодержащий раствор – углеродный сорбент, отвечающее постоянству концентрации металла в растворе, устанавливается за три часа. При исходной концентрации металла 0,10–0,30 ммоль/дм³ за 30–45 мин достигается 80 % степень насыщения сорбента. Вероятно, определяющей стадией кинетики процесса адсорбции в изученных условиях является диффузия внутри гранул сорбента, то есть процесс адсорбции реализуется в условиях «гелевой» кинетики и скорость адсорбции тормозится внутридиффузионными процессами [27]. Функциональная оценка адсорбционного процесса может быть представлена изотермами мономолекулярной адсорбции, которые описываются классическим уравнением Ленгмюра [25]. Полученные изотермы адсорбции ионов никеля (II) (рис. 2) можно отнести к изотермам мономолекулярной адсорбции. Анализ полученных данных показывает, что адсорбция ионов увеличивается с ростом температуры. При 298 К величина адсорбции ионов никеля (II) составила 0,17 ммоль/л (9,9 мг/г), а при 338 К – 0,25 ммоль/л (14,7 мг/г). Известно, что процесс адсорбции является экзотермическим [28].

Рост величины адсорбции с ростом температуры, можно объяснить активированной адсорбцией ионов никеля (II). Обработка экспе-

риментальных данных с помощью уравнения Лэнгмюра, преобразованного к линейной форме: $1/A = 1/A_{\infty} + 1/A_{\infty} K C_{равн}$, позволила определить по величине отрезка прямой, пе-

ресекающей с осью ординат, предельную величину адсорбции A_{∞} и константу адсорбционного равновесия K , по тангенсу угла наклона прямой (табл. 2)

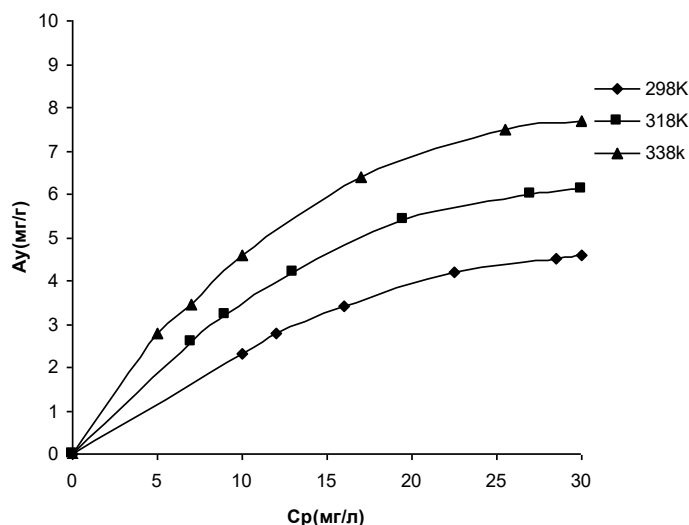


Рис. 2. Изотермы адсорбции ионов никеля (II) на углеродном сорбенте
Fig. 2. Isotherms of sorption of nickel (II) ions on carbon sorbent

Таблица 2. Термодинамические параметры адсорбции ионов никеля (II) на углеродном сорбенте
Table 2. Thermodynamic parameters of adsorption of nickel (II) ions on a carbon sorbent

T, K	$A_{\infty}, \text{ммоль/г}$	$A_{\infty}, \text{мг/г}$	K	$\Delta G^0, \text{кДж/моль}$	R^2
298	0,17	9,9	1770	-8,0	0,990
318	0,22	12,9	2054	-8,7	0,991
338	0,25	14,7	2672	-9,6	0,986

Энергию Гиббса рассчитывали по формуле $\Delta G = -RT \ln K$, где ΔG – энергия Гиббса; R – универсальная газовая постоянная 8,314 Дж/(моль×К); T – температура реакционной среды; K – константа равновесия. Значение энергии Гиббса при 298 К равно -23,7 кДж/моль указывает на самопроизвольный характер адсорбции. Наиболее вероятно, что адсорбционная способность амфотерного углеродного сорбента, использованного в работе, объясняется тем, что на поверхности пор присутствуют активные центры, определяющие его катионообменные свойства [29]. Извлечение ионов никеля (II) из раствора протекает предпочтительно по ионообменному типу с обменом ионов металла из раствора на протоны в твердой фазе сорбента, о чем свидетельствует понижение равновесного значения pH от 9,8 до 9,5. Также было установлено, что десорбция и регенерация углеродного сорбента возможна разбавленными растворами серной кислоты [30]. Получаемый в результате комбинированной электрофлотационной и углеадсорбционной очистки раствор пригоден для работы в замкнутой системе водоснабжения промышленных предприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комбинированная технология очистки техногенных водных растворов от ионов никеля (II) основана на применении электрогенерируемого гидроксида алюминия, имеющего аморфную пористую структуру гидрогеля с развитой сорбирующей поверхностью. Активный гидроксид алюминия обладает мицелярным строением и может быть представлен коллоидной частицей: $\{[m \text{ Al(OH)}_3] n \text{ Al(OH)}_2^+ (n-x) \text{ OH}\}^{x+} x \text{ OH}^-$. Процесс очистки связан с явлением сорбции загрязняющего иона на поверхности сорбента за счет дисперсионного взаимодействия. Предельная величина адсорбции никеля при 298 К и pH 7,6 составила 8,3 ммоль/г.

Расход количества электричества соответствовал 9,5 А·ч при оптимальном времени электрокоагуляции 10 мин и плотности тока 1,6 мА/см². Эффективность очистки загрязненных водных растворов при электрокоагуляционной обработке составляет 86 %. Дочистка водных растворов с использованием углеродных сорбентов выполняется в слабокислой среде при pH 9,8. Величина сорбции никеля достигает 0,25 ммоль/г. Особенностью

комбинированной технологии извлечения никеля из водных растворов является возможность избежать вторичного загрязнения очищаемых водных растворов вносимыми реген-

тами. При электрохимической обработке производится очистка и обеззараживание воды, одновременно улучшаются ее органолептические показатели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Антропогенные воздействия на мировые водные ресурсы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 67–79. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-67-79>. EDN: BELBFC.
2. Akbal F., Camci S. Copper, Chromium and Nickel Removal from Metal Plating Wastewater By Electrocoagulation // Desalination. 2011. Vol. 269. P. 214–222. <http://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.001>.
3. Li Chen, Mingxi Zhou, Jingzhe Wang, Zhiqin Zhang, Chengjiao Duan, Xiangxiang Wang et al. A Global Meta-Analysis of Heavy Metal(Loid)S Pollution in Soils Near Copper Mines: Evaluation Of Pollution Level And Probabilistic Health Risks // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 835. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155441>.
4. Чугунов А.Д., Филатова Е.Г. Тяжелые металлы: химические вопросы экологической безопасности. Монография. Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2024. 180 с. EDN: APQDGW.
5. Гайдукова А.М., Колесников В.А., Похвалитова А.А. Очистка сточных вод гальванического производства от ионов металлов с применением сорбции в статическом режиме и электрофлотации // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 160–166. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-160-166>. EDN: EMPPDT.
6. Akbarpour M.R., Gharibi Asl F., Rashedi H. Anti-corrosion and Microstructural Properties of Nanostructured Ni-Co Coating Prepared by Pulse-Reverse Electrochemical Deposition Method // Journal of Materials Engineering and Performance. 2024. Vol. 33. P. 94–101. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-07969-4>.
7. Keshtkar Z., Tamjidi S., Vaferi B. Intensifying Nickel (II) Uptake from Wastewater Using the Synthesized γ -Alumina: An Experimental Investigation of the Effect of Nano-Adsorbent Properties and Operating Conditions // Environmental Technology & Innovation. 2021. Vol. 22. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101439>.
8. Bilal M., Ihsanullah I., Younas M., Ul Hassan Shah M. Recent Advances in Applications of Low-Cost Adsorbents for the Removal of Heavy Metals from Water: A Critical Review // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 278. P. 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119510>.
9. Mohammadpour Z., Zare H.R. Improving the Corrosion Resistance of the Nickel–Tungsten Alloy by Optimization of the Electroplating Conditions // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2020. Vol. 73. P. 937–944. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-01894-z>.
10. Xinping He, Bing Yao, Yang Xia, Hui Huang, Yongping Gan, Wenkui Zhang Coal Fly Ash Derived Zeolite for Highly Efficient Removal of Ni^{2+} Inwaste Water // Powder Technology. 2020. Vol. 367. P. 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.037>.
11. Смирнов А.В., Смирнов В.Н., Смирнов К.В. Очистка шахтных вод с использованием природных сорбентов в условиях стационарных очистных сооружений предприятий металлургии // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2. С. 62–76. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/62-76>. EDN: CAQCFC.
12. Kruszelnicka I., Ginter-Kramarczyk D., Gora W., Staszak K., Baraniak M., Lota G. et al. Removal of Nickel(II) from Industrial Wastewater Using Selected Methods: A Review // Chemical and Process Engineering. 2022. Vol. 43. Iss. 4. P. 437–448. <https://doi.org/10.24425/cpe.2022.142284>.
13. Виноградов С.С. Экологически безопасное гальваническое производство. М.: Глобус, 2002. 352 с.
14. Kumara A., Baloucha A., Pathanb A.A., Abdullaha, Jagirania M.S., Ali Muhammad Mahar et al. Remediation of Nickel Ion from Wastewater by Applying Various Techniques: A Review // Acta Chemica Malaysia. 2019. Vol. 3. Iss. 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.2478/acmy-2019-0001>.
15. Домрачева В.А., Васильковская Д.В. Обоснование ферментно-кавитационной обработки осадка сточных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 114–122. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-114-122>. EDN: UPZYBG.
16. Ястребов К.Л., Дружинина Т.Я., Надршин В.В., Карлина А.И. Подготовка и очистка природных и сточных вод. Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2014. 564 с. EDN: TJNFUX.
17. Серпокpылов Н.С., Вильсон Е.В., Гетманцев С.В., Марочкин А.А. Экология очистки сточных вод физико-химическими методами. М.: Ассоциация строительных вузов, 2009. 261 с. EDN: QNOEEN.
18. Веденяпина М.Д., Курмышева А.Ю., Кулайшин С.А., Кряжев Ю.Г. Адсорбция некоторых тяжелых металлов на активированных углях (обзор) // Химия твердого топлива. 2021. № 2. С. 18–41. <https://doi.org/10.31857/S0023117721020092>. EDN: UOOLVP.

19. Филатова Е.Г., Дударев В.И. Оптимизация электрокоагуляционной очистки сточных вод гальванических производств. Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2013. 140 с. EDN: TJNHKV.
20. Лурье Ю.Ю., Рыбникова А.И. Химический анализ производственных сточных вод. М.: Химия, 1974. 336 с.
21. Дударев В.И., Филатова Е.Г. Углеродные адсорбенты на основе природных углей для извлечения металлов из растворов // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35. № 13. С. 28–30. EDN: OOVWUJ.
22. De Gisi S., Lofrano G., Grassi M., Notarnicola M. Characteristics and Adsorption Capacities of Low-Cost Sorbents for Wastewater Treatment: A Review // Sustainable Materials and Technologies. 2016. Vol. 9. P. 10–40. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.06.002>.
23. Браяловский Г.Б., Никифоров А.Ф., Насчетникова О.Б., Мигалатий Е.В. Экология водных систем: применение ингибиторов коррозии для очистки сточных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 114–123. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_3_8. EDN: BMFUGK.
24. Dudarev V.I., Filatova E.G. A Study of the Adsorption of Toxic Ions by Electrogenated Gibbsite // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2021. Vol. 57. P. 283–288. <https://doi.org/10.1134/S2070205121020052>.
25. Дударева Г.Н., Иринчинова Н.В., Дударев В.И. Адсорбционное извлечение никеля (II) из водных растворов техногенного характера // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10. № 1. С. 133–139. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-133-139>. EDN: AFTXBO.
26. Фомкин А.А. Синтез, свойства и применение углеродных адсорбентов. М.: Граница, 2021. 312 с.
27. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. СПб.: Химия, 1982. 168 с.
28. Цивадзе А.Ю., Русанов А.И., Фомкин А.А. Физическая химия адсорбционных явлений. М.: Граница, 2011. 301 с.
29. Тимощук И.В., Горелкина А.К., Иванова Л.А. К вопросу о возможности использования адсорбции при очистке карьерных сточных вод // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2021. № 3. С. 59–63. EDN: BCZQVT.
30. Леонов С.Б., Елшин В.В. Дударев В.И., Рандин О.И., Оздобихин Л.М., Домрачева В.А. Углеродные сорбенты на основе ископаемых углей. Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2000. 268 с. EDN: TZLQAD.

REFERENCES

1. Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Zaitseva I.S. Anthropogenic Impacts on Global Water Resources. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024;2:67-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-67-79>. EDN: BELBFC.
2. Akbal F., Camci S. Copper, Chromium and Nickel Removal from Metal Plating Wastewater by Electrocoagulation. *Desalination*. 2011;269:214-222. <http://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.001>.
3. Li Chen, Mingxi Zhou, Jingzhe Wang, Zhiqin Zhang, Chengjiao Duan, Xiangxiang Wang et al. A Global Meta-Analysis of Heavy Metal(Loid)S Pollution in Soils Near Copper Mines: Evaluation Of Pollution Level And Probabilistic Health Risks. *Science of The Total Environment*. 2022;835:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155441>.
4. Chugunov A.D., Filatova E.G. *Heavy Metals: Chemical Issues of Environmental Safety. Monograph*. Irkutsk: Publishing house of Irkutsk National Research Technical University, 2024. 180 p. (In Russ.). EDN: APQDGW.
5. Gaydukova A.M., Kolesnikov V.A., Pokhvalitova A.A. Treatment of Electroplating Wastewater From Metal Ions with the Use of Sorption in Static Mode and Electroflotation. *Theoretical and Applied Ecology*. 2021;4:160-166. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-160-166>. EDN: EMPPDT.
6. Akbarpour M.R., Gharibi Asl F., Rashedi H. Anti-corrosion and Microstructural Properties of Nanostructured Ni-Co Coating Prepared by Pulse-Reverse Electrochemical Deposition Method. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2024;33:94-101. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-07969-4>.
7. Keshtkar Z., Tamjidi S., Vaferi B. Intensifying Nickel (II) Uptake from Wastewater Using the Synthesized γ -Alumina: An Experimental Investigation of the Effect of Nano-Adsorbent Properties and Operating Conditions. *Environmental Technology & Innovation*. 2021;22:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101439>.
8. Bilal M., Ihsanullah I., Younas M., Ul Hassan Shah M. Recent Advances in Applications of Low-Cost Adsorbents for the Removal of Heavy Metals from Water: A Critical Review. *Separation and Purification Technology*. 2021;278:1-28. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119510>.

9. Mohammadpour Z., Zare H.R. Improving the Corrosion Resistance of the Nickel–Tungsten Alloy by Optimization of the Electroplating Conditions. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2020;73:937-944. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-01894-z>.
10. Xinping He, Bing Yao, Yang Xia, Hui Huang, Yongping Gan, Wenkui Zhang Coal Fly Ash Derived Zeolite for Highly Efficient Removal of Ni²⁺ Inwaste Water. *Powder Technology*. 2020;367:40-46. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.037>.
11. Smirnov A.V., Smirnov V.N., Smirnov K.V. Purification of Mine Wastewater Using Natural Sorbents in the Conditions of Stationary Treatment Facilities of Metallurgy Enterprises. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2024;2:62-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/62-76>. EDN: CAQCFK.
12. Kruszelnicka I., Ginter-Kramarczyk D., Gora W., Staszak K., Baraniak M., Lota G. et al. Removal of Nickel(II) from Industrial Wastewater Using Selected Methods: A Review. *Chemical and Process Engineering*. 2022;43(4):437-448. <https://doi.org/10.24425/cpe.2022.142284>.
13. Vinogradov S.S. *Environmentally Safe Galvanic Production*. Moscow: Globus, 2002. 352 p. (In Russ.).
14. Kumara A., Baloucha A., Pathanb A.A., Abdullaha, Jagirania M.S., Mahar A.M. et al. Remediation of Nickel Ion from Wastewater by Applying Various Techniques: A Review. *Acta Chemica Malaysia*. 2019;3(1):1-16. <https://doi.org/10.2478/acmy-2019-0001>.
15. Domracheva V.A., Vasilkovskaya D.V. Rationale for Enzymatic Cavitation Treatment of Sewage Sludge. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024;3:114-122. (In Russ.). <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-114-122>. EDN: UPZYBG.
16. Yastrebov K.L., Druzhinina T.Ya., Nadrshin V.V., Karlina A.I. *Preparation and Purification of Natural and Waste Water*. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk National Research Technical University, 2014. 564 p. (In Russ.). EDN: TJNFUX.
17. Serpokyrov N.S., Vilson E.V., Getmantsev S.V., Marochkin A.A. *Ecology of Wastewater Treatment by Physical and Chemical Methods*. Moscow: Association of Construction Universities, 2009. 261 p. (In Russ.). EDN: QNOEEN.
18. Vedenyapina M.D., Kurmysheva A.Y., Kulaishin S.A., Kryazhev Y.G. Adsorption of Heavy Metals on Activated Carbons (A Review). *Solid Fuel Chemistry*. 2021;2:18-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0023117721020092>. EDN: UOOLVP.
19. Filatova E.G., Dudarev V.I. *Optimization of Electrocoagulation Treatment of Wastewater from Galvanic Industries*. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk National Research Technical University, 2013. 140 p. (In Russ.). EDN: TJNHKV.
20. Lure Yu.Yu., Rybnikova A.I. *Chemical Analysis of Industrial Wastewater*. Moscow: Chemistry, 1974. 336 p. (In Russ.).
21. Dudarev V.I., Filatova E.G. Carbone Adsorbentbased on Natural Coals For the Extraction of Metals from Solutions. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2021;35(13):28-30. (In Russ.). EDN: OOVWUJ.
22. De Gisi S., Lofrano G., Grassi M., Notarnicola M. Characteristics and Adsorption Capacities of Low-Cost Sorbents for Wastewater Treatment: A Review. *Sustainable Materials and Technologies*. 2016;9:10-40. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.06.002>.
23. Brayalovskiy G.B., Naschetnikova O.B., Nikiforov A.F., Migalatiy E.V. Ecology of Aquatic Systems: Application of Corrosion Inhibitors for Waste Water Treatment. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023;3:114-123. (In Russ.). https://doi.org/10.35567/19994508_2023_3_8. EDN: BMFUGK.
24. Dudarev V.I., Filatova E.G. A Study of the Adsorption of Toxic Ions by Electrogenerated Gibbsite. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2021;57:283-288. <https://doi.org/10.1134/S2070205121020052>.
25. Dudareva G.N., Irinchinova N.V., Dudarev V.I. Adsorption Extraction of Nickel (II) From Industrial Aqueous Solutions. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(1):133-139. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-133-139>. EDN: AFTXBO.
26. Fomkin A.A. *Synthesis, Properties and Application of Carbon Adsorbents*. Moscow: Granitsa, 2021. 312 p. (In Russ.).
27. Smirnov A.D. *Sorption Purification of Water*. Saint Petersburg: Chemistry, 1982. 168 p. (In Russ.).
28. Tsivadze A.Yu., Rusanov A.I., Fomkin A.A. *Physical Chemistry of Adsorption Phenomena*. Moscow: Granitsa, 2011. 301 p. (In Russ.).
29. Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K., Ivanova L.A., Prosekov A.Yu., Latokhin V.A. On The Issue of Possibility to Use Adsorption While the Open-Cast Mine Wastewater Treatment. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti*. 2021;3:59-63. (In Russ.). EDN: BCZQVT.
30. Leonov S.B., Elshin V.V. Dudarev V.I., Randin O.I., Oznobikhin L.M., Domracheva V.A. *Carbon Sorbents Based on Fossil Coals*. Irkutsk: Publishing house of Irkutsk National Research Technical University, 2000. 268 p. (In Russ.). EDN: TZLQAD.

Информация об авторах

Иринчинова Надежда Владимировна,
Заведующий учебными лабораториями,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: irnavl@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-9575-430X>
Author ID: 858400

Филатова Елена Геннадьевна,
к.т.н, доцент, доцент кафедры химии
и биотехнологии им. В.В. Тугуриной,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: efila@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8704-7455>
Author ID: 461353

Дударев Владимир Иванович,
д.т.н, профессор, профессор кафедры химии
и биотехнологии им. В.В. Тугуриной,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉e-mail: vdudarev@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-6477-4422>
Author ID: 676659

Кульков Виктор Николаевич,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры инженерных коммуникаций
и систем жизнеобеспечения,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: kulkof.viktor@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3838-0777>
Author ID: 730720

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 30.04.2025.
Одобрена после рецензирования 12.05.2025.
Принята к публикации 14.05.2025.

Information about the authors

Nadezhda V. Irinchinova,
Head of Educational Laboratories,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: irnavl@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-9575-430X>
Author ID: 858400

Elena G. Filatova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Chemistry and Biotechnology named
after V.V. Tugurina,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: efila@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8704-7455>
Author ID: 461353

Vladimir I. Dudarev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Chemistry
and Biotechnology named after V.V. Tugurina,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉e-mail: vdudarev@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-6477-4422>
Author ID: 676659

Victor N. Kulkov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Engineering
Communications and Life Support Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: kulkof.viktor@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3838-0777>
Author ID: 730720

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 30.04.2025.
Approved after reviewing 12.05.2025.
Accepted for publication 14.05.2025.



Сравнительный анализ эффективности способов оценки выполненных строительных работ по облаку точек

Н.С. Исупов^{1✉}, Н.И. Фомин²

^{1,2}Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Масштабное использование цифровых возможностей технологии лазерного сканирования на этапах жизненного цикла строительного объекта ограничено рядом причин, среди которых можно отметить дефицит технологичных способов обработки результатов лазерного сканирования с последующей трансформацией полученного облака точек в цифровую исполнительную модель. В статье рассмотрен зарубежный и отечественный опыт практического использования облаков точек на этапе возведения строительного объекта, с возможностью верификации объемов выполненных работ на основе цифровой информационной модели. По результатам сравнительного анализа на примере несущего остова здания, выполненного в исполнительной и проектной информационных моделях, был выявлен общий недостаток известных методов для создания и определения на основе облаков точек объемов выполненных работ. В статье предлагается решение, устраняющее обнаруженный недостаток. Показаны преимущества предложенного способа, по сравнению с известными, на примере определения объема монолитной железобетонной стены гражданского здания. Выявлено расхождение в оценке выполненных объемов конструкции, полученных с использованием различных способов. Предложенный способ подсчета объемов по облаку точек позволяет повысить прозрачность управления на этапах жизненного цикла строительного объекта, обеспечивает более рациональное распределение материальных и трудовых ресурсов, повышает качество строительного контроля, а также достоверность исполнительной документации.

Ключевые слова: способ оценки, лазерное сканирование, облако точек, исполнительная цифровая модель, фактический объем работ, тесселяционная сеть

Для цитирования: Исупов Н.С., Фомин Н.И. Сравнительный анализ эффективности способов оценки выполненных строительных работ по облаку точек // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 442–453. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-442-453>. EDN: KYBLKH.

Original article

Comparative analysis of the effectiveness of methods for evaluating completed construction work using a point cloud

Nikita S. Isupov^{1✉}, Nikita I. Fomin²

^{1,2}Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The large-scale use of digital capabilities of laser scanning technology at the stages of the life cycle of a construction facility is limited by a number of reasons, among which it is possible to note the lack of technological methods for processing laser scanning results with the subsequent transformation of the resulting point cloud into a digital executive model. The article considers the foreign and domestic experience of practical use of point clouds at the stage of construction of a construction object, with the possibility of verifying the volume of completed work based on a digital information model. Based on the results of a comparative analysis using the example of the load-bearing skeleton of a building made in the executive and design information models, a general disadvantage of known meth-

ods for creating and determining the volume of work performed based on point clouds was identified. The article proposes a solution that eliminates the discovered flaw. The advantages of the proposed method are shown, in comparison with the known ones, using the example of determining the volume of a monolithic reinforced concrete wall of a civil building. A discrepancy was revealed in the assessment of the completed volumes of the structure obtained using various methods. The proposed method of calculating volumes using a point cloud makes it possible to increase the transparency of management at the stages of the life cycle of a construction facility, ensures a more rational distribution of material and labor resources, improves the quality of construction control, as well as the reliability of executive documentation.

Keywords: assessment method, laser scanning, building structure, point cloud, as-built digital model, actual scope of work, tessellation network

For citation: Isupov N.I., Fomin N.I. Comparative analysis of the effectiveness of methods for evaluating completed construction work using a point cloud. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):442-453. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-442-453>. EDN: KYBLKH.

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы наблюдается устойчивый рост востребованности технологии лазерного сканирования на этапах жизненного цикла строительного объекта. Эта тенденция, с некоторыми особенностями, также проявляется на этапе строительства. Востребованность лазерного сканирования при производстве строительно-монтажных работ обусловлена двумя причинами.

Во-первых, исполнительные геодезические схемы, составленные с использованием традиционного геодезического оборудования (тахеометры и т. п.), не позволяют в полной мере оценить фактические планово-высотные отклонения строительных конструкций. Так, на практике инженер строительного контроля или геодезист при приемке вертикальной конструкции (стена или колонна), руководствуясь нормативами, снимает показания по четырем контрольным точкам. Отклонения данных точек (по две в верхнем и нижнем сечении конструкции) от проектного положения будут зафиксированы в соответствующей исполнительной геодезической схеме. Наши наблюдения показали, что случаи, когда отклонения контролируемых точек конструкции находятся в нормативном допуске, а участок конструкции между ними имеет сверхнормативное выпучивание или вогнутость, не являются редкими. Таким образом, при формальном удовлетворительном положении, ответственная вертикальная конструкция может иметь сверхнормативные геометрические отклонения.

Во-вторых, значительные ресурсы подрядчиков и заказчиков расходуются на оценку фактически выполненных объемов, необходимых для обеспечения выполнения различных производственных планов и графиков,

заключения договоров с подрядными организациями и т. п. Сравнительный анализ облака точек («оболочки» фактически реализованной конструкции) и проектной информационной модели (идеализированной конструкции), содержащей плановые объемы работ, позволяет не только оценить расхождение объемов, что особенно важно для современных тенденций снижения издержек на строительной площадке, но и выявить различные построечные дефекты.

Анализ мирового опыта применения технологии лазерного сканирования в строительстве выявил следующие тенденции. Чаще всего эту технологию применяют при реинжиниринге строительных объектов, особенно в случае потери проектной и исполнительной документации, при техническом обследовании объектов, для выявления и оценки дефектов конструкций и материалов, а также для определения фактических планово-высотных отклонений конструкций [1–7].

Так, группа исследователей из университетов Иордании предложила создать по облаку точек тесселяционную (TIN) поверхность для возможности виртуальной реконструкции и мониторинга состояния конструкций объектов культурного наследия [8]. Ученые из Италии конвертировали сетку, сформированную на основе облака точек конструкций крепостного сооружения, в конечно-элементную модель для расчета конструкций при обследовании объекта исторического наследия после землетрясения [9]. Аналогичное исследование было проведено учеными из Китая и Канады. На основе полученного облака точек была создана твердотельная геометрия и конечно-элементная модель для поверочных расчетов 30-ти метровой деревянной скульптуры с уче-

том формы бревен [10].

Исследователи и специалисты в разных странах занимаются разработкой различных программных инструментов для более результативного использования облака точек, полученного в результате лазерного сканирования строительного объекта.

Например, исследователи из Испании разработали плагин на языке C#, который на основе облака точек позволяет сформировать информационную модель строительных конструкций в формате *ifc*, которую можно технологично конвертировать в расчетный комплекс [11]. К аналогичному результату пришли ученые из Великобритании. Используя метод Scan-to-BIM-to-Sim и скрипты Python, на основе облака точек они создали цифровую информационную модель с учетом деформаций мостового сооружения, а затем экспортировали ее в расчетный комплекс для мониторинга конструкций [12].

Стоит упомянуть также исследователей из США, которые на основе нейронных сетей предложили способ распознавания объемных элементов в облаке точек с учетом их деформированного состояния. Он позволяет идентифицировать информацию о местности в ходе поисково-спасательных операций после стихийных бедствий [13].

Некоторые особенности практического применения результатов лазерного сканирования строительных объектов не получили надежных инструментов для их автоматического анализа. Например, остаются нерешенными вопросы с автоматической сегментацией облака точек, которые часто выполняется вручную, снижая тем самым эффективность применения технологии [14].

Согласно стратегии развития строительной отрасли до 2030 г., цифровая зрелость отрасли находится еще на недостаточном уровне¹.

К аналогичному выводу пришел ряд отечественных исследователей. Так, накопленный отечественный опыт лазерного сканирования позволил выявить следующие проблемы, препятствующие масштабному применению данной технологии:

- недостаточное количество исследований, отсутствие надежных методик работ с облаком точек, а также нормативного обеспечения применения технологии лазерного сканирования в строительной практике [15];
- узконаправленный результат применения технологии, который ограничивается со-

зданием облака точек и полигональной модели для визуализации;

- слабый функционал существующего программного обеспечения (включая отсутствие универсальных отечественных программ по работе с облаками точек) для передачи всех несовершенств геометрии по облаку точек [16].

Вместе с отмеченными недостатками технология лазерного сканирования обладает важным преимуществом для применения на строительной площадке – на практике сложнее сфальсифицировать облако точек, по сравнению, например, с исполнительной геодезической схемой. Таким образом, оценка фактически выполненных работ, основанная на использовании облака точек, обладает значительным потенциалом для повышения качества и прозрачности контроля строительных процессов [17].

В настоящее время облака точек активно применяют на строительных площадках для оценки объемов земляных сооружений (насыпи и выемки сложной формы), путем создания TIN сети и измерения объема полученной модели сооружения относительно плоскости с заданной отметкой [18, 19].

Иная ситуация сложилась при оценке фактического объема выполненных (смонтированных) на строительной площадке конструкций, имеющих замкнутый контур, например, монолитных железобетонных стен, пилонов и колонн. Применить способ с созданием TIN сети для таких объектов не получится, т. к. выполненная на площадке конструкция, имеющая собственные отклонения и дефекты, не позволит сформировать ровную (реперную) плоскость относительно которой возможно определить объем.

Таким образом, технологии, связанные с использованием на основе лазерного сканирования облака точек, находят практическое применение на этапах жизненного цикла строительного объекта. При выполнении облака точек объекта на этапе строительства в разных организациях идут попытки сформировать исполнительную информационную модель строительного объекта (ИИМ), которые имеют следующий недостаток – полученная модель никак не связана с облаком точек и в точности не отражает результат работы лазерного сканера, т. к. пользователь вручную приводит в соответствие расположение элементов в плане, высотные отметки, толщину, расположение проемов, уклоны таким обра-

¹Правительство Российской Федерации. Распоряжение от 31 октября 2022 г. № 3268-р. М.

зом, чтобы все поверхности элементов модели точно совпадали с поверхностями, образованными облаками точек.

Цель данной работы заключается в сравнительном анализе существующих способов оценки выполненных работ на основе облака точек и разработке усовершенствованного способа создания поверхности объемного элемента на этапе строительства (*as-built*) для определения объемов строительно-монтажных работ. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выполнен анализ существующих способов определения объема работ по облаку точек (на примере монолитных конструкций);

- разработан усовершенствованный способ определения объемов работ (на примере монолитных конструкций) с использованием отечественного программного комплекса;

- определено расхождение результатов оценки объема конструкции (на примере монолитной железобетонной стены), полученных с использованием различных способов.

МЕТОДЫ

В настоящее время создание ИИМ с последующей выгрузкой фактических объемов элементов модели реализуется в формате пилотного проекта, результаты которого планируется использовать на следующих этапах жизненного цикла. Блок-схема данного процесса представлена на рис. 1.

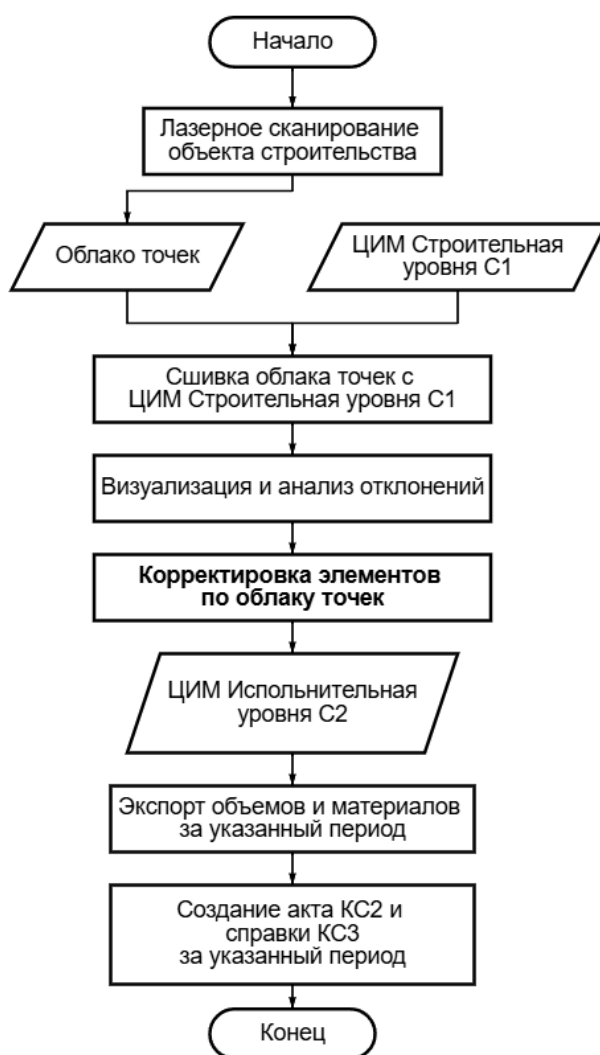


Рис. 1. Блок-схема создания исполнительной информационной модели с выгрузкой фактических объемов элементов модели для формирования исполнительной документации: ЦИМ – цифровая информационная модель; КС2 – акт приема выполненных работ; КС3 – справка о стоимости выполненных работ

Fig. 1. Flowchart for creating an executive information model with uploading the actual volumes of model elements for the generation of as-built documentation: DIM – digital information model; KS2 – acceptance certificate for work performed; KS3 – certificate of cost of work performed

Выделенный в блок-схеме процесс – корректировка элементов по облаку точек – является предметом настоящего исследования. Накопленный опыт применения облаков точек в строительстве показывает, что возможности применения таких массивов используются достаточно фрагментарно. Например, в большинстве случаев применение облаков точек сводится к формированию цветных схем геометрических отклонений конструкций.

Согласно положениям нормативной документации, для ИИМ уровня проработки С2 присваивается LOD 500, который подразумевает, что в элементы ЦИМ должна быть внесена информация об отклонении конструкций от проектного положения².

На практике, ввиду отсутствия однозначных требований пользователей к модели, до настоящего времени не сформировался единый методический подход к обеспечению данного результата. Нередко при реализации инвестиционно-строительных проектов формирование ЦИМ завершается уже на этапе проектирования, без корректировки на последующих этапах жизненного цикла. В других слу-

чаях к элементам ЦИМ на этапе строительства привязывают файлы исполнительной документации, преследуя цели сформировать некое подобие ИИМ. В наиболее прогрессивных организациях на этапе строительства ЦИМ корректируют по результатам лазерного сканирования. Данные корректировки (изменение толщины, высотные отметки, уклоны и т. п.) вносятся в модель вручную, для максимального соответствия поверхностей элементов модели облаку точек, таким образом формируется ИИМ. Следует отметить, что все вышеперечисленные способы создания ИИМ не обладают высокой точностью.

В данном исследовании облако точек применялось для оценки объема фактически выполненных строительных конструкций. В качестве исходных данных были изучены облако точек вертикальных несущих монолитных конструкций типового этажа строящегося жилого здания в г. Екатеринбурге (результаты лазерного сканирования предоставила специализированная подрядная организация) и ИИМ, полученная от проектной организации. Схема станций сканирования представлена на рис. 2.

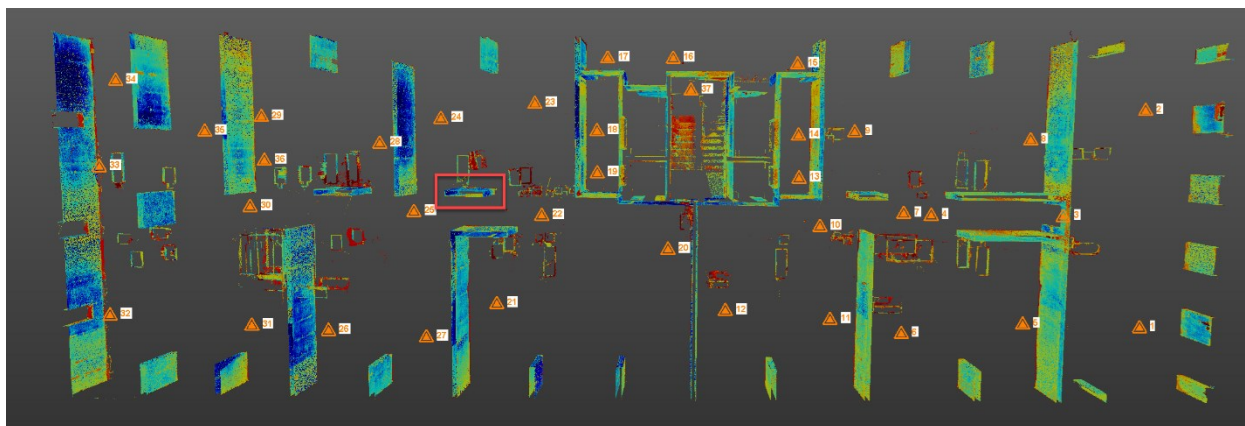


Рис. 2. Облако точек вертикальных несущих монолитных конструкций типового этажа (красным выделена исследуемая стена)

Fig. 2. Point cloud of vertical load-bearing monolithic structures of a typical floor (the wall under study is highlighted in red)

Для определения объема монолитной железобетонной стены (создания ИИМ) были применены на практике три способа оценки объемов конструкций по облаку точек и авторский способ.

Способ 1. Получение объемов бетона из проектной ЦИМ (вариант идеализированной ИИМ). Особенности: данный способ не учитывает фактическую форму конструкции, выполненных в построечных условиях.

Способ 2. Редактирование элементов проектной ЦИМ по облаку точек. Самый распространенный способ формирования ИИМ. Особенности: данный способ не является точным, т. к. отражает приблизительную форму конструкции. Большую роль играет опыт пользователя, который будет изменять параметры элементов проектной ЦИМ для совмещения элементов модели с облаком точек.

Таким образом, пользователи с разной

²СП 333.1325800.2020 Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла.

квалификацией, вероятно, сформируют разные ИИМ.

Способ 3. Создание твердотельной геометрии путем «выдавливания» геометрии через вписанные в облако точек плоскости. Особенности: данный способ не является точным, при этом влияние человеческого фактора будет минимальным, т. к. основные операции по построению геометрии выполняются программой автоматически. Блок-схема операций представлена на рис. 3.

Способ 4 (авторский). Построение TIN сетки по облаку точек. Особенности: данный спо-

соб является самым точным, но трудоемким. Блок-схема операций представлена на рис. 3.

В качестве основного программного обеспечения, в котором была создана TIN сетка по облаку точек, применялась отечественная программа «Naposad облако точек 24.0».

В программе отсутствует функционал подсчета количественных характеристик конструкции (объем, площадь) для объемной геометрии, сформированной по облаку точек. Поэтому, для решения вышеуказанной проблемы, авторы экспортировали полученную геометрию в Blender 3.4.

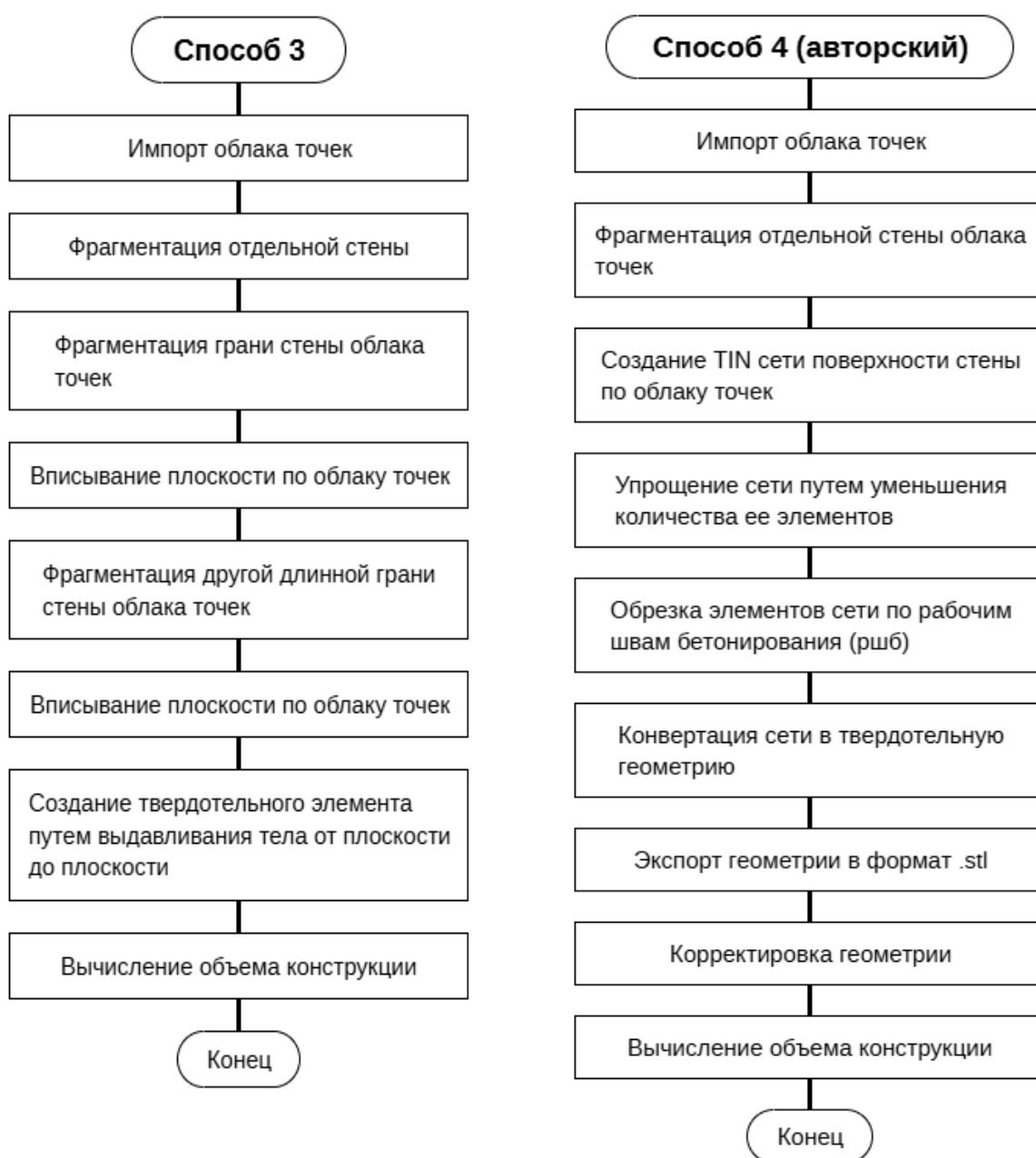


Рис. 3. Блок-схема реализации способов 3 и 4
Fig. 3. Block diagram of implementation of methods 3 and 4

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При оценке объема монолитной стены размерами 1650×250×2650 мм (полученный объем – 1,093 м³) за идеальный результат был принят проектный объем из ЦИМ.

В качестве информации об изменении элемента по облаку точек по способу 2 в ИИМ был оставлен пользовательский комментарий: «длина изменена с 1650 на 1670 мм, толщина

с 250 на 270 мм» (полученный объем – 1,195 м³). Результат анализа облака точек в ИИМ, полученный по способу 2, представлен на рис. 4. Значительное влияние на результат определения объемов работ по способу 3 оказывает очистка облака точек от шумов и последующей фрагментации стены для «выдавливания» геометрии. Результат полученный по способу 3 представлен на рис. 5.

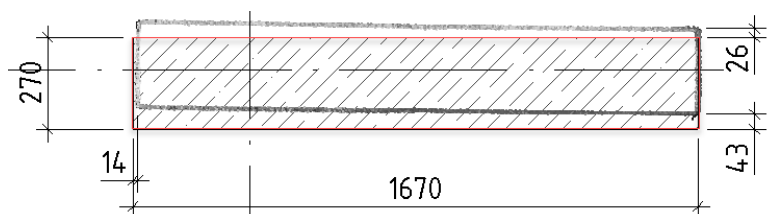


Рис. 4. Стена в измененной исполнительной информационной модели (красным выделены откорректированные грани стены, серым показано облако точек)

Fig. 4. Wall in the modified executive information model (the adjusted faces of the wall are highlighted in red, the cloud of points is shown in gray)

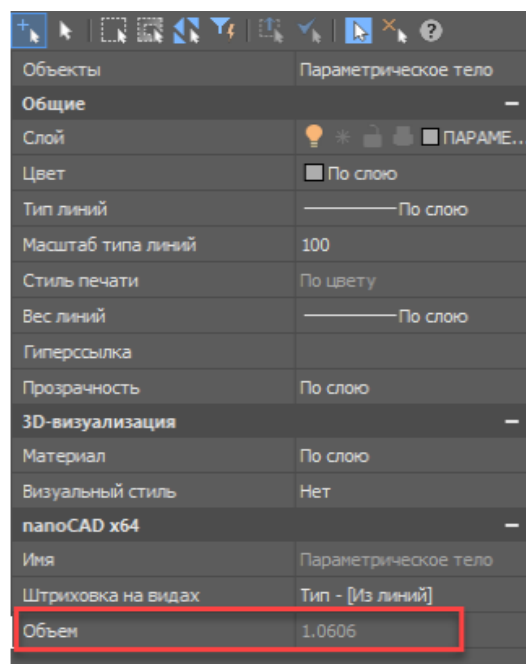


Рис. 5. Результат визуализации поверхности стены, полученный по способу 3

Fig. 5. The result of visualization of the wall surface obtained using method 3

На рис. 5 видно, как в верхнем углу стены сформировалась искаженная геометрия поверхности, которая не соответствует облаку точек (фактической геометрии).

Таким образом, для повышения качества формирования поверхности по критерию ее соответствия облаку точек необходимо более детально вычищать облако точек путем ручной обрезки облака точек от единичных, локальных точек, находящихся на удалении от основного массива точек конструкции.

Визуализация поверхности стены, сфор-

мированной в результате применения способа 4, показана на рис. 6.

Сравнивая между собой изображения поверхности стены на рис. 5 и 6 стоит отметить, что способ 4 позволяет получить более реальную поверхность конструкции, содержащую полости, каверны, местные неровности и т. п., которые образовались в результате нарушения технологии производства опалубочных и бетонных работ. Количественные значения объемов стены, определенные по всем способам, представлены в таблице.

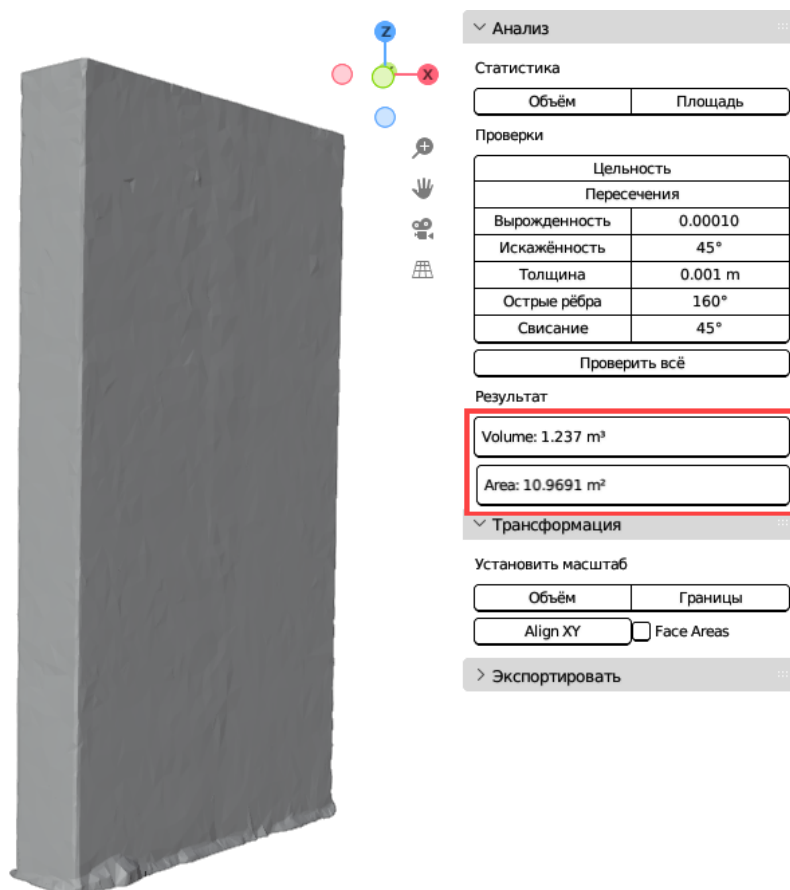


Рис. 6. Результирующая визуализация поверхности стены, сформированной по способу 4
Fig. 6. Resulting visualization of the wall surface formed using method 4

Количественные значения объемов стены, определенные по всем способам
Quantitative values of wall volumes determined by all methods

Порядковый номер способа	Объем монолитной железобетонной стены, определенный по данному способу, м³	Расхождение полученного результата, по сравнению с проектным значением объема стены в цифровой информационной модели, %
1	1,093	0
2	1,195	9,3
3	1,061	3,2
4	1,237	13,1

Из таблицы видно, что наибольшее отклонение от проектного значения объема было получено по авторскому способу 4. Отсюда можно сделать следующий вывод по выбору способа анализа облака точек – чем более точный результат оценки объема обеспечивает способ, тем большее отклонение от проектной величины будет получено в результате его применения.

Безусловно, технологию лазерного сканирования сложно назвать простым инструментом оценки качества выполнения работ, однако такая технология позволяет обеспечить до-

стоверность результатов контроля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа трех существующих способов подсчета объемов работ по облаку точек был выявлен один существенный недостаток – фактическая геометрия конструкции на строительной площадке не соответствует геометрии конструкции в информационной модели. Это может иметь негативное последствие, обусловленное возможностью использования некорректной информации для подтверждения в исполнительной документации выполненных работ.

Для устранения выявленного недостатка авторами предложен усовершенствованный способ подсчета объема работ (конструкции), основанный на создании TIN сетки по облаку точек и дальнейшем экспорте ее в твердотельную геометрию. Данный способ пока относительно трудоемкий, по сравнению с другими, из-за отсутствия необходимого функционала в отечественных программах, реализующих работу с облаком точек.

Вместе с этим, данный способ позволяет получить более реалистичную поверхность конструкции, содержащую технологические дефекты. Авторы надеются, что разработчики отечественных программных комплексов обратят внимание на данную проблему и функционально обеспечат возможность работы с результатом лазерного сканирования в едином цифровом пространстве для ускорения

процесса обработки облаков точек.

В результате моделирования (на примере монолитной железобетонной стены) представлены количественные результаты подсчета объема стены по каждому способу. Сравнение полученных значений объемов с проектной (идеальной) величиной позволило авторам сделать следующий вывод – чем более точный результат оценки объема обеспечивает способ, тем большее отклонение от проектной величины будет получено в результате его применения.

Авторы продолжают исследования по проблемам формирования ИИМ и эффективного использования данных моделей на этапах жизненного цикла строительного объекта. В следующей публикации запланировано структурировать проблемы, которые возникают при подсчете объемов работ по облаку точек.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bariczova G., Erdelyi J., Honti R., Tomek L. Wall Structure Geometry Verification Using TLS Data and BIM Model // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 24. P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/app112411804>.
2. Могучев С.Б. Строительный контроль с использованием облака точек и информационной модели здания // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 6. С. 580–589. EDN: AORUME.
3. Young-Jin Cha, Wooram Choi, Büyükoztürk O. Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2017. Vol. 32. Iss. 5. P. 361–378. <https://doi.org/10.1111/mice.12263>.
4. Гирия Л.В., Трофимов Г.П. Обследование памятников архитектуры с использованием современных технологий трехмерного сканирования // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. Т. 24. № 6. С. 35–43. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2022-24-6-35-43>. EDN: KYKCUL.
5. Молоков П.В. Создание трехмерных моделей объектов историко-культурного наследия с использованием наземного лазерного сканирования и аэрофотосъемки // *Экология. Экономика. Информатика*. Серия: геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2024. Т. 2. № 9. С. 55–63. <https://doi.org/10.23885/2500-123X-2024-2-9-55-63>. EDN: YBEUUA.
6. Sharif M., Rausch C., Ndiongue S., Haas C., Walbridge S. Using 3D Scanning for Accurate Estimation of Termination Points for Dimensional Quality Assurance in Pipe Spool Fabrication // *International Journal of Industrialized Construction*. 2021. Vol. 2. Iss. 1. P. 54–69. <https://doi.org/10.29173/ijic253>.
7. Курбанов О.А. Оценка перспектив применения наземного 3D-лазерного сканирования при строительно-монтажных работах нежилых зданий // *Интернаука*. 2024. № 20-1. С. 17–23. EDN: IDKEQL.
8. Al-Fugara A., Al-Adamat R., Al Haddad M., Al-Shawabkeh Y., El-Khalili M., Obaidat D. Using of Laser Scanning and Dense Stereo Matching for 3D Documentation and Virtual Reconstruction of the Ancient Sama Monastery/Jordan // *International Journal of Remote Sensing Applications*. 2016. Vol. 6. P. 19–29. <https://doi.org/10.14355/ijrsa.2016.06.003>.
9. Castellazi G., D'Altri A.M., Bitelli G., Selvaggi I., Lambertini A. From Laser Scanning to Finite Element Analysis of Complex Buildings by Using a Semi-Automatic Procedure // *Sensors*. 2015. Vol. 15. Iss. 8. P. 18360–18380. <https://doi.org/10.3390/s150818360>.
10. Fan Xie, Xiao Pan, Yang T.Y., Ernewein B., Minghao Li, Robinson D. A Novel Computer Vision and Point Cloud-Based Approach for Accurate Structural Analysis of a Tall Irregular Timber Structure // *Structures*. 2024. Vol. 70. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107697>.
11. Justo A., Lamas D., Sanchez-Rodriguez A., Soilan M., Riveiro B. Generating IFC-Compliant Models and Structural Graphs of Truss Bridges from Dense Point Clouds // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 149. P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104786>.
12. Yunping Fang, Mitoulis S.-A., Boddice D., Jialiang Yu, Ninic J. Scan-To-BIM-To-Sim: Automated Reconstruction of Digital and Simulation Models from Point Clouds with Applications On Bridges // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 25. P. 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104289>.
13. Jingdao Chen, Yong K. Cho, Jun Ueda Sampled-Point Network for Classification of Deformed Building Element Point Clouds // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2018. P. 2164–

2169. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8461095>.

14. Jingdao Chen, Yong K. Cho Point-to-point Comparison Method for Automated Scan-vs-BIM Deviation Detection // Proceedings of 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. 2018. P. 1–9.

15. Богданов А.Н., Алешутин И.А. Наземное лазерное сканирование в строительстве и BIM-технологиях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 4. С. 326–332. EDN: VQTQVG.

16. Вареник К.А., Вареник А.С., Храмов Д.Д., Чамеев А.С. Создание цифровой информационной модели Георгиевского собора Юрьева монастыря на основе результатов лазерного сканирования и фотogramметрии // Перспективы науки. 2023. № 4. С. 80–86. EDN: AIMLVR.

17. Мелин М.А., Бреус Н.Л. Преимущества цифрового документооборота при подготовке и ведении исполнительной документации // Вестник Евразийской науки. 2022. Т. 14. № 3. С. 1–11. EDN: XSJWWX.

18. Фёдоров В.С., Тюменцев А.И. Геоинформационное и дистанционное обеспечение маркшейдерских съемок карьеров малой и средней глубины на базе беспилотных летательных аппаратов (на примере районов Иркутской области) // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2023. Т. 2. С. 87–92. EDN: NFIUKG.

19. Soomin Lee, Jung Yeoul Bae, Sharafat A., Jongwon Seo Waste Lime Earthwork Management Using Drone and BIM Technology for Construction Projects: The Case Study of Urban Development Project // KSCE Journal of Civil Engineering. 2024. Vol. 28. Iss. 2. P. 517–531. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1245-z>.

REFERENCES

1. Bariczova G., Erdelyi J., Honti R., Tomek L. Wall Structure Geometry Verification Using TLS Data and BIM Model. *Applied Sciences*. 2021;11(24):1-20. <https://doi.org/10.3390/app112411804>.

2. Moguchev S.B. Building Control Using Point Cloud and Building Information Model. *Engineering Journal of Don*. 2022;6:580-589. (In Russ.). EDN: AORUME.

3. Young-Jin Cha, Wooram Choi, Büyüköztürk O. Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2017;32(5):361-378. <https://doi.org/10.1111/mice.12263>.

4. Girya L.V., Trofimov G.P. Laser 3D Scanning of Architectural Monuments. *Journal of Construction and Architecture*. 2022;24(6):35-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2022-24-6-35-43>. EDN: KYKCUL.

5. Molokov P.V. Creation of 3D Models of Historical and Cultural Heritage Objects Using Terrestrial Laser Scanning and Aerial Photography. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring*. 2024;2(9):55-63. (In Russ.). <https://doi.org/10.23885/2500-123X-2024-2-9-55-63>. EDN: YBEUUA.

6. Sharif M., Rausch C., Ndiongue S., Haas C., Walbridge S. Using 3D Scanning for Accurate Estimation of Termination Points for Dimensional Quality Assurance in Pipe Spool Fabrication. *International Journal of Industrialized Construction*. 2021;2(1):54-69. <https://doi.org/10.29173/ijic253>.

7. Kurbanov O.A. Assessing The Prospects for The Application of Ground-Based 3D-Laser Scanning in Non-Residential Building Construction Work. *Internauka*. 2024;20-1:17-23. (In Russ.). EDN: IDKEQL.

8. Al-Fugara A., Al-Adamat R., Al Haddad M., Al-Shawabkeh Y., El-Khalili M., Obaidat D. Using of Laser Scanning and Dense Stereo Matching for 3D Documentation and Virtual Reconstruction of the Ancient Sama Monastery/Jordan. *International Journal of Remote Sensing Applications*. 2016;6:19-29. <https://doi.org/10.14355/ijrsa.2016.06.003>.

9. Castellazi G., D'Altri A.M., Bitelli G., Selvaggi I., Lambertini A. From Laser Scanning to Finite Element Analysis of Complex Buildings by Using a Semi-Automatic Procedure. *Sensors*. 2015;15(8):18360-18380. <https://doi.org/10.3390/s150818360>.

10. Fan Xie, Xiao Pan, Yang T.Y., Ernewein B., Minghao Li, Robinson D. A Novel Computer Vision and Point Cloud-Based Approach for Accurate Structural Analysis of a Tall Irregular Timber Structure. *Structures*. 2024;70:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107697>.

11. Justo A., Lamas D., Sanchez-Rodriguez A., Soilan M., Riveiro B. Generating IFC-Compliant Models and Structural Graphs of Truss Bridges from Dense Point Clouds. *Automation in Construction*. 2023;149:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104786>.

12. Yunping Fang, Mitoulis S.-A., Boddice D., Jialiang Yu, Ninic J. Scan-To-BIM-To-Sim: Automated Reconstruction of Digital and Simulation Models from Point Clouds with Applications On Bridges. *Results in Engineering*. 2025;25:1-21. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104289>.

13. Jingdao Chen, Yong K. Cho, Jun Ueda Sampled-Point Network for Classification of Deformed Building

- Element Point Clouds. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2018:2164-2169. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8461095>.
14. Jingdao Chen, Yong K. Cho Point-to-point Comparison Method for Automated Scan-vs-BIM Deviation Detection. *Proceedings of 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*. 2018:1-9.
15. Bogdanov A.N., Aleshutin I.A. Land Laser Scanning in Construction and BIM-Technologies. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2018;4:326-332. (In Russ.). EDN: VQTQVG.
16. Varenik K.A., Varenik A.S., Khramov D.D., Chameev A.S. Creation of Digital Models of St. George's Cathedral of the Yuryev Monastery Using the Results of Laser Scanning and Photogrammetry. *Science Prospects*. 2023;4:80-86. (In Russ.). EDN: AIMLVR.
17. Melin M.A., Breus N.L. Advantages of Digital Document Management in The Preparation and Maintenance of Executive Documentation. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022;14(3):1-11. (In Russ.). EDN: XSJWWX.
18. Fedorov V.S., Tyumentsev A.I. Geoinformation and Remote Support for Mine Surveying of Shallow and Medium-Depth Quarries Using Unmanned Aerial Vehicles (Using The Example of Irkutsk Region Districts). *Problemy razrabotki mestorozhdenii uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*. 2023;2:87-92. (In Russ.). EDN: NFIUKG.
19. Soomin Lee, Jung Yeoul Bae, Sharafat A., Jongwon Seo Waste Lime Earthwork Management Using Drone and BIM Technology for Construction Projects: The Case Study of Urban Development Project. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2024;28(2):517-531. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1245-z>.

Информация об авторах

Исупов Никита Сергеевич,

аспирант,
Уральский федеральный университет имени
первого президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17, Россия,
✉e-mail: isupovn98@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4301-3202>
Author ID: 1167047

Фомин Никита Игоревич,

к.т.н., доцент, директор института
строительства и архитектуры,
заведующий кафедрой промышленного,
гражданского строительства и экспертизы
недвижимости,
Уральский федеральный университет имени
первого президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17,
Россия,
e-mail: ni.fomin@urfu.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-7095-7161>
Author ID: 241981

Information about the authors

Nikita S. Isupov,

Postgraduate Student,
Ural Federal University named after the first
President of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia,
✉e-mail: isupovn98@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4301-3202>
Author ID: 1167047

Nikita I. Fomin,

Cand. Sci (Eng.), Associate Professor,
Head of the Institute of Civil Engineering
and Architecture, Head of the Department
of Industrial and Civil Engineering and Estate
Expertise,
Ural Federal University named after the first
President of Russia B.N. Yeltsin,
17 Mira St., Ekaterinburg 620002,
Russia,
e-mail: ni.fomin@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7095-7161>
Author ID: 241981

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 27.03.2025.
Одобрена после рецензирования 25.04.2025.
Принята к публикации 27.04.2025.

Information about the article

The article was submitted 27.03.2025.
Approved after reviewing 25.04.2025.
Accepted for publication 27.04.2025.



Применение сезонной аккумуляции естественного холода в современном кондиционировании как технологии сокращения выбросов парниковых газов

В.С. Коротынская^{1✉}, Е.В. Тарасова²

^{1,2}Дальневосточный федеральный университет, Политехнический институт, департамент энергетических систем, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, Россия

Аннотация. Системы кондиционирования воздуха являются одними из главных потребителей электрической энергии в теплое время года. Естественный холод для кондиционирования помещений используется с древних времен. Возможность заготовки снега и применение аккумулированного холода для различных целей в теплый сезон изучают в ряде стран, таких как США, Канада, Япония, Швеция, Норвегия, Китай. Целью статьи является обзор существующих естественных источников холода для систем кондиционирования воздуха, их классификация и анализ сокращения выбросов CO₂ при использовании естественного холода для системы кондиционирования аэропорта. Обозначены два основных вида естественных источников холода: постоянного действия и аккумуляторы естественного холода. Рассмотрены классификация систем кондиционирования воздуха с сезонной аккумуляцией льда или снега, способы утепления открытых снеохранилищ. Выполнен расчет сокращения выбросов CO₂ при использовании холодохранилища открытого типа в качестве источника холода для системы фанкойлов в аэропорту г. Южно-Сахалинска. Уменьшение выбросов за год составляет до 61 т CO₂ за год, при установленной мощности системы охлаждения -157,4 кВт или 0,39 т на 1 кВт мощности. Таким образом, сезонная аккумуляция снега или льда является технологией, позволяющей сократить потребление энергоресурсов и уменьшить выбросы парниковых газов.

Ключевые слова: аккумуляция холода, снеохранилище, кондиционирование, естественные источники холода

Для цитирования: Коротынская В.С., Тарасова Е.В. Применение сезонной аккумуляция естественного холода в современном кондиционировании как технологии сокращения выбросов парниковых газов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 454–465. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-454-465>. EDN: NWKQME.

Original article

The use of seasonal accumulation of natural cold in modern air conditioning as a technology to reduce greenhouse gas emissions

Veronika S. Korotynskaya^{1✉}, Elena V. Tarasova²

^{1,2}Far Eastern Federal University, Polytechnic Institute, Department of Energy Systems, Vladivostok, Russky Island, Ajax Bay, Russia

Abstract. Air conditioning systems are one of the main consumers of electric energy during the warmer months. Natural cold has been used for indoor air conditioning since ancient times. The possibility of harvesting snow and using accumulated cold for various purposes during the warm season is being studied in a number of countries, such as the USA, Canada, Japan, Sweden, Norway, China. The purpose of the article is to review the existing natural sources of cold for air conditioning systems, their classification and analysis of the reduction of CO₂ emissions when using natural cold for an airport air conditioning system. There are two main types of natural sources of cold: permanent action and accumulators of natural cold. The classification of air conditioning systems with seasonal accumulation of ice or snow, methods of insulation of open snow storage facilities are considered. The calculation of the

reduction of CO₂ emissions was performed when using an open-type cold storage facility as a source of cold for the fan coil system at the Yuzhno-Sakhalinsk airport. The reduction in annual emissions is up to 61 tons of CO₂ per year, with an installed cooling system capacity of 157.4 kW or 0.39 tons per 1 kW of power. Thus, seasonal accumulation of snow or ice is a technology that makes it possible to reduce energy consumption and reduce greenhouse gas emissions.

Keywords: cold accumulation, snow storage, air conditioning, natural sources of cold

For citation: Korotynskaya, V.S., Tarasova E.V. The use of seasonal accumulation of natural cold in modern air conditioning as a technology to reduce greenhouse gas emissions. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):454-465. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-454-465>. EDN: NWKQME.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с постоянно растущей стоимостью энергетических ресурсов в мире существует тенденция рационализации потребления [1–5]. Так, свое распространение получили технологии, позволяющие использовать альтернативные ресурсы, в том числе и естественные источники холода для систем кондиционирования воздуха [6–16]. Их можно разделить на источники холода постоянного действия и аккумуляторы холода.

Целями и задачами статьи являются:

- проведение обзора и классификация естественных источников холода и аккумуляторов холода для систем кондиционирования воздуха;
- обзор видов теплоизоляции для защиты открытых снеохранилищ;
- оценочный расчет сокращения углеродного следа при использовании снеохранилища в аэропорту г. Южно-Сахалинска.

МЕТОДЫ

Существует множество способов сокращения потребления энергии системами кондиционирования воздуха. При разработке энергосберегающих мероприятий требуется понимание, какой из способов может быть применен в конкретном случае. Для этого необходима классификация и анализ уже имеющегося опыта применения технологий. В условиях аэропортов для систем кондиционирования воздуха находят применение естественные источники холода [17]. В статье приводится обзор их видов и способов утепления сезонных аккумуляторов естественного холода.

Также экономия потребления энергоресурсов является важной составляющей в борьбе с изменениями климата, связанного с деятельностью человека. Вследствие сокращения потребления энергии уменьшаются выбросы парниковых газов.

Для оценки эффекта сокращения выбросов парниковых газов при использовании технологии сезонной аккумуляции естественного

холода рассчитаны выбросы CO₂ при работе системы кондиционирования воздуха (СКВ). Расчет произведен для системы охлаждения воздуха с чиллером № 1 в здании аэропорта в г. Южно-Сахалинске. Мощность системы составляет 157,4 кВт. Период, когда требуется охлаждение воздуха, с июня по сентябрь.

Рассмотрено два варианта функционирования СКВ:

- при использовании чиллера;
- при эксплуатации снеохранилища.

В процессе функционирования СКВ затрачивается электричество, которое производится на теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) при сжигании топлива. В расчете оценивалось количество затраченной электроэнергии при годовом цикле эксплуатации системы и далее было определено требуемое количество топлива для производства этой электроэнергии. Для варианта с сезонной аккумуляцией холода также учитывались затраты топлива для тяжелой техники, работающей при устройстве снеохранилища.

Известно, что источником электрической энергии в г. Южно-Сахалинск является Южно-Сахалинская ТЭЦ-1. В качестве топлива на ТЭЦ используют бурый уголь и природный газ. Поэтому сравнительный анализ выбросов углекислого газа проведен для этих двух видов топлива. На официальном сайте Сахалинэнерго размещена информация о том, что удельный расход условного топлива на производство электроэнергии составляет 346,65 г/(кВт·ч). Количественное определение выбросов CO₂, т, от стационарного сжигания топлива выполнено расчетным методом по отдельным источникам по формуле, в соответствии с приказом Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов»:

$$E_{CO_2,y} = \sum_{j=1}^n (FC_{j,y} \times EF_{CO_2,j,y} \times OF_{j,y}), \quad (1)$$

где $FC_{j,y}$ – расход топлива j за период y , тыс. m^3 , т, т у.т. или ТДж. Определен по методике, изложенной в приказе Минприроды России от 27.05.2022 № 371, $EF_{CO_2,j,y}$ – коэффициент выбросов CO_2 от сжигания топлива j за период y , т CO_2 /ед., $OF_{j,y}$ – коэффициент окисления топлива j , доля. Принят равным 1,0 в соответствии с п. 1.7. приказа Минприроды России от 27.05.2022 № 371, j – вид топлива, используемого для сжигания, n – количество видов топлива, используемых за период y .

Расход топлива ($FC_{j,y}$) определен в единицах измерения в тыс. m^3 для газообразного топлива, в т для дизельного топлива и каменного угля. Для расчета выбросов углекислого газа при эксплуатации чиллера учитываются затраты электроэнергии на работу чиллера для производства 158 580 кВт холода. Для расчета выбросов углекислого газа при использовании снеговосприимчивости учитываются электроэнергия, затраченная на работу циркуляционного насоса, установленного в контуре теплообменника под снеговосприимчивостью, и расход дизельного топлива для работы тяжелой техники при устройстве площадки (капитальные затраты) и укладке снега (эксплуатационные затраты). Расход топлива при капитальных затратах разделен на предполагаемый срок эксплуатации площадки (15 лет). Расход топлива при сборе снега с территории аэропорта не учитывается, так как эти работы проводятся непосредственно аэропортом и являются обязательными и регулярными при эксплуатации территории аэропорта. Коэффициент энергоэффективности (холодильный коэффициент) чиллера принят, согласно паспортным данным, 3,1. Требуемое потребление электроэнергии для работы чиллера в течение четырех месяцев (июнь–сентябрь) составляет 51 155 кВт, что потребует сжигания 38 т бурого угля или 15,4 тыс. m^3 природного газа. Для работы насоса в течение того же

периода потребуется 2147 кВт электрической энергии, 1,59 т бурого угля или 0,64 тыс. m^3 природного газа. Расход дизельного топлива при устройстве снеговосприимчивости составил 2,3 т.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Виды естественных источников холода постоянного действия

В СП 60.1333.2021 в п. 8.1 указано, что естественными источниками холода является артезианская и питьевая вода, наружный воздух и грунт поверхностный и более глубоких слоев.

Наиболее распространенными аппаратами, использующими естественный холод, являются градирни. Это устройства для охлаждения воды атмосферным воздухом (определение отражено в работе Пономаренко В.С. и Арефьева Ю.И. «Градирни промышленных и энергетических предприятий»).

Различают два типа градирен: открытые и закрытые [18]. В открытых градирнях охлаждение происходит за счет остывания распыляемой жидкости (рис. 1). За счет увеличения площади испарения, жидкость быстро остывает и, охлажденная, поступает обратно в контур.

В градирнях закрытого типа охлаждение происходит только за счет теплообмена: жидкость циркулирует в закрытом контуре по трубкам, активно обдуваемым воздухом (сухие градирни) или орошается водой (орошаемые градирни). Гибридная градирня совмещает теплообменные процессы открытой и закрытой градирни [19].

Сухие градирни применяют в ситуациях, где есть необходимость изолировать контур циркуляции воды от воздействия атмосферного воздуха, когда недопустимо применение градирни испарительного типа, или при отсутствии возможности получения свежей воды для наполнения системы.



Рис. 1. Открытая градирня
Fig. 1. Open cooling tower

Аккумуляторы естественного холода

Аккумуляция холода для систем СКВ используется в двух вариантах:

- суточная аккумуляция;
- сезонная аккумуляция естественного холода.

Суточная аккумуляция холода предполагает накопление холода в одну часть суток и его потребление в другую. Известной функционирующей системой с суточной аккумуляцией холода является применение холодильной станции с аккумулятором холода в торговом комплексе Castorama в Москве. В ней используется скрытая теплота замерзания воды. В ночное время, когда тариф на электричество снижен, происходит намораживание льда в холодохранилище. В дневное время, в период пиковых нагрузок, накопленный холод применяется в системе кондиционирования, что позволяет разгрузить основную систему охлаждения здания. При этом снижаются расходы не только на потребляемое электричество, но и величина первоначальных затрат на климатическое оборудование, так как при подборе оборудования значительно сокращается значение пиковой нагрузки за счет применения аккумулятора холода, как говорится в рекомендациях АВОК «Выбор и оптимизация систем холодоснабжения зданий».

Преимущества суточных аккумуляторов холода по сравнению с сезонными следующие:

- из-за возможности чаще накапливать холод, нет потребности в большом объеме аккумулятора холода;
- отсутствие потребности в больших площадях для размещения холодохранилища, сказывается на уменьшении капиталовложений.

Кроме того, относительно небольшой объем аккумулятора имеет преимущества в стесненных условиях размещения оборудования. Возможности использования естественного холода при суточной аккумуляции минимальны, холод для суточных аккумуляторов получают с использованием холодильных машин.

Сезонная аккумуляция естественного холода предполагает аккумуляцию холода в период года с отрицательными наружными температурами и его потребление в теплый период года. Подобные аккумуляторы холода использовались с древних времен, например, для сохранения продуктов питания.

В работе Виктора Ллонча «Preliminary design of a snow storage cooling system for a poultry house placed in Quebec» были изучены применение и хранение естественного снега и

льда в разных условиях эксплуатации. Они также разделили способы хранения снега на три вида:

1. Обычные снегохранилища.
2. Водонепроницаемые снегохранилища.
3. Снегохранилища высокой плотности (закрытые).

Обычные снегохранилища имеют довольно простую конструкцию. Снег накапливают в некотором углублении в грунте, в основании укладывают крупнозернистый песок, через который просачивается талая вода, текущая по трубам в теплообменник. Далее, охлажденная вода подается в обслуживаемое помещение для его охлаждения. Данная система имеет такие недостатки, как низкая эффективность и относительно высокие первоначальные и эксплуатационные затраты. Из-за высокой агрессивности талой воды оборудование быстро приходит в негодность, а дополнительные фильтры и усиленное защитное покрытие для труб требуют дополнительных вложений. Водонепроницаемые снегохранилища отличаются от обычных лишь наличием водонепроницаемого слоя в основании и теплоизолирующим покрытием. Кроме того, при устройстве такого холодохранилища снег послойно уплотняется во время укладки.

Примером такой системы хранения снега является хранилище снега в больнице Сундсвалль в Швеции (рис. 2). Другим примером является снегохранилище, которое использовалось при исследовании способов сохранения снега для компенсации нехватки снежного покрова на горнолыжных курортах на севере США в средних широтах и на низкой высоте (45° с.ш. и 360 м над уровнем моря) (рис. 3) [21]. Результаты данного исследования по сохранению снега в теплый период года могут быть применены и для проектирования снегохранилищ с целью их использования в системах кондиционирования воздуха. Снегохранилища высокой плотности предполагают наличие специально оборудованного утепленного помещения или резервуара. Снег подвергается максимальному уплотнению, возможно, с применением системы распыления воды. Такая конструкция занимает меньше всего места и плотность снега может достигать 920 кг/м³, как отмечает в своей работе Виктор Ллонч.

В работе [22] классификация систем кондиционирования воздуха с аккумуляцией льда или снега рассмотрена по типу используемого холодоносителя:

- с охлаждением жидкого холодоносителя;
- с охлаждением кондиционируемого воздуха;

– смешанные.

Система кондиционирования с охлаждением жидкого холодоносителя имеет следующую классификацию:

1. По способу охлаждения воздуха:

- через водо-воздушный теплообменник;
- с использованием оросительной камеры.

2. По типу жидкости:

- использование талой воды;
- использование промежуточных жидкостных контуров.

Системы кондиционирования с охлаждением кондиционируемого воздуха разделяются по типу используемого воздуха:

- прямоточные;
- рециркуляционные;
- с подмесом наружного воздуха

Системы кондиционирования с любым видом перемещаемой среды делятся по типу аккумулятора холода:

– закрытые (отдельные помещения и емкости);

– открытые;

– камеры с периодической засыпкой естественных источников холода.

Системы сезонной аккумуляции холода имеют положительный экологический эффект, но их применение имеет ряд ограничений.

Во-первых, для их устройства необходимы определенные климатические условия.

Во-вторых, требуются дополнительные сравнительно большие площади для размещения холодохранилищ.

Загрязненный снег и лед являются довольно агрессивной средой для теплообменного оборудования, что снижает срок его эксплуатации. Тем не менее, сезонные аккумуляторы холода находят свое применение в таких странах как Швеция, Япония, США, Норвегия [17, 20, 21].



a



b

Рис. 2. а – часть снегохранилища с насосной станцией и половина больницы;

б – снег, покрытый щепой, в начале сезона охлаждения.

Фотография сделана из насосной станции [20]

Fig. 2. a – part of the snow storage facility with the pumping station and half of the hospital;

b – snow covered with wood chips at the beginning of the cooling season.

Photo taken from the pumping station [20]



(d)



(e)

Рис. 3. Снегохранилище в разные периоды года [25]

Fig. 3. Snow storage at different times of the year [25]

Утепление открытых сезонных холодохранилищ

В связи со значительным перепадом температур в летний период, между снегохранилищем и наружным воздухом и грунтом, необходимо устройство теплоизоляционного слоя [23, 24]. Сегодня на рынке представлен широкий ассортимент теплоизоляционных материалов от природных до синтетических [25, 26].

Обработанные и необработанные природные теплоизоляционные материалы использовались с древних времен и не потеряли свою актуальность и в нынешнее время [27]. Известны случаи утепления сезонных аккумуляторов холода рисовой соломой и отходами древесного производства. В работах [20, 21, 28] по исследованию динамики таяния снега применялись древесные опилки или щепы в качестве теплоизоляционного материала, так как они обладают рядом преимуществ:

- невысокая стоимость относительно других вариантов утепления;
- экологичность;
- простота утилизации;
- подвижность: по мере таяния снега утепляющий материал равномерно опускался за тающим массивом, повторяя его форму.

Искусственные материалы также применяются для теплоизоляции холодохранилищ. Например, для снегохранилища в аэропорту г. Титосе в Японии, используется полимерный материал – пенопласт, толщиной 5 см, как писал в своих работах Masayoshi KOBAYAMA.

Наиболее перспективными полимерными теплоизолирующими материалами для холодохранилищ являются рулонные материалы, такие как пенополиуретан и вспененный полиэтилен [29].

Пенополиуретан представляет собой пену с закрытыми порами, благодаря чему он не впитывает влагу. Он обладает хорошими теплоизоляционными и прочностными характеристиками, но отличается высокой степенью горючести [30]. На основе вспененного полиэтилена изготавливаются такие современные теплоизоляционные материалы, как пенофол и армофол [29]. Этот материал представляет пластиковое полотно с закрытыми порами, покрытое с одной или с двух сторон алюминиевым покрытием. Отпускается в виде рулонов или матов. У этого материала отличные теплоизоляционные характеристики, он имеет малый вес, не гигроскопичен, нетоксичен и не является материалом с благоприятной средой для развития грибка и плесени, устойчив к коррозии, долговечен. Преимуществом этого материала является пожаробезопасность, так как он не подвержен горению [29]. Основными недостатками полимерных материалов является высокая цена и сложность монтажа при утеплении холодохранилищ открытого типа. Для крепления полимерного материала в аэропорту г. Титосе использовались чехлы для теплоизоляционных плит с отверстиями для крепления, а также сверху конструкция придавливалась рукавами, заполняемыми водой (рис. 4).



Рис. 4. Процесс монтажа утеплителя снегохранилища в аэропорту г. Титосе (Япония)
Fig. 4. The process of installing insulation for a snow storage facility at Chitose Airport (Japan)

Среди минеральных утеплителей, для утепления открытых снегохранилищ, подойдут сыпучие теплоизоляционные материалы в виде гранул, такие как керамзит [31], гранулированный шлак, вермикулит [32]. Они обладают низкой теплопроводностью, просты в эксплуатации и не подвержены гниению. При устройстве холодохранилищ, предусматривающих долговременное хранение источника естественного холода, необходимо выбрать теплоизолирующее покрытие, удовлетворяющее не только теплотехническим характеристикам, но и экономической эффективности и противопожарным требованиям.

Расчет сокращения выбросов углекислого газа при использовании снегохранилища открытого типа для холодоснабжения системы фанкойлов в аэропорту г. Южно-Сахалинска

По результатам расчета, суммарные выбросы углекислого газа при работе чиллера составили 71,33 т при сжигании бурого угля и 30,62 т при сжигании газа.

При использовании снегохранилища – 10,3 т для бурого угля и дизеля, 8,6 т для газа и дизеля.

Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 5.

Таблица 1. Результаты расчета выбросов CO₂ от сжигаемого топлива

Table 1. Results of calculation of CO₂ emissions from fuel combustion

Наименование показателя	Холодохранилище			Чиллер	
	Дизельное топливо	Бурый уголь	Природный газ	Бурый уголь	Природный газ
Расход топлива j в натуральном выражении за период y , т или тыс. м ³	2,32	1,59	0,64	37,97	15,37
Низшая теплота сгорания топлива j за период y , МДж/кг, МДж/м ³	42,60	18,60	36,63	18,60	36,63
Расход топлива j в энергетическом эквиваленте за период y , ТДж	0,10	0,03	0,02	0,71	0,56
Коэффициенты выбросов ($EF_{CO_2,j,y}$):					
т CO ₂ /т.у.т	2,17	2,96	1,59	2,96	1,59
т CO ₂ /ТДж	74,1	101,0	54,4	101,0	54,4
Выбросы CO ₂ , т	7,31	2,99	1,29	71,33	30,62

Выбросы CO₂ от стационарного сжигания топлива при эксплуатации системы чиллер-фанкойл и при устройстве холодохранилища

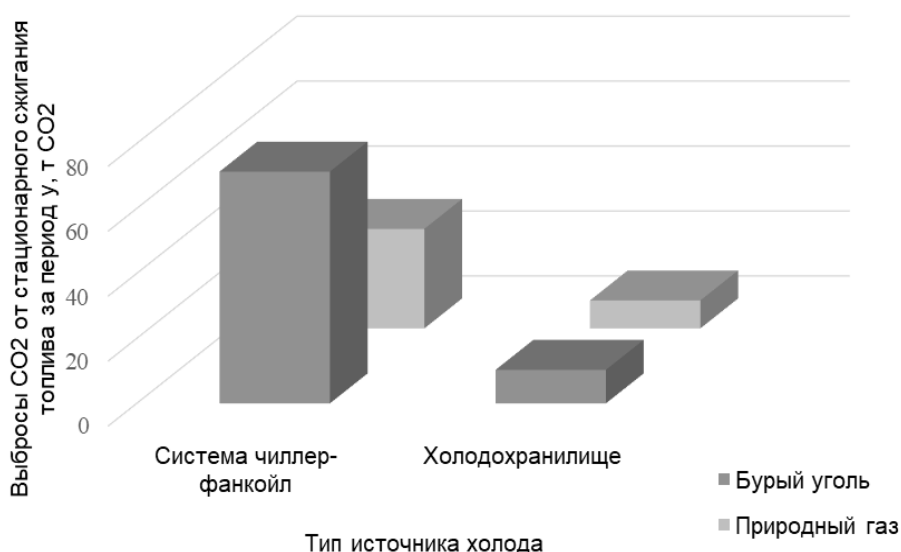


Рис. 5. Диаграмма выбросов CO₂
Fig. 5. Diagram of CO₂ emissions

Уменьшение выбросов CO₂ на 1 кВт установленной мощности чиллера составили 388,4 кг при сжигании бурого угля, 140,5 м³ при сжигании газа. Уменьшение выбросов CO₂ на каждые 100 кВт выработанного холода составили 38,5 кг при сжигании бурого угля, 13,9 м³ при сжигании газа. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Анализ сокращения выбросов углекислого газа
Table 2. Analysis of carbon dioxide emissions reduction

Вид топлива, используемого при получении электроэнергии	Выбросы CO ₂ от стационарного сжигания топлива (бурый уголь) при эксплуатации СКВ, т			Сокращение выбросов CO ₂ , кг	
	Чиллер	Холодохранилище	Сокращение выбросов CO ₂	на 1 кВт установленной мощности	на 100 кВт выработанного холода
Бурый уголь	71,33	10,3	61,03	388,4	38,5
Природный газ	30,62	8,6	22,02	140,5	13,9

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существует довольно много способов использования естественного холода для систем кондиционирования воздуха. При выборе конкретного способа необходимо учитывать такие факторы, как количество потребляемого холода, климат, имеющееся место и площадь для размещения аккумулятора холода и теплообменника. В случае применения открытых сезонных снегохранилищ важно обосновать выбор теплоизоляционного материала, руководствуясь не только техническими характеристиками материала, но и учитывая экономическую целесообразность его применения с

учетом затрат на монтаж/демонтаж утеплителя.

Использование сезонных аккумуляторов естественного холода сокращает выбросы парниковых газов и, как показывает опыт некоторых стран, имеет экономическую целесообразность.

Расчет показал, что при использовании снегохранилища для чиллера № 1 аэропорта г. Южно-Сахалинска, суммарное сокращение выбросов CO₂ составило 61,03 т при сжигании бурого угля для получения электрической энергии, при сжигании природного газа – 22,02 т.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Willibald F., Kotlarski S., Ebner P.P., Bavay M., Marty C., Trentini F.V. et al. Vulnerability of Ski Tourism Towards Internal Climate Variability and Climate Change in The Swiss Alps // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 784. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147054>.
2. Tiismus H., Maask V., Astapov V., Korotko T., Rosin A. State-of-the-Art Review of Emerging Trends in Renewable Energy Generation Technologies // IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 10820–10843. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3528640>.
3. Stec A., Slys D., Ogarek P., Bednarz K., Bartkowska I., Gwoździej-Mazur J. et al. Assessment of Possibilities of Using Local Renewable Resources in Road Infrastructure Facilities – A Case Study from Poland // Energies. 2024. Vol. 17. Iss. 24. P. 1–22. <https://doi.org/10.3390/en17246351>.
4. Игнащенко О.О., Коврина О.Е. Обеспечение комфорта и энергосбережения в жилых зданиях // Инженерный вестник Дона. 2021. № 7. С. 496–502. EDN: TSYASD.
5. Стронгин А.С. Оценка эффективности систем холодоснабжения общественных зданий. Часть 2. Экономическая и экологическая эффективность // Энергосбережение. 2020. № 3. С. 64–68.
6. Некрасов С.А., Клименко В.В. О путях снижения издержек энергоснабжения в России // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2024. Т. 15. № 3. С. 356–370. <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2024.15.3.356-370>. EDN: AWWFEQ.
7. Haiwen Chen, Feng Zheng, Rongcai Song, Chao Zhang, Ben Dong, Jiahao Zhang et al. Geothermal Resource Assessment and Development Recommendations for the Huangliu Formation in the Central Depression of the Yinggehai Basin // Sustainability. 2024. Vol. 16. Iss. 16. P. 1–24. <https://doi.org/10.3390/su16167104>.
8. Руденко Н.Н., Пирожникова А.П., Коробов В.А. Использование аккумуляции холода в системе кондиционирования воздуха спортивного комплекса // Инженерный вестник Дона. 2021. № 11. С. 242–250. EDN: SFADRX.

9. Xing Wang, Feiteng Wang, Jiawen Ren, Dahe Qin, Huilin Li Assessing The Key Concerns In Snow Storage: A Case Study For China // *The Cryosphere*. 2024. Vol. 18. Iss. 7. P. 3017–3031. <https://doi.org/10.5194/tc-18-3017-2024>.
10. Chengchu Yan, Wenxing Shi, Xianting Li, Shengwei Wang A Seasonal Cold Storage System Based on Separate Type Heat Pipe for Sustainable Building Cooling // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 85. P. 880–889. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.023>.
11. Kumar V., Hewage K., Haider H., Sadiq R. Sustainability Evaluation Framework for Building Cooling Systems: A Comparative Study Of Snow Storage and Conventional Chiller Systems // *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2017. Vol. 19. P. 137–155. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1198-8>.
12. Chengchu Yan, Wenxing Shi, Xianting Li, Yang Zhao Optimal Design and Application of A Compound Cold Storage System Combining Seasonal Ice Storage and Chilled Water Storage // *Applied Energy*. 2016. Vol. 171. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.005>.
13. Hamada Y., Nagata T., Kubota H., Ono T., Hashimoto Y. Study on A Snow Storage System in A Renovated Space // *Renewable Energy*. 2012. Vol. 41. P. 401–406. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.012>.
14. Persson J., Westermarck M. Low-Energy Buildings and Seasonal Thermal Energy Storages from a Behavioral Economics Perspective // *Applied Energy*. 2013. Vol. 112. P. 975–980. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.047>.
15. Hamada Y., Nakamura M., Kubota H. Field Measurements and Analyses for A Hybrid System for Snow Storage/Melting and Air Conditioning by Using Renewable Energy // *Applied Energy*. 2007. Vol. 84. Iss. 2. P. 117–134. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.07.002>.
16. Chengchu Yan, Fengling Wang, Yan Pan, Kui Shan, Risto Kosonen A Multi-Timescale Cold Storage System within Energy Flexible Buildings for Power Balance Management of Smart Grids // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 161. P. 626–634. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.079>.
17. Maex Moe J. Using Stored Snow as Cooling at Oslo Airport, Norway // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering*. 2018. Vol. 171. Iss. 5. P. 11–16. <https://doi.org/10.1680/jcien.17.00041>.
18. Alaiwi Y., Al-Omari S.B. Types of Cooling Towers: A Review // *Babylonian Journal of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 2024. P. 106–114. <https://doi.org/10.58496/BJME/2024/013>.
19. Abdullah A.K., Qasim M.S., Ahmed M.Q. Thermal Characteristics Investigation of Natural Draft Hybrid (Wet/Dry) Cooling Tower // *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*. 2022. Vol. 14. Iss. 3. P. 10–15. <http://doi.org/10.54684/ijmmt.2022.14.3.10>.
20. Skogsberg K., Nordell B. The Sundsvall Hospital Snow Storage // *Cold Regions Science and Technology*. 2001. Vol. 32. Iss. 1. P. 63–70. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(00)00021-5).
21. Weiss H.S., Bierman P.R., Dubief Y., Hamshaw S.D. Optimization of Over-Summer Snow Storage At Midlatitudes and Low Elevation // *The Cryosphere*. 2019. Vol. 13. Iss. 12. P. 3367–3382. <https://doi.org/10.5194/tc-13-3367-2019>.
22. Тарасова Е.В., Штым А.С. Схемы и конструкции аккумуляторов естественного холода в системах кондиционирования воздуха // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2012. № 4. С. 70–78. EDN: PKMVSD.
23. Xing Wang, Da-He Qin, Jia-Wen Ren, Fei-Teng Wang Numerical Estimation of Thermal Insulation Performance of Different Coverage Schemes at Three Places for Snow Storage // *Advances in Climate Change Research*. 2021. Vol. 12. Iss. 6. P. 903–912. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.10.003>.
24. Di Liu, Xiaofeng Li, Yuexia Dong, Lihua Zhu, Xin Peng Performance Research and Application Progress of Thermal Insulation Materials for Cold Storage // *Academic Journal of Science and Technology*. 2023. Vol. 8. Iss. 2. P. 114–120. <https://doi.org/10.54097/ajst.v8i2.15052>.
25. Ильина К.В., Моисеенко А.С., Губенко А.Л. Материалы, используемые при отделке фасадов в северных климатических условиях // *Молодежь и системная модернизация страны. Сб. науч. статей 7-й Междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых (г. Курск, 19–20 мая 2022 г.)*. Курск, 2022. С. 165–168. EDN: HWJWXA.
26. Омурзаков А., Сарбаева Н. М. Сравнительный анализ современных теплоизоляционных материалов // *Наука и инновационные технологии*. 2023. № 2. С. 201–204. <https://doi.org/10.33942/sit042322>. EDN: VKCCON.
27. Халиков Д.А., Халикова Г.С., Гончарова Т.В., Исламов К.Ф. Эволюция теплоизоляционных строительных материалов // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 10-3. С. 529–533. EDN: UNXWJR.
28. Grünwald T., Wolfspurger F., Lehning M. Snow Farming: Conserving Snow Over The Summer Season // *The Cryosphere*. 2018. Vol. 12. Iss. 1. P. 385–400. <https://doi.org/10.5194/tc-12-385-2018>.
29. Туляков Е.И. Теплоизоляционный рулонный материал на основе вспененного полиэтилена // *Образование. Наука. Производство. Сб. докладов XIV Междунар. молодежного форума (г. Белгород, 13–14 октября 2022 г.)*. Белгород, 2022. Т. 14. С. 174–179. EDN: UPMCLC.
30. Абилюдинова С.К., Бейсен Д.М., Байдюсенов Г.Н. Оценка эффективности теплоизоляционных конструкций из пенополиуретана при различных способах прокладки теплосетей // *Вестник Алматинского*

университета энергетики и связи. 2019. № 4. С. 28–33. https://doi.org/10.51775/1999-9801_2019_47_4_28. EDN: BNAPWP.

31. Галдина В.Д., Сатюк М.С. Особенности структуры и свойств керамзита и керамзитобетона // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции (г. Омск, 23–24 ноября 2023 г.). Омск, 2023. С. 516–519. EDN: HRQMUG.

32. Min Li, Yafei Guan Study on Preparation and Heat Storage Performance of Paraffin-Expanded Vermiculite-Based Phase Change Concrete // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2024. Vol. 149. P. 14605–14614. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13832-y>.

REFERENCES

1. Willibald F., Kotlarski S., Ebner P.P., Bavay M., Marty C., Trentini F.V. et al. Vulnerability of Ski Tourism Towards Internal Climate Variability and Climate Change in The Swiss Alps. *Science of The Total Environment*. 2021;784:1-18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147054>.
2. Tiismus H., Maask V., Astapov V., Korotko T., Rosin A. State-of-the-Art Review of Emerging Trends in Renewable Energy Generation Technologies. *IEEE Access*. 2025;13:10820-10843. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3528640>.
3. Stec A., Slys D., Ogarek P., Bednarz K., Bartkowska I., Gwoździej-Mazur J. et al. Assessment of Possibilities of Using Local Renewable Resources in Road Infrastructure Facilities – A Case Study from Poland. *Energies*. 2024;17(24):1-22. <https://doi.org/10.3390/en17246351>.
4. Ignashchenko O.O., Kovrina O.E. Roving Comfort and Energy Saving in Residential Buildings. *Engineering Journal of Don*. 2021;7:496-502. (In Russ.). EDN: TSYASD.
5. Strongin A.S. Efficiency Assessment of Cold Supply Systems in Public Buildings. Part 2. Economic and Ecological Efficiency. *Energobezrezhenie*. 2020;3:64-68. (In Russ.).
6. Nekrasov S.A., Klimenko V.V. On Ways to Reduce the Energy Supply Costs in Russia. *MIR (Modernization. Innovation. Research)*. 2024;15(3):356-370. (In Russ.). <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2024.15.3.356-370>. EDN: AWWEFQ.
7. Haiwen Chen, Feng Zheng, Rongcai Song, Chao Zhang, Ben Dong, Jiahao Zhang et al. Geothermal Resource Assessment and Development Recommendations for the Huangliu Formation in the Central Depression of the Yinggehai Basin. *Sustainability*. 2024;16(16):1-24. <https://doi.org/10.3390/su16167104>.
8. Rudenko N.N., Pirozhnikova A.P., Korobov V.A. Use of Cold Storage in the Air Conditioning System of a Sports Complex. *Engineering Journal of Don*. 2021;11:242-250. (In Russ.). EDN: SFADRX.
9. Xing Wang, Feiteng Wang, Jiawen Ren, Dahe Qin, Huilin Li Assessing The Key Concerns In Snow Storage: A Case Study For China. *The Cryosphere*. 2024;18(7):3017-3031. <https://doi.org/10.5194/tc-18-3017-2024>.
10. Chengchu Yan, Wenxing Shi, Xianting Li, Shengwei Wang A Seasonal Cold Storage System Based on Separate Type Heat Pipe for Sustainable Building Cooling. *Renewable Energy*. 2016;85:880-889. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.023>.
11. Kumar V., Hewage K., Haider H., Sadiq R. Sustainability Evaluation Framework for Building Cooling Systems: A Comparative Study Of Snow Storage and Conventional Chiller Systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2017;19:137-155. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1198-8>.
12. Chengchu Yan, Wenxing Shi, Xianting Li, Yang Zhao Optimal Design and Application of A Compound Cold Storage System Combining Seasonal Ice Storage and Chilled Water Storage. *Applied Energy*. 2016;171:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.005>.
13. Hamada Y., Nagata T., Kubota H., Ono T., Hashimoto Y. Study on A Snow Storage System in A Renovated Space. *Renewable Energy*. 2012;41:401-406. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.012>.
14. Persson J., Westermarck M. Low-Energy Buildings and Seasonal Thermal Energy Storages from a Behavioral Economics Perspective. *Applied Energy*. 2013;112:975-980. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.047>.
15. Hamada Y., Nakamura M., Kubota H. Field Measurements and Analyses for A Hybrid System for Snow Storage/Melting and Air Conditioning by Using Renewable Energy. *Applied Energy*. 2007;84(2):117-134. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.07.002>.
16. Chengchu Yan, Fengling Wang, Yan Pan, Kui Shan, Risto Kosonen A Multi-Timescale Cold Storage System within Energy Flexible Buildings for Power Balance Management of Smart Grids. *Renewable Energy*. 2020;161:626-634. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.079>.
17. Maex Moe J. Using Stored Snow as Cooling at Oslo Airport, Norway. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering*. 2018;171(5):11-16. <https://doi.org/10.1680/jcien.17.00041>.
18. Alaiwi Y., Al-Omari S.B. Types of Cooling Towers: A Review. *Babylonian Journal of Mechanical Engineering*. 2024;2024:106-114. <https://doi.org/10.58496/BJME/2024/013>.

19. Abdullah A.K., Qasim M.S., Ahmed M.Q. Thermal Characteristics Investigation of Natural Draft Hybrid (Wet/Dry) Cooling Tower. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*. 2022;14(3):10-15. <http://doi.org/10.54684/ijmmt.2022.14.3.10>.
20. Skogsberg K., Nordell B. The Sundsvall Hospital Snow Storage. *Cold Regions Science and Technology*. 2001;32(1):63-70. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(00)00021-5).
21. Weiss H.S., Bierman P.R., Dubief Y., Hamshaw S.D. Optimization of Over-Summer Snow Storage At Midlatitudes and Low Elevation. *The Cryosphere*. 2019;13(12):3367-3382. <https://doi.org/10.5194/tc-13-3367-2019>.
22. Tarasova E.V., Shtym A.S. The Schemes and Designs of Natural Cold Accumulators in Air-Conditioning Systems. *Far Eastern Federal University School of Engineering Bulletin*. 2012;4:70-78. (In Russ.). EDN: PKMVSD.
23. Xing Wang, Da-He Qin, Jia-Wen Ren, Fei-Teng Wang Numerical Estimation of Thermal Insulation Performance of Different Coverage Schemes at Three Places for Snow Storage. *Advances in Climate Change Research*. 2021;12(6):903-912. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.10.003>.
24. Di Liu, Xiaofeng Li, Yuexia Dong, Lihua Zhu, Xin Peng Performance Research and Application Progress of Thermal Insulation Materials for Cold Storage. *Academic Journal of Science and Technology*. 2023;8(2):114-120. <https://doi.org/10.54097/ajst.v8i2.15052>.
25. Ilin K.V., Moiseenko A.S., Gubenko A.L. Materials Used For Finishing Facades in Northern Climates. In: *Molodezh i sistemnaya modernizatsiya strany. Sbornik nauchnykh statei 7-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh = Youth and Systemic Modernization of The Country. Collection of Scientific Articles of the 7th International Scientific Conference of Students and Young Scientists*. 19–20 May 2022, Kursk. Kursk; 2022. P. 165–168. (In Russ.). EDN: HWJWXA.
26. Omurzakov A., Sarbaeva N.M. Comparative Analysis of Modern Thermal Insulation Materials. *Nauka i innovatsionnye tekhnologii*. 2023;2:201-204. (In Russ.). <https://doi.org/10.33942/sit042322>. EDN: VKCCON.
27. Khalikov D.A., Khalikova G.S., Goncharova T.V., Islamov K.F. Evolution of Heat-Insulating Construction Materials. *Fundamental Research*. 2015;10-3:529-533. (In Russ.). EDN: UNXWJR.
28. Grünwald T., Wolfspurger F., Lehning M. Snow Farming: Conserving Snow Over The Summer Season. *The Cryosphere*. 2018;12(1):385-400. <https://doi.org/10.5194/tc-12-385-2018>.
29. Tulyakov E.I. Thermal Insulation Roll Material Based on Foamed Polyethylene. In: *Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo. Sbornik dokladov XIV Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma = Education. Science. Production. Collection of Reports of the XIV International Youth Forum*. 13–14 October 2022, Belgorod. Belgorod; 2022. Vol. 14. P. 174–179. (In Russ.). EDN: UPMCLC.
30. Abildinova S.K., Beisen D.M., Baydyusenov G.N. Estimation of Efficiency of Heat-Insulating Construction from Foam Polyurethane at Various Ways of Laying Heat Networks. *Vestnik Almatinskogo universiteta energetiki i svyazi*. 2019;4:28-33. (In Russ.). https://doi.org/10.51775/1999-9801_2019_47_4_28. EDN: BNAPWP.
31. Galdina V.D., Satjuk M.S. Features of the Structure and Properties of Ceramic and Ceramic Concrete. In: *Arkhitekturno-stroitel'nyi i dorozhno-transportnyi kompleksy: problemy, perspektivy, innovatsii. Sbornik materialov VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Architectural, Construction and Road Transport Complexes: Problems, Prospects, Innovations. Collection of Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference*. 23–24 November 2023, Omsk. Omsk; 2023. P. 516–519. (In Russ.). EDN: HRQMUG.
32. Min Li, Yafei Guan Study on Preparation and Heat Storage Performance of Paraffin-Expanded Vermiculite-Based Phase Change Concrete. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024;149:14605-14614. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13832-y>.

Информация об авторах

Коротынская Вероника Сергеевна,
Аспирант, ассистент,
Дальневосточный федеральный университет,
Политехнический институт, департамент
энергетических систем,
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10,
Россия,
✉ e-mail: korotynskaia.vs@dvfu.ru
<https://orcid.org/0009-0007-2303-2135>
Author ID: 1280813

Information about the authors

Veronika S. Korotynskaya,
Postgraduate Student, Assistant,
Far Eastern Federal University,
Polytechnic Institute, Department of Energy
Systems,
10, Ajax Bay, Russky Island,
Vladivostok 690922, Russia,
✉ e-mail: korotynskaia.vs@dvfu.ru
<https://orcid.org/0009-0007-2303-2135>
Author ID: 1280813

Тарасова Елена Владимировна,
к.т.н., доцент кафедры энергетических систем,
Дальневосточный федеральный университет,
Политехнический институт, департамент
энергетических систем, 690922, Приморский
край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10,
Россия,
e-mail: tarasova.ev@dvfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0955-5363>
Author ID: 645392

Elena V. Tarasova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Energy Systems,
Far Eastern Federal University, Polytechnic
Institute, Department of Energy Systems,
10, Ajax Bay, Russky Island,
Vladivostok 690922, Russia,
e-mail: tarasova.ev@dvfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0955-5363>
Author ID: 645392

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and
approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.04.2025.
Одобрена после рецензирования 20.05.2025.
Принята к публикации 21.05.2025.

Information about the article

The article was submitted 24.04.2025.
Approved after reviewing 20.05.2025.
Accepted for publication 21.05.2025.



О возможности применения современных реагентов-осадителей для извлечения ионов тяжелых металлов из сточных вод гальванического производства

С.С. Курилин¹, Т.А. Курилина^{2✉}, Т.Я. Пазенко³, Е.Л. Войтов⁴

^{1,2,3}Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия

⁴Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Россия

Аннотация. В настоящее время любой технологический процесс определяется не только производственными показателями, но и экологической безопасностью, которая может быть достигнута с применением новых технологий, методов, современных реагентов и т. д. В статье проанализированы аспекты возможного использования реагентов-осадителей ионов тяжелых металлов фирмы Plexon: Plexon 3315, Plexon 2210 и Plexon 5020, а также органический реагент-осадитель Plexon 9015 (смесь полиэтиленимина и дитиокарбамата). Применение этих реагентов позволяет осуществлять безопасную технологию, соответствующую всем современным нормам и требованиям. Реагенты фирмы Plexon способны создавать комплексы с ионами тяжелых металлов за непродолжительное время реакции, что приводит к значительному снижению количества загрязненных сточных вод и уменьшению объема сооружений. Лабораторные исследования были проведены на разработанной полупроизводственной установке для очистки сточных вод, содержащих ионы металлов с применением универсальной профессиональной дозирующей системы Diversey. Для понимания механизма комплексообразования ионов тяжелых металлов с предлагаемыми реагентами были получены дифрактограммы образцов реагентов с использованием метода рентгенофазового анализа. Как правило, дозировка реагентов зависит от вида осаждаемого металла, его концентрации и используемых комплексообразующих реагентов, что нашло подтверждение в полученных уравнениях регрессии. В ходе эксперимента наблюдается хорошая сопоставимость результатов проведенных опытов с данными литературных источников.

Ключевые слова: металлургия, экология, реагенты-осадители, комплексообразователи, оптимальные дозы, металлосодержащие стоки

Для цитирования: Курилин С.С., Курилина Т.А., Пазенко Т.Я., Войтов Е.Л. О возможности применения современных реагентов-осадителей для извлечения ионов тяжелых металлов из сточных вод гальванического производства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 466–476. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-466-476>. EDN: UUEWDO.

Original article

On the possibility of using modern sedimentation reagents to extract heavy metal ions from wastewater from electroplating

Sergey S. Kurilin¹, Tatyana A. Kurilina^{2✉}, Tatyana Ya. Pazenko³, Evgeniy L. Voytov⁴

^{1,2,3}School of Engineering and Construction of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

⁴Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia

Abstract. Currently, any technological process is determined not only by production indicators, but also by environmental safety, which can be achieved with the use of new technologies, methods, modern reagents, etc. The article analyzes the aspects of the possible use of heavy metal ion precipitating reagents.

© Курилин С.С., Курилина Т.А., Пазенко Т.Я., Войтов Е.Л., 2025

gents from Plexon: Plexon 3315, Plexon 2210 and Plexon 5020, as well as the organic precipitating reagent Plexon 9015 (a mixture of polyethyleneimine and dithiocarbamate). The use of these reagents makes it possible to implement a safe technology that meets all modern standards and requirements. Plexon reagents are capable of creating complexes with heavy metal ions in a short reaction time, which leads to a significant reduction in the amount of contaminated wastewater and a reduction in the volume of facilities. Laboratory studies were carried out on a developed semi-productive wastewater treatment plant containing metal ions using a universal professional dosing system Diversey. To understand the mechanism of complexation of heavy metal ions with the proposed reagents, diffractograms of reagent samples were obtained using the method of X-ray phase analysis. As a rule, the dosage of reagents depends on the type of metal being deposited, its concentration, and the complexing reagents used, which is confirmed in the obtained regression equations. During the experiment, there is a good comparability of the results of the experiments with the data from literary sources.

Keywords: metallurgy, ecology, sedimentation reagents, complexing agents, optimal doses, metal-containing effluents

For citation: Kurilin S.S., Kurilina T.A., Pazenko T.Ya., Voytov E.L. On the possibility of using modern sedimentation reagents to extract heavy metal ions from wastewater from electroplating. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3): 466-476. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-466-476>. EDN: UUEWDO.

ВВЕДЕНИЕ

Темпы развития российской металлургической промышленности набирают обороты и вопросы повышения качества очистки сточных вод существенно обострились в последнее время, поэтому сокращение водопотребления, рациональное использование воды является актуальной проблемой.

Согласно требованиям Водного кодекса Российской Федерации, одним из путей решения данного вопроса может быть создание малоотходных и безотходных экологически безопасных процессов благодаря внедрению системы оборотного и повторного использования воды, прошедшей соответствующую очистку на локальных очистных сооружениях [1].

При обработке металлов, в зависимости от технологического процесса, образуются стоки с характерными видами загрязнений [2, 3].

Вода в технологическом процессе используется как растворитель для отмывки изделий и полужабуриков после травления, обезжиривания и нанесения гальванопокрытий. Решение проблемы утилизации таких стоков имеет не только экологическое, но и экономическое значение.

Разработка и внедрение практически бессточной схемы очистки на данных предприятиях и возврат очищенных стоков в систему оборотного водоснабжения позволит снизить затраты на плату за сброс очищенных сточных вод в систему хозяйственно-бытовой канализации и на подпитку оборотной системы водоснабжения технической водой, что уменьшит негативное воздействие на окружающую природную среду [4].

Известно, что для осаждения гидроксидов металлов сточных вод на металлургических предприятиях наиболее универсальным методом является реагентная обработка [5], поэтому на большинстве предприятий очистка загрязненных сточных вод осуществляется именно таким методом, но при этом может не происходить достаточно полное коагулирование воды и удаление ионов металлов. Как правило, применение традиционных реагентов-осадителей приводит к образованию большого количества осадка, возможно увеличение общего содержания воды и, как следствие, невозможность использования ее в обороте без дополнительной ступени доочистки [6, 7].

Применение современных реагентов в технологии обезвреживания сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, позволяет получить высокую степень очистки и возможность создания оборотного цикла водопотребления.

МЕТОДЫ

Примерный качественный и количественный состав реагентов Plexon дает фирма-производитель: Plexon 3315 (смесь N,N-диметилдитиокарбамата натрия и сульфида натрия), Plexon 2210 (водный раствор диметилдитиокарбамата натрия) и Plexon 5020 (смесь полисульфидов натрия, дитионита натрия и гидроксида натрия), а также органический реагент-осадитель Plexon 9015 (смесь полиэтиленимина и дитиокарбамата). Все реагенты представляют собой рас-

твор сильной щелочи и могут использоваться практически на всех промышленных локальных очистных сооружениях металлообрабатывающих предприятий.

Реагенты-осадители фирмы Рlехоп хорошо связывают широкий спектр ионов металлов за счет образования высокостабильных хелатных комплексов, которые меньше растворяются, чем соответствующие гидроксиды металлов. Это особенно важно, когда в сточной воде небольшие концентрации ионов металлов и наличие сложных комплексообразователей. Эти реагенты могут подаваться в систему очистки в непрерывном режиме, периодически или небольшими дозами, но проведенные предварительно эксперименты показали несостоятельность рекомендованных производителем доз, этим и объясняется актуальность и мотивация проведения исследований.

Для определения рабочей (оптимальной) дозы при которой получается практически полное выпадение в осадок ионов тяжелых металлов, необходимо установить эту дозу экспериментально.

Были проведены лабораторные исследования, максимально имитирующие производственные условия с использованием универсальной профессиональной дозирующей системы Diversey (рис. 1), которая была установлена в аттестованной лаборатории кафедры инженерные системы зданий и сооружений Сибирского федерального университета Инженерно-строительного института. При подключении к сточной воде, исходные концентрации которой $\text{Cu(II)} = 60 \text{ мг/дм}^3$; $\text{Ni(II)} = 15 \text{ мг/дм}^3$; $\text{Zn(II)} = 20 \text{ мг/дм}^3$, из дозатора подается готовый рабочий раствор реагента-осадителя, двойное нажатие на кнопку обеспечивает точность дозирования, встроенный индикатор исключает передозировку средства.



Рис. 1. Дозатор реагентов Diversey
Fig. 1. Diversey reagent dispenser

Предварительно модельную сточную жидкость обрабатывали раствором Ca(OH)_2 , затем помещали в емкости и вводили разное количество реагентов. Выдерживали необходимое время контакта для формирования плотного осадка. Остаточную концентрацию определяли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICAP-6500.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты эксперимента позволили получить квадратичные зависимости (рис. 2) и определить оптимальное значение доз реагентов-осадителей, что составило примерно $2,0 - 4,0 \text{ мг/дм}^3$. Для построения гистограмм по эффекту очистки использовали стандартную методику расчета (рис. 3). Очищенная вода вполне удовлетворяет требованиям воды на технологические нужды для приготовления электролита травления и промывки в соответствии с ГОСТ 9.314–90 «Вода для гальванического производства и схемы промывок».

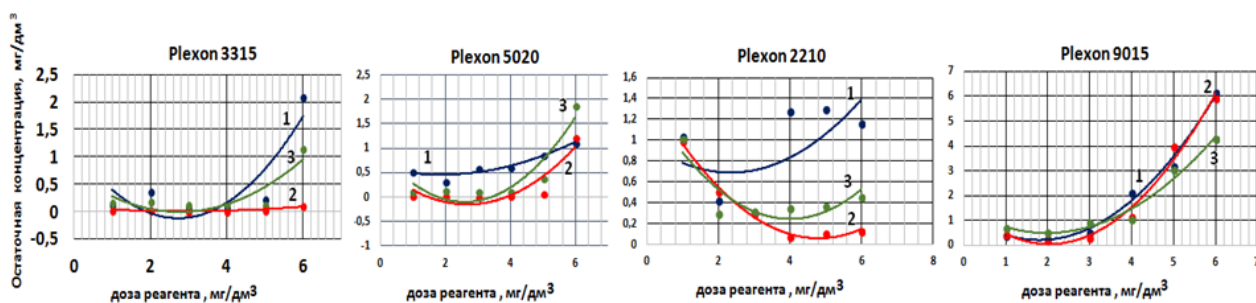


Рис. 2. Влияние дозы реагента на остаточную концентрацию:

1 – медь; 2 – никель; 3 – цинк

Fig. 2. Effect of reagent dose on residual concentration: 1 – copper; 2 – nickel; 3 – zinc

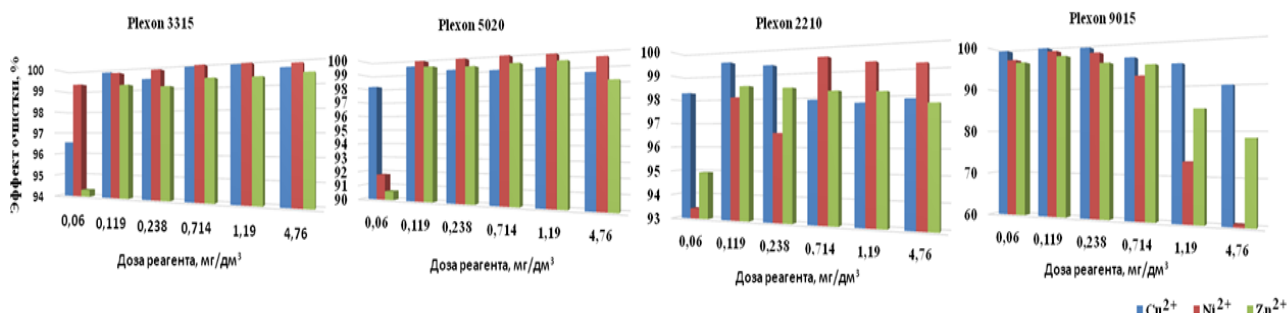


Рис. 3. Гистограммы эффекта очистки

Fig. 3. Histograms of the cleaning effect

Производителем был дан примерный состав реагентов и для уточнения их составов, а также для понимания физико-химического механизма комплексообразований ионов металлов, были получены дифрактограммы образцов реагентов. Дифрактограммы сняты при комнатной температуре на приборе Bruker D8 с линейным детектором VANTEC на $\text{CuK}\alpha$ излучении в диапазоне углов $8-90^\circ$ с шагом $0,014^\circ$ со временем накопления по 1 с на шаг. Уточнение проводилось методом Ритвельда в программе TOPAS 3.

Идентификация фаз производилась по структурным карточкам международной дифракционной базы данных COD Database и Кембриджской базы данных CCDC.

В качестве исходной модели для уточнения были выбраны Acta Crystallographica и Section Crystal Structure Communications [8]. Состав образца реагента Plexon 3315 представлен на дифрактограммах (рис. 4, 5) и в табл. 1.

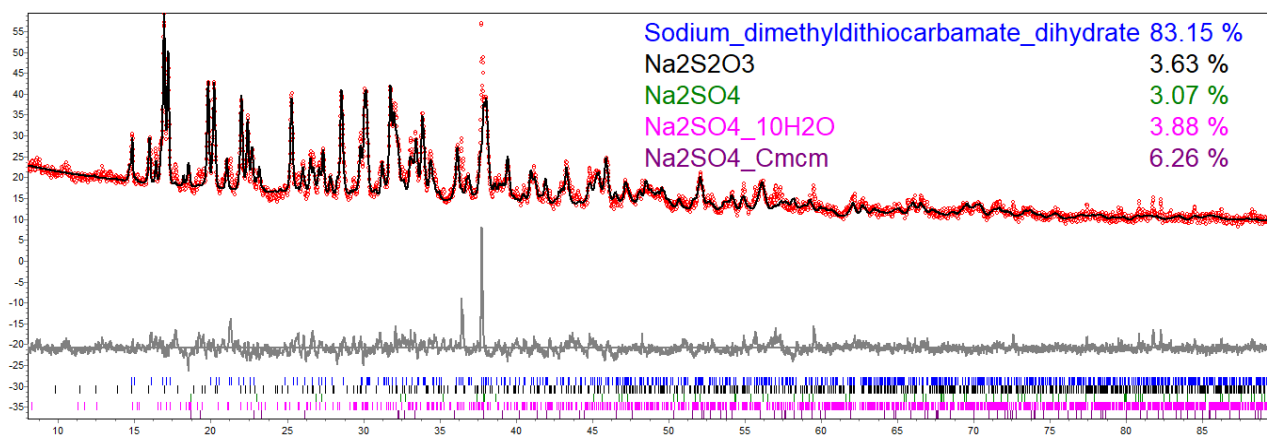


Рис. 4. Рентгенограмма образца реагента Plexon 3315 в программе TOPAS 3

Fig. 4. X-ray diffraction pattern of a sample of Plexon 3315 reagent in the TOPAS 3 program

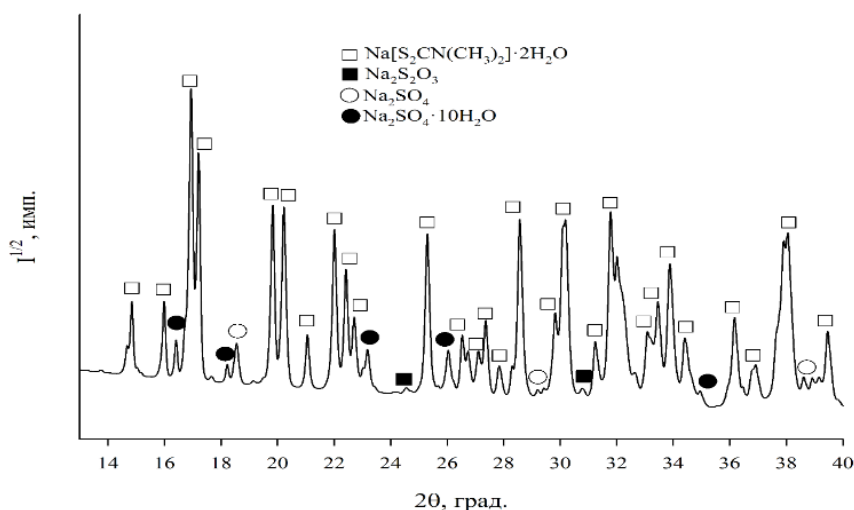


Рис. 5. Фрагмент рентгенограммы с индцированными известными фазами пиками
Fig. 5. Fragment of the X-ray diffraction pattern with peaks indicated by known phases

Таблица 1. Результаты рентгенофазового анализа образца реагента Plexon 3315

Table 1. Results of X-ray phase analysis of a sample of Plexon 3315 reagent

Название соединения	Формула	Содержание, масс. %
N,N-диметилдитиокарбамат натрия Обнаружена двуводная соль (поправка на массу при приготовлении реагента)	$\text{Na}[\text{S}_2\text{CN}(\text{CH}_3)_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	83,152±0,700
Тиосульфат натрия	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	3,632±0,475
Сульфат натрия	Na_2SO_4	9,339±0,709
Сульфат натрия 10-водный	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	3,877±0,302

Также обнаружен один неизвестный компонент смеси, вероятно, это глюконовая кислота, которую используют как добавку в похожих смесях для хелатирования двузарядных катионов металлов [7, 8].

Затем был исследован состав образца реагента Plexon 2210, дифрактограммы которого представлены на рис. 6, 7 и в табл. 2.

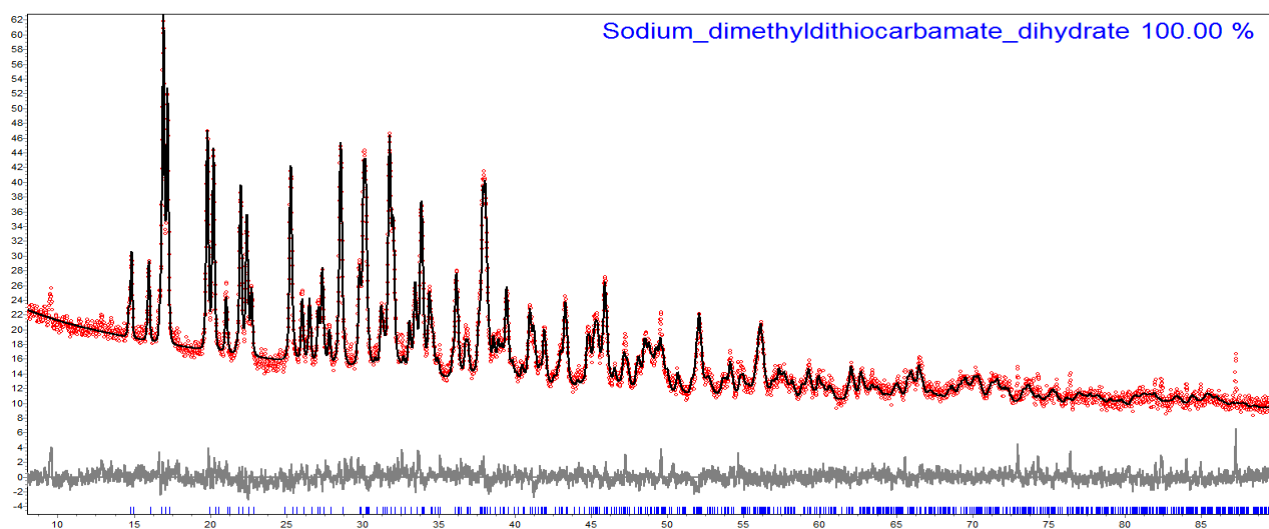


Рис. 6. Рентгенограмма состава образца реагента Plexon 2210 в программе TOPAS 3
Fig. 6. X-ray diffraction pattern of the Plexon 2210 reagent sample in the TOPAS 3 program

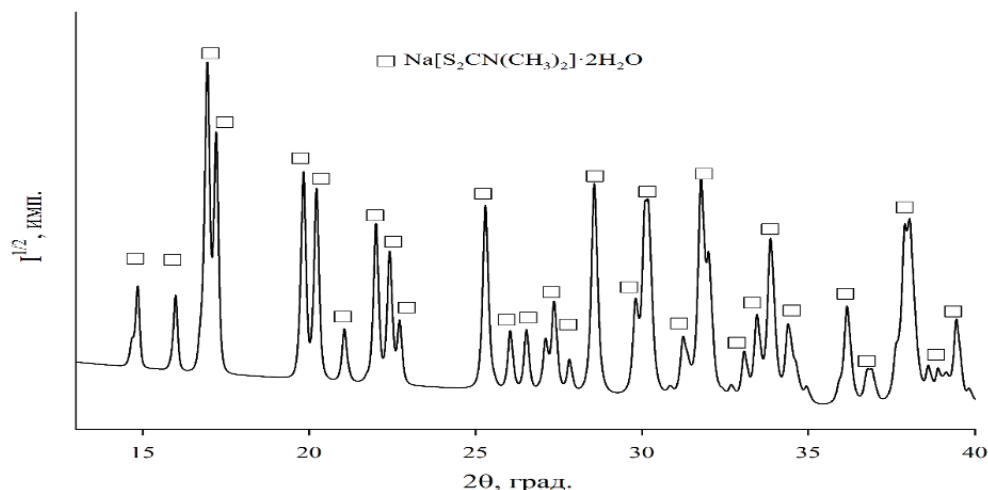


Рис. 7. Фрагмент рентгенограммы с индцированными известными фазами пиками
Fig. 7. Fragment of the X-ray diffraction pattern with peaks indicated by known phases

Таблица 2. Результаты рентгенофазового анализа образца реагента Plexon 2210
Table 2. Results of X-ray phase analysis of a sample of Plexon 2210 reagent

Название соединения	Формула	Содержание, масс. %
N,N-диметилдитиокарбамат натрия двухводный	$\text{Na}[\text{S}_2\text{CN}(\text{CH}_3)_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	90–100
Неизвестный(е) компонент(ы)	—	0–10

Образец практически полностью состоит из основного компонента содержание примесей незначительно. Диметилдитиокарбамат натрия относится к классу органических соединений, известных как органические соли щелочных металлов и относится к веществам четвертого класса опасности.

При осаждении реагентами Plexon 3315 и Plexon 2210 ионов Cu^{2+} , Ni^{2+} и Zn^{2+} получается осадок, легко отделяемый от раствора, но при дозе, подобранной неправильно, наблюдается небольшая опалесценция и незначительный пристеночный эффект.

Plexon 5020 часто используется там, где необходимо эффективно удалить ионы тяжелых металлов из промышленных сточных вод. Состав образца реагента Plexon 5020 представлен на рис. 8, 9 и в табл. 3.

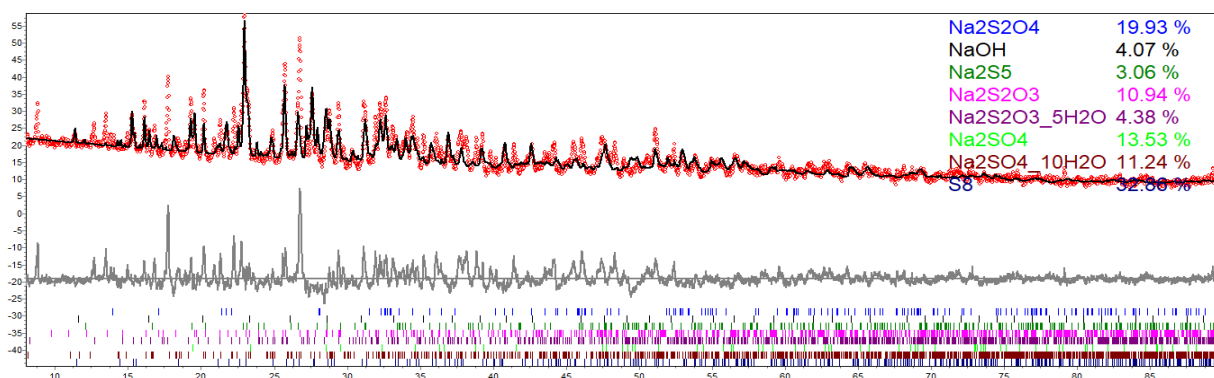


Рис. 8. Рентгенограмма образца реагента Plexon 5020 в программе TOPAS 3
Fig. 8. X-ray diffraction pattern of a sample of Plexon 5020 reagent in the TOPAS 3 program

Результаты проведенного анализа подтвердили наличие дитионита натрия и полисульфида в реагенте Plexon 5020, что дает возможность образования сложных комплексов (возможно амидных комплексов), которые имеют меньшую растворимость, чем соответствующие гидроксиды металлов.

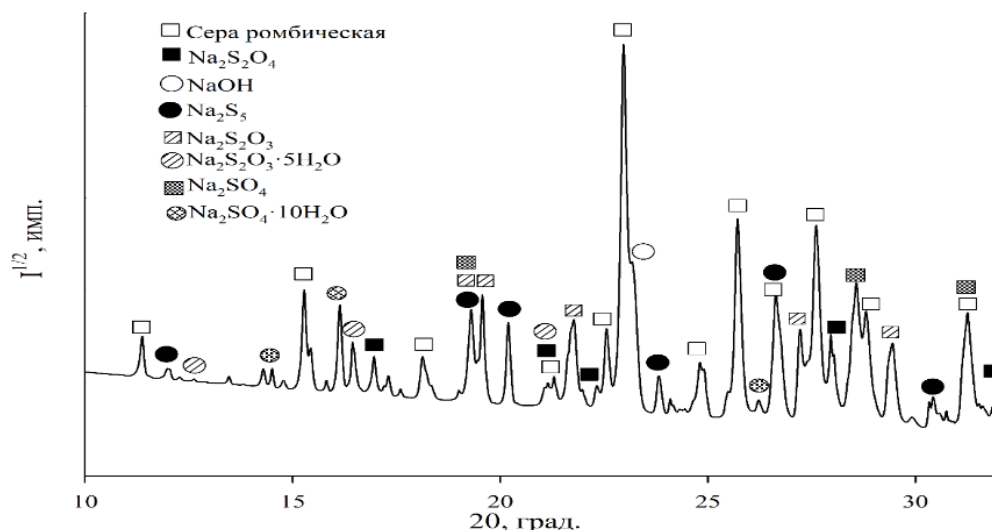


Рис. 9. Фрагмент рентгенограммы с индцированными известными фазами пиками
Fig. 9. Fragment of the X-ray diffraction pattern with peaks indicated by known phases

Таблица 3. Результаты рентгенофазового анализа образца реагента Plexon 5020

Table 3. Results of X-ray phase analysis of a sample of Plexon 5020 reagent

Название соединения	Формула	Содержание, масс. %
Дитионит натрия	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$	19,926±11,064
Полисульфид натрия	Na_2S_5	3,064±0,578
Гидроксид натрия	NaOH	4,067±0,646
Тиосульфат натрия	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	10,937±1,636
Тиосульфат натрия пятиводный	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	4,379±0,913
Сульфат натрия	Na_2SO_4	13,525±3,053
Сульфат натрия 10-водный	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	11,236±1,786
Сера ромбическая	S_8	32,864±4,661

Полученный осадок довольно плотный, всплывает. Подобное действие происходит из-за классического депрессора сульфидов натрия, которые создают предпосылки для флотационной селекции. Такие особенности образования подобных металлосодержащих осадков надо учитывать при разработке схем утилизации подобных стоков гальванического производства.

Органический реагент-осадитель Plexon 9015 на основе полиэтилениминдитиокарбамата, содержание которого порядка 15–50 % не удалось идентифицировать из-за сложности его в пробоподготовке. Полиэтиленимин дитиокарбамат включает два активных компонента, способных к взаимодействию с ионами металлов (II) и может выступать интегральным комплексообразователем, где полиэтиленимин и активные комплексообразующие фрагменты – дитиокарбамат натрия образуют высокомолекулярную матрицу [9, 10]. Известно, что взаимодействие металлов (II) с дитиокарбаматами происходит по донорно-акцепторному механизму, при этом ионы металлов образуют комплекс с четырехчленными циклами [11–15].

Большой объем полученных данных и необходимость сопоставления других авторов потребовало математической обработки полученных значений. В качестве метода обнаружения корреляционных зависимостей был выбран регрессионный анализ.

Сущность метода регрессионного анализа заключается в том, что большое число уравнений (моделей) регрессии, отобранных для описания связей какого-либо явления или процесса, реализуемого с помощью специально разработанного алгоритма перебора с последующей статистической проверкой.

Математическое описание обработки сточных вод представляет собой матрицу планирования, где основные факторы, влияющие на исследуемый процесс и характеризующие его выходные параметры: x_1 – доза реагента, мг/дм³; x_2 – величина pH.

В качестве функций отклика: y_1 – остаточной концентрации ионов меди Cu (II); y_2 – остаточной концентрации ионов меди Ni (II); y_3 – остаточной концентрации ионов меди Zn (II).

Для определения вида зависимости построили эмпирическую линию регрессии y по x и подобрали уравнение регрессии полинома второй степени. Для составления экспериментального плана использовали метод Брандона, его обычно применяют в тех случаях, когда нужно быстро и достаточно точно описать сложный технологический процесс на основе полученных экспериментальных данных, т. е. связать в виде уравнений регрессии влияющие факторы процесса с выходными показателями.

Plexon 3315

$$\hat{y}_1 = 7870,7 \cdot (-2,6018x_1 + 0,4737x_1^2 + 2,1236) \cdot (-7,5202x_2 + 0,4072x_2^2 + 34,715)$$

$$\hat{y}_2 = 0,2205 \cdot (-1,7096x_1 + 0,3191x_1^2 + 1,706) \cdot (-9,099x_2 + 0,5435x_2^2 + 38,681) \dots$$

$$\hat{y}_3 = 0,5144 \cdot (-1,9841x_1 + 0,3507x_1^2 + 1,8999) \cdot (-20,554x_2 + 1,2804x_2^2 + 82,905)$$

Plexon 5020

$$\hat{y}_1 = 0,1037 \cdot (-0,3709x_1 + 0,0889x_1^2 + 1,0806) \cdot (1,4587x_2^2 + 0,0872x_2 + 6,9667)$$

$$\hat{y}_2 = 0,4467 \cdot (-3,0718x_1 + 0,5576x_1^2 + 2,3338) \cdot (-15,76 + 0,5503x_2^2 + 64,735)$$

$$\hat{y}_3 = 0,4333 \cdot (-2,5779x_1 + 0,4319x_1^2 + 1,9135) \cdot (-19,047x_2 + 1,1025x_2^2 + 81,054)$$

Plexon 2210

$$\hat{y}_1 = 0,139 \cdot (0,7614x_1 - 0,1187x_1^2 + 0,5893) \cdot (-5,7047x_2 + 0,3312x_2^2 + 25,08)$$

$$\hat{y}_2 = 2,8183 \cdot (-2,1299x_1 + 0,33775x_1^2 + 1,9625) \cdot (-53,55x_2 + 3,067x_2^2 + 22,853)$$

$$\hat{y}_3 = 0,13569 \cdot (-0,8516x_1 + 0,1654x_1^2 + 1,3254) \cdot (-3,4125x_2 + 0,2003x_2^2 + 15,212)$$

Plexon 9015

$$\hat{y}_1 = 0,1021 \cdot (1,4977x_1 - 0,187x_1^2 + 0,0087) \cdot (0,2402x_2^2 - 4,5707x_2 + 20,627)$$

$$\hat{y}_2 = 0,8579 \cdot (1,7939x_1 - 0,2402x_1^2 + 0,13) \cdot (-1,5707x_2^2 + 28,019x_2 - 122,66)$$

$$\hat{y}_3 = 0,1861 \cdot (1,244x_1 - 0,162x_1^2 + 0,1974) \cdot (0,381x_2^2 - 6,6471x_2 + 29,581)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения экспериментальных исследований было установлено:

1. Уточнены и обоснованы рабочие (оптимальные) дозы исследуемых реагентов фирмы Plexon с целью удаления из сточных вод гальванического производства ионов тяжелых металлов.

2. Полученные дифрактограммы образцов реагентов фирмы Plexon дали понимание механизма комплексообразования ионов металлов каждого из предложенных реагентов в отдельности.

3. Полученные уравнения регрессии показали более значительное влияние первоначальной дозы реагентов фирмы Plexon на остаточную концентрацию ионов металлов в сточной воде и только затем имеет влияние корректировка величины pH.

4. Уравнения регрессии позволяют проводить процесс реагентной обработки сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов в оптимальном режиме.

Результаты проведенных исследований показали хорошую сопоставимость с данными литературных источников.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сколубович Ю.Л., Войтов Е.Л., Цыба А.А. Очистка и утилизация поверхностных сточных вод. М.: Изд-во ACB, 2021. 108 с. EDN: JUUYVB.
2. Попов В.Г., Тягунова В.Г., Диньмухаметова Л.С. Сравнение результатов очистки промышленных сточных вод сложного состава реагентным и гальванокоагуляционным методами // Фундаментальные исследования. 2017. № 1. С. 101–105. EDN: XVLQUN.
3. Курилина Т.А., Пазенко Т.Я., Матюшенко А.И., Журавлев А.С. Об эффективной технологии очистки медьсодержащих сточных вод с применением современного реагента-осадителя // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 5-1. С. 55–61. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.051>. EDN: SNGMLU.
4. Лобанов А.А. Реагентная обработка воды в системе оборотного водоснабжения // Природообустройство. 2011. № 1. С. 87–88. EDN: NUDBWP.
5. Мовчан С.И. Использование реагентов в технологии обработки сточных вод гальванического производства // Строитель Донбасса. 2024. № 1. С. 22–29. EDN: AGXTCN.
6. Павлов Д.В., Вараксин С.О. Разработка и внедрение современных технологий очистки сточных вод гальванического производства // Вода: технология и экология. 2010. № 2. С. 16–26.
7. Халтурина Т.И., Чурбакова О.В., Курилина Т.А. Кондиционирование осадков сточных вод металлообрабатывающих предприятий // Известие высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 9. С. 69–74. EDN: OZICOB.
8. Joshi M.D., Anderson J.L. Recent Advances of Ionic Liquids in Separation Science and Mass Spectrometry. Royal Society of Chemistry. 2012. Vol. 2. P. 5470–5484. <https://doi.org/10.1039/C2RA20142A>.
9. Weissberger A., Proskauer E.S., Riddick J.A., Toops E.E. Organic Solvents: Physical Properties and Methods of Purification. Wiley: New York, 1955. 212 p.
10. Ternova D., Boltoeva M., Cointeaux L., Gaillard C., Kalchenko V., Mazan V. et al. Dramatic Changes in the Solubilities of Ions Induced by Ligand Addition in Biphasic System D2O/DNO3/[C1C4im][Tf2N]: A Phenomenological Study // The Journal of Physical Chemistry B. 2016. Vol. 120. Iss. 30. P. 7502–7510. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b05424>.
11. М.А. Турсунов, Б.Б. Умаров, Синтез и кристаллическая структура комплекса никеля (II) на основе бензоилгидразона метилового эфира 4-фенил-2,4-диоксобутановой кислоты // UNIVERSUM Химия и биология. 2018. №12 (54). С.50-52.
12. Чеботарев В.К. Прогнозирование в титриметрических методах анализа с использованием реакций комплексообразования и осаждения: монография. Барнаул: Изд-во Алтайского государственного университета, 1999. 114 с.
13. Смирнова Н.Н., Смирнов М.Е. Модификация целлюлозного сорбента как инструмент регулирования его кинетических характеристик и сорбционной активности по ионам меди (II) // Сорбционные и хроматографические процессы. 2018. Т. 18. № 1. С. 26–34. EDN: YRTIBJ.
14. Fenglian Fu, Liping Xie, Bing Tang, Qi Wang, Shuxian Jiang Application of a Novel Strategy—Advanced Fenton-Chemical Precipitation to the Treatment of Strong Stability Chelated Heavy Metal Containing Wastewater // Chemical Engineering Journal. 2012. Vol. 189-190. P. 283–287. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.02.073>.
15. Дашевский В.Г., Баранов А.П., Кабачник М.И. Пространственные аспекты образования хелатных комплексов металлов // Успехи химии. 1983. Т. 52. № 2. С. 268–293. <https://doi.org/10.1070/RC1983v052n02ABEH002804>.

REFERENCES

1. Skolubovich Yu.L., Voitov E.L., Tsyba A.A. *Treatment and Disposal of Surface Wastewater*. Moscow: ACB Publishing House, 2021. 108 p. (In Russ.). EDN: JUUYVB.
2. Popov V.G., Tyagunova V.G., Dinmukhametova L.S. Comparison of Chemical and Galvanochemical Techniques for the Industrial Complex Wastewater Treatment. *Fundamental Research*. 2017;1:101-105. (In Russ.). EDN: XVLQUN.
3. Kurilina T.A., Pazenko T.Ya., Matyushenko A.I., Zhuravlev A.S. On Effective Clearing Technology of Copper-Bearing Water with Non-Solvent-Reagent. *International Research Journal*. 2022;5-1:55-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.051>. EDN: SNGMLU.
4. Lobanova A.A. Reagent Water Treatment in the System of Recycling Water Supply. *Environmental Engineering*. 2011;1:87-88. (In Russ.). EDN: NUDBWP.

5. Movchan S.I. The Use of Reagents in The Technology of Galvanic Production's Wastewater Treatment. *The Builder of Donbass*. 2024;1:22-29. (In Russ.). EDN: AGXTCN.
6. Pavlov D.V., Varaksin S.O. Development and Implementation of Modern Technologies for Wastewater Treatment in Galvanic Production. *Voda: tekhnologiya i ekologiya*. 2010;2:16-26. (In Russ.).
7. Khalturina T.I., Churbakova O.V., Kurilina T.A. Conditioning of Wastewater Sludge from Metalworking Plants. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2010;9:69-74. (In Russ.). EDN: OZICOB.
8. Joshi M.D., Anderson J.L. Recent Advances of Ionic Liquids in Separation Science and Mass Spectrometry. *Royal Society of Chemistry*. 2012;2:5470-5484. <https://doi.org/10.1039/C2RA20142A>.
9. Weissberger A., Proskauer E.S., Riddick J.A., Toops E.E. *Organic Solvents: Physical Properties and Methods of Purification*. Wiley: New York, 1955. 212 p.
10. Ternova D., Boltoeva M., Cointeaux L., Gaillard C., Kalchenko V., Mazan V. et al. Dramatic Changes in the Solubilities of Ions Induced by Ligand Addition in Biphasic System D₂O/DNO₃/[C₁C₄im][Tf₂N]: A Phenomenological Study. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2016;120(30):7502-7510. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b05424>.
11. M.A. Tursunov, B.B. Umarov, Synthesis and crystal structure of nickel (II) complex based on benzoylhydrazone of 4-phenyl-2,4-dioxobutanoic acid methyl ester // *UNIVERSUM Chemistry and Biology*. 2018. No. 12 (54). P. 50-52.
12. Chebotarev V.K. *Prediction in Titrimetric Analysis Methods Using Complexation and Precipitation Reactions: Monograph*. Barnaul: Publishing House of the Altai State University, 1999. 114 p. (In Russ.).
13. Smirnova N.N., Smirnov M.E. Cellulose Sorbent Modification as the Regulation Instrument of Its Kinetic Characteristics and Sorption Capacity With Regard To Copper (II) Ions. *Sorption and Chromatography Processes*. 2018;18(1):26-34. (In Russ.). EDN: YRTIBJ.
14. Fenglian Fu, Liping Xie, Bing Tang, Qi Wang, Shuxian Jiang Application of a Novel Strategy—Advanced Fenton-Chemical Precipitation to the Treatment of Strong Stability Chelated Heavy Metal Containing Wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2012;189-190:283-287. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.02.073>.
15. Dashevskii V.G., Baranov A.P., Kabachnik M.I. Spatial Aspects of the Formation of Metal Chelate Complexes. *Russian Chemical Reviews*. 1983;52(2):268-293. (In Russ.). <https://doi.org/10.1070/RC1983v052n02ABEH002804>.

Информация об авторах

Курилин Сергей Сергеевич,
аспирант,
Инженерно-строительный институт Сибирского
федерального университета,
660041, г. Красноярск, пр-кт. Свободный, 82,
Россия,
ведущий инженер отдела тепловодоснабжения,
АО «Востсибнефтегаз»,
660049, г. Красноярск, пр-кт. Мира, д. 36,
Россия,
e-mail: Wiza91@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4805-3342>
Author ID: 1294329

Курилина Татьяна Александровна,
к.т.н., доцент, доцент кафедры инженерные
системы зданий и сооружений,
Инженерно-строительный институт Сибирского
федерального университета,
660041, г. Красноярск, пр-кт. Свободный, 82,
Россия,
✉ e-mail: ctrellok91@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5058-7186>
Author ID: 626385

Information about the authors

Sergey S. Kurilin,
Postgraduate Student,
School of Engineering and Construction of Siberian
Federal University,
82, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia,
Leading Engineer of the Heat and Water Supply
Department,
JSC Vostsibneftegaz,
36, Mira Ave., Krasnoyarsk 660049,
Russia,
e-mail: Wiza91@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4805-3342>
Author ID: 1294329

Tatyana A. Kurilina,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate
Professor of the Department of Engineering
Systems of Buildings and Structures,
School of Engineering and Construction of Siberian
Federal University,
82, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia,
✉ e-mail: ctrellok91@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5058-7186>
Author ID: 626385

Пазенко Татьяна Яковлевна,

к.т.н., доцент, доцент кафедры инженерные
системы зданий и сооружений,
Инженерно-строительный институт Сибирского
федерального университета,
660041, г. Красноярск, пр-кт. Свободный, 82,
Россия,
e-mail: pazenkotat@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8454-3368>
Author ID: 403153

Войтов Евгений Леонидович,

д.т.н., профессор кафедры
водоснабжения и водоотведения,
Новосибирский государственный архитектурно-
строительный университет (Сибстрин),
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113,
Россия,
e-mail: viv@sibstrin.ru
<https://orcid.org/0009-0001-2809-6441>
Author ID: 5229958

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 31.03.2025.
Одобрена после рецензирования 29.04.2025.
Принята к публикации 02.05.2025.

Tatyana Ya. Pazenko,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate
Professor of the Department of Engineering
Systems of Buildings and Structures,
School of Engineering and Construction of Siberian
Federal University,
82, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia,
e-mail: pazenkotat@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8454-3368>
Author ID: 403153

Evgeniy L. Voytov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
of Water Supply and Sanitation,
Novosibirsk State University of Architecture
and Civil Engineering (Sibstrin),
113 Leningradskaya St., Novosibirsk 630008,
Russia,
e-mail: viv@sibstrin.ru
<https://orcid.org/0009-0001-2809-6441>
Author ID: 5229958

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

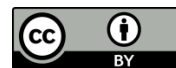
Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 31.03.2025.
Approved after reviewing 29.04.2025.
Accepted for publication 02.05.2025.



Новая технология сокращения и утилизации концентратов установок обратного осмоса путем создания условий для кристаллизации малорастворимых солей в каналах аппаратов

А.Г. Первов¹, Д.В. Спицов^{2✉}, М.И. Саид Ахмад³

^{1,2,3}Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

Аннотация. Образование осадков малорастворимых солей на мембранах и сброс концентрата всегда были проблемами для разработки и усовершенствования установок обратного осмоса. Отложения также являются основной причиной, которая не позволяет увеличить извлечение и сократить сброс концентрата, поскольку образование труднорастворимых солей из-за пересыщения отрицательно влияет на производительность мембраны. В статье представлены результаты исследований, основанные на изучении теории образования отложений и кристаллизации, которые позволяют обеспечить эффективный контроль за образованием и ростом кристаллов. В результате была разработана новая технология, которая позволяет сократить расход концентрата в 20–100 раз без образования отложений малорастворимых солей на мембранах и без применения реагентов. Карбонат кальция и сульфат кальция осаждаются без использования реагентного умягчения за счет создания пересыщения благодаря концентрированию исходной воды в каналах аппаратов. Такая безреагентная технология разработана при помощи нанофильтрационных мембран с низкой селективностью. Представлены результаты экспериментов, которые демонстрируют условия, необходимые для начала процесса зародышеобразования в потоке концентрата, и позволяют определить скорости зародышеобразования и роста кристаллов. Представлены примеры применения новой технологии для опреснения подземных и морских вод. Технология позволяет не только сократить сброс концентрата, но и разделить его на ряд концентрированных растворов. Приведено экономическое сравнение новой разработанной технологии, используемое при обработке подземных вод.

Ключевые слова: обратный осмос, нанофильтрация, очистка сточных вод, схемы очистки воды с применением мембран, осадкообразование на мембранах

Для цитирования: Первов А.Г., Спицов Д.В., Саид Ахмад М.И. Новая технология сокращения и утилизации концентратов установок обратного осмоса путем создания условий для кристаллизации малорастворимых солей в каналах аппаратов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 477–500. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-477-500>. EDN: PXEBAO.

Original article

A new technology for reducing and disposing of concentrates from reverse osmosis plants by creating conditions for the crystallization of insoluble salts in the channels of the devices

Alexei G. Pervov¹, Dmitriy V. Spitsov^{2✉}, Murat I. Saeed Ahmad³

^{1,2,3}Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

Abstract. Precipitation of poorly soluble salts on membranes and discharge of concentrate have always been problems for the development and improvement of reverse osmosis plants. Deposits are also the main reason that prevents increased extraction and reduced discharge of concentrate, since the formation of insoluble salts due to supersaturation negatively affects the membrane performance.

© Первов А.Г., Спицов Д.В., Саид Ахмад М.И., 2025

The article presents the results of research based on the study of the theory of sedimentation and crystallization, which make it possible to ensure effective control over the formation and growth of crystals. As a result, a new technology has been developed that makes it possible to reduce concentrate consumption by 20-100 times without the formation of deposits of insoluble salts on membranes and without the use of reagents. Calcium carbonate and calcium sulfate are precipitated without the use of a softening reagent due to the creation of supersaturation due to the concentration of source water in the channels of the apparatus. This non-reactive technology has been developed using nanofiltration membranes with low selectivity. The results of experiments are presented, which demonstrate the conditions necessary for the start of the nucleation process in the concentrate stream, and allow us to determine the rates of nucleation and crystal growth. The application of a new technology for desalination of groundwater and marine waters is presented. The technology allows not only to reduce the discharge of concentrate, but also to divide it into a number of concentrated solutions. An economic comparison of the newly developed technology used in groundwater treatment is given.

Keywords: reverse osmosis, nanofiltration, wastewater treatment, water purification schemes using membranes, sedimentation on membranes

For citation: Pervov A.G., Spitsov D.V., Saeed Ahmad M.I. A new technology for reducing and disposing of concentrates from reverse osmosis plants by creating conditions for the crystallization of insoluble salts in the channels of the devices. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):477-500. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-477-500>. EDN: PXEBAO.

ВВЕДЕНИЕ

Начало этого исследования относится ко времени, когда обратный осмос (ОО) и мембранные технологии только начинали развиваться. В то время основными задачами исследований были две проблемы: образование кристаллических отложений и наличие концентрированных сбросов. Эти два основных недостатка всегда делали ОО неконкурентоспособным в производстве питьевой воды. Образование отложений также является основной причиной, которая не позволяет сократить сброс концентрата, поскольку образование малорастворимых солей вследствие концентрирования и пересыщения ведет к снижению производительности мембран.

Поскольку опасность осадкообразования не позволяет сократить расход концентрата, исследование было сосредоточено на изучении теории образования осадков малорастворимых в воде солей и вопросах кристаллизации, которые могут обеспечить эффективный контроль за образованием и ростом кристаллов. В данной статье описываются основные этапы длительного исследования, направленного на предотвращение образования осадков сульфата и карбоната кальция, а также возможности сокращения, ликвидации и утилизации сбросов концентрата водоочистных мембранных установок, используемых для обессоливания подземных и морских вод [1].

Сегодня многие установки ОО успешно используются в практике производства питьевой воды для опреснения солоноватых подземных

и морских вод. Стоит отметить, что существует проблема контроля осадкообразования, что отражается в высоких эксплуатационных расходах на закупку электроэнергии и реагентов, а также на сброс сточных вод. Результаты исследований, приведенных в данной статье, предлагают новое решение, которое обеспечивает радикальное снижение концентрата за счет осаждения избыточного кальция в виде карбоната кальция и сульфата кальция и гарантируют работу без реагентов.

Технология является результатом использования нанофильтрационных мембран с низкой селективностью (НФ) и знаний основных законов теории процесса кристаллизации:

- применение низкоселективных нанофильтрационных мембран для достижения высокой величины общего концентрата (рассола);
- разработка рулонных мембранных аппаратов с открытым каналом;
- теория кристаллизации и образование кристаллов.

В статье описываются основные этапы исследования механизма осаждения малорастворимых солей в мембранных каналах и влияния на этот процесс пересыщения [2–5]. Связь между степенью пересыщения, эффективностью ингибитора, скоростью зародышеобразования и размерами кристаллов играет важную роль в понимании того, как контролировать зародышеобразование и рост кристаллов. Эта зависимость легла в основу разработки технологии для контроля образования

кристаллов, условий роста и осаждения кристаллов в потоке концентрата и реакторах осаждения/седиментации осадка. Для кристаллов осадка важно знать соотношение между размером зародышей и скоростью их роста, чтобы обеспечить быстрый рост и осаждение. Были исследованы основные параметры процесса: скорости зародышеобразования и роста, пересыщение и влияние ингибитора. Образование отложений является одной из основных причин, по которой не было достигнуто высоких показателей восстановления в ОО, поскольку повышенное пересыщение и осаждение труднорастворимых солей резко ухудшают производительность мембраны [6, 7]. Хорошо известным традиционным решением для радикального снижения осадкообразования является нулевой сброс кон-

центрата (Zero Liquid Discharge), процесс, использующий полное удаление ионов кальция из исходной воды или концентрата [3].

Известно, что интенсивность образования карбонатных отложений на мембранах во многом зависит от гидравлических условий и конструкции мембранного канала [1]. Наличие застойных зон и неравномерное распределение потока по поверхности мембраны приводят к развитию концентрационной поляризации. Трубчатые мембранные модули, а также устройства фильтр-прессного типа, обычно демонстрируют меньшую тенденцию к образованию осадков, чем рулонные мембранные элементы. Это объясняется наличием в мембранных каналах сетки-турбулизатора, которая является ловушкой для частиц и увеличивает гидравлическое сопротивление (рис. 1).

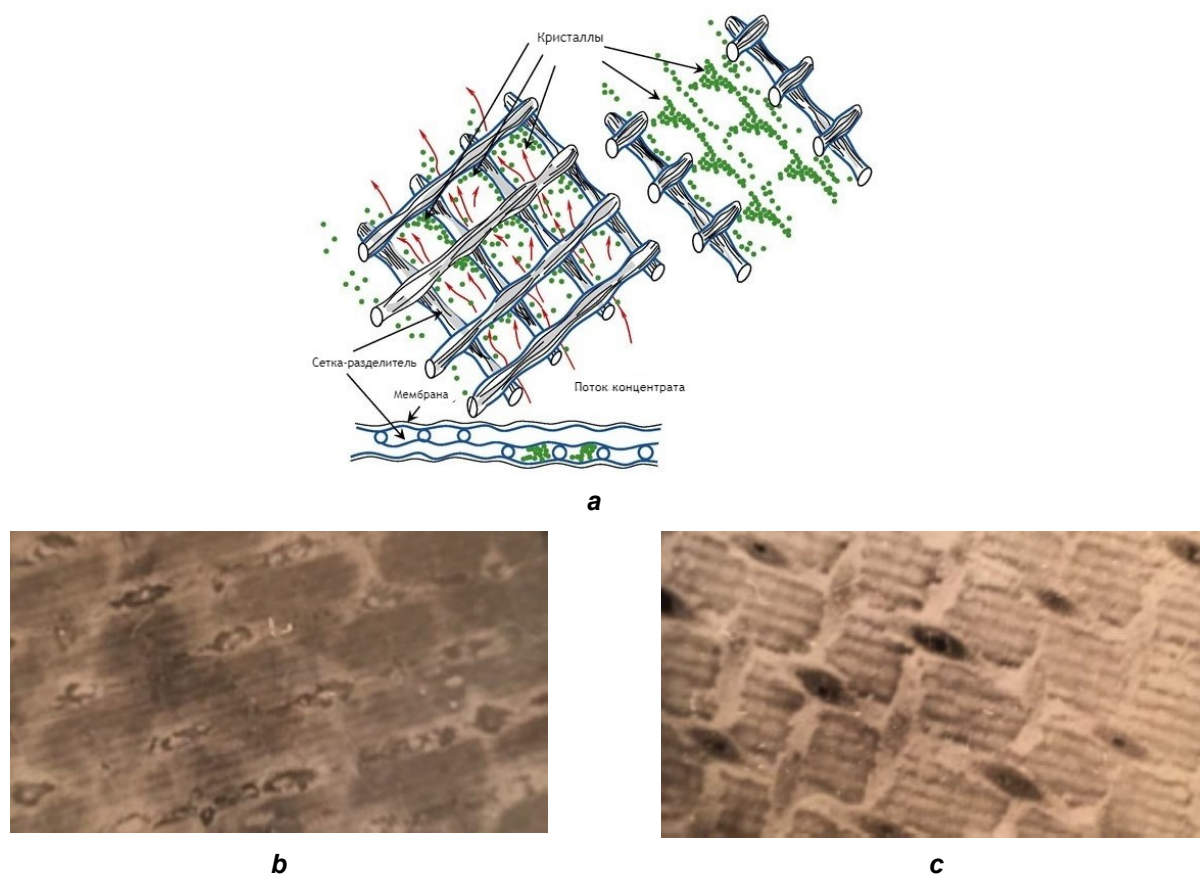


Рис. 1. Образование застойных зон в мембранном канале рулонных мембранных аппаратов:
а – образование застойных зон в местах соприкосновения сетки-разделителя с поверхностью мембраны; б – поверхность мембраны в начале процесса образования отложений, образовавшиеся зародыши оседают на поверхности мембраны;
с – поверхность мембраны, покрытая кристаллами карбоната кальция, в узлах сетки-разделителя видны скопления кристаллов

Fig. 1. Formation of dead areas in membrane channel of spiral wound module: а – formation of dead areas in the spots where the spacer mesh touches the membrane surface; б – membrane surface at the beginning of scaling process: the formed nuclei settle on the membrane surface;
с – membrane surface covered by calcium carbonate crystals: clusters of crystals are visible in the spacer nodes

Поэтому первым шагом в исследовании стала разработка рулонного мембранного элемента с каналом, в котором исключено образование застойных зон и минимизировано их влияние на производительность мембраны. В результате была разработана и внедрена в практику новая конструкция открытого канала [7]. Эксплуатация новых аппаратов показала, что они менее чувствительны к образованию отложений. Также было продемонстрировано снижение расхода ингибиторов и моющих растворов (рис. 2). Внедрение модулей с открытым каналом также позволило достичь высоких показателей по кратности концентрирования исходной воды в аппаратах и снижению расходов концентратов (рис. 3). Новые мембранные установки оснащены дополнительным блоком, который содержит модули с открытым каналом, используемые для снижения расхода концентрата. Модули с открытым каналом изготавливаются с использованием нанофильтрационных мембран с низкой селективностью, которые обеспечивают большую устойчивость к образованию кристаллических отложений. Пермеат этих модулей возвращается обратно на вход в установку,

так как его ионный состав и величина общего солесодержания приближаются к показателям исходной воды. Таким образом, расход концентрата снижается. На рис. 4 показаны мембранные установки ОО и дополнительные блоки, в которых используются нанофильтрационные мембраны 4040 с открытыми каналами. Дальнейшее снижение потока концентрата требует удаления кальция, так как в мембранном канале ожидается спонтанное образование кристаллов (зародышеобразование) из пересыщенного раствора концентрата. Технология была разработана с использованием реактора, в который подавался концентрат [8, 9] и добавлялись затравочные кристаллы (рис. 5).

Затравочные кристаллы получали путем добавления щелочи к концентрату – аналогично процессу реагентного умягчения. Затравочные кристаллы помещались в реактор и росли за счет пересыщения, достигаемого в циркулирующем потоке концентрата. Последняя стадия работала в режиме циркуляции, где концентрация кальция непрерывно росла, а избыточный кальций потреблялся растущими кристаллами [2, 9].

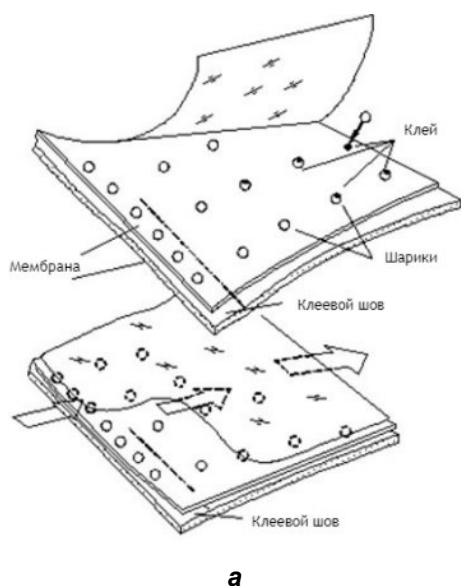


Рис. 2. Принципы построения и работы мембранного элемента с открытым каналом:
a – поток концентрата в открытом канале, образованном пластиковыми шариками, приклеенными к мембране; b – фотография мембраны с приклеенными шариками
Fig. 2. Principles of construction and operation of the open channel: a – concentrate flow in an open channel formed by plastic balls glued to the membrane; b – photograph of the membrane with glued balls

Последней разработкой, которая позволила достичь того же эффекта, что и технология нулевого сброса, стало инициирование и образование затравочных кристаллов в потоке путем поддержания уровня пересыщения, до-

статочного для начала зародышеобразования. Трудность состояла в том, что чем выше пересыщение, тем мельче кристаллы, образующиеся при гомогенном зародышеобразовании в потоке [1].

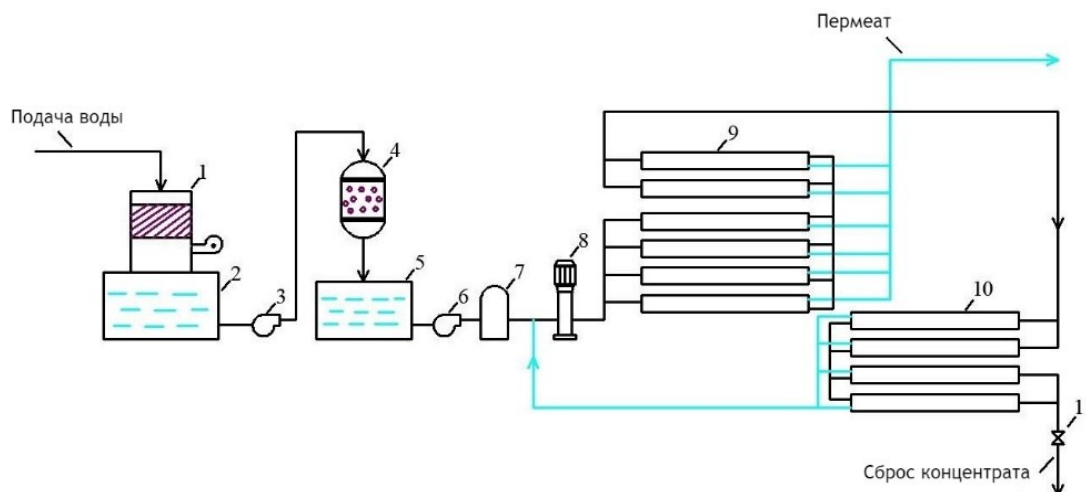


Рис. 3. Схема обратноосмотической мембранной установки для достижения высоких показателей извлечения: 1 – аэрационная колонна; 2 – емкость для сбора аэрированной воды; 3 – питательный насос; 4 – гранулированный скорый фильтр; 5 – емкость для сбора осветленной воды; 6 – подкачивающий насос; 7 – картриджный предфильтр; 8 – насос высокого давления; 9 – мембраны обратного осмоса на первой ступени; 10 – модули открытого канала второй ступени с нанопольтрационными мембранами; 11 – клапан регулирования давления

Fig. 3. Schematic diagram of a reverse osmosis membrane unit for achieving high extraction rates: 1 – aeration column; 2 – aerated water collection tank; 3 – feed pump; 4 – granular rapid filter; 5 – clarified water collection tank; 6 – booster pump; 7 – cartridge prefilter; 8 – high-pressure pump; 9 – first-stage reverse osmosis membranes; 10 – second-stage open channel modules with nanofiltration membranes; 11 – pressure regulating valve



Рис. 4. Мембранные установки, оснащенные мембранами обратного осмоса 8040 и модулями открытого канала 4040 для снижения расхода концентрата и повышения извлечения
Fig. 4. Membrane units equipped with 8040 reverse osmosis membranes and 4040 open channel modules to reduce concentrate consumption and increase recovery

Использование ингибиторов также усложняет образование затравочных кристаллов в потоке концентрата [7, 10–12]. Кристаллам малого размера требуется очень много времени для роста и осаждения. Решение было найдено благодаря внедрению модулей с открытыми каналами, которые позволяют осаждаться взвешенным частицам и кристаллам без увеличения сопротивления потоку из-за накопления загрязняющих веществ. Этого

можно достичь, в отличие от обычных мембранных аппаратов рулонной конструкции, где сетка-турбулизатор улавливает взвешенные частицы, увеличивающие сопротивление потоку. На рис. 6 показаны кристаллы карбоната кальция, образующиеся в потоке концентрата, и кристаллы, удаленные из мембранного канала с применением гидравлической промывки, после их образования и кратковременного роста.

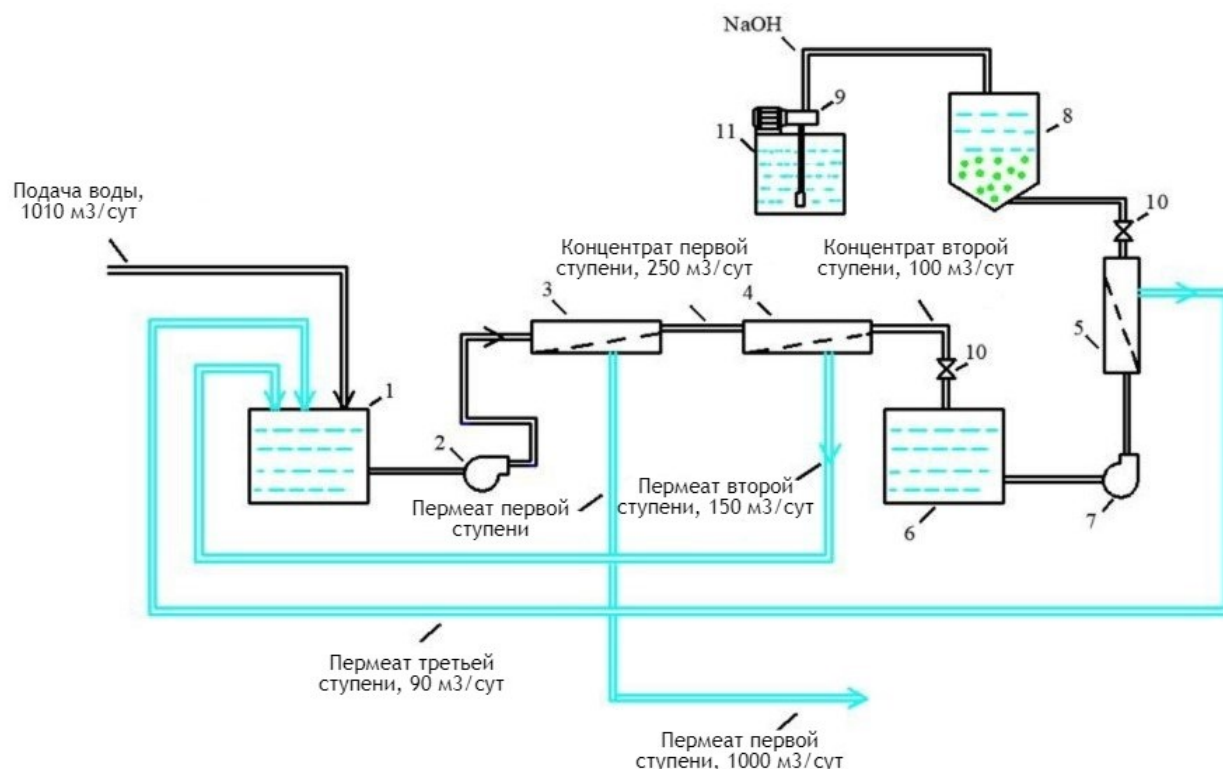


Рис. 5. Технологическая схема новой предлагаемой технологии снижения расхода концентрата с использованием реактора с затравочными кристаллами:

1 – бак исходной воды; 2 – насос высокого давления; 3 – обратноосмотические мембраны первой ступени; 4 – мембрана NF второй ступени для снижения расхода концентрата; 5 – модуль открытого канала третьей ступени с мембранами NF; 6 – емкость для сбора концентрата; 7 – насос третьей ступени; 8 – затравочный реактор для осаждения карбоната кальция; 9 – насос-дозатор каустика; 10 – емкость с каустиком; 11 – клапан регулирования давления

Fig. 5. Flow chart of the new proposed technology for reducing concentrate consumption using a reactor with seed crystals: 1 – feed water tank; 2 – high-pressure pump; 3 – reverse osmotic membranes of the first stage; 4 – second-stage NF membrane for reducing concentrate consumption; 5 – third-stage open channel module with NF membranes; 6 – concentrate collection tank; 7 – third-stage pump; 8 – seed reactor for calcium carbonate precipitation; 9 – caustic dosing pump; 10 – caustic tank; 11 – pressure regulating valve

МЕТОДЫ

Для создания условий, требующихся для начала процесса зародышеобразования, необходимо иметь экспериментальные данные, позволяющие определить уровень пересыщения.

Представлены экспериментальные результаты, которые оценивают значение пересыщения как произведение значений концентрации ионов кальция и сульфата, умноженное на значения их коэффициентов активности и деленное на значение произведения растворимости. Коэффициенты активности определялись как функция значений ионной силы.

Лабораторные эксперименты включали три серии испытаний:

1. Получение затравочных кристаллов. Зародышеобразование карбоната кальция в потоке и смывание кристаллов, их осаждение и рост в контакте.

2. Рост затравочных кристаллов в концентрате. Оценка скорости роста карбоната кальция при увеличении извлечения.

3. Осаждение сульфата кальция из концентрата после опреснения морской воды. Оценка условия пересыщения зародышеобразования. Оценка скорости роста сульфата кальция при увеличении извлечения. Эксперименты проводились с использованием лабораторной испытательной мембранной установки.

Схема работы мембранной испытательной установки представлена на рис. 7.

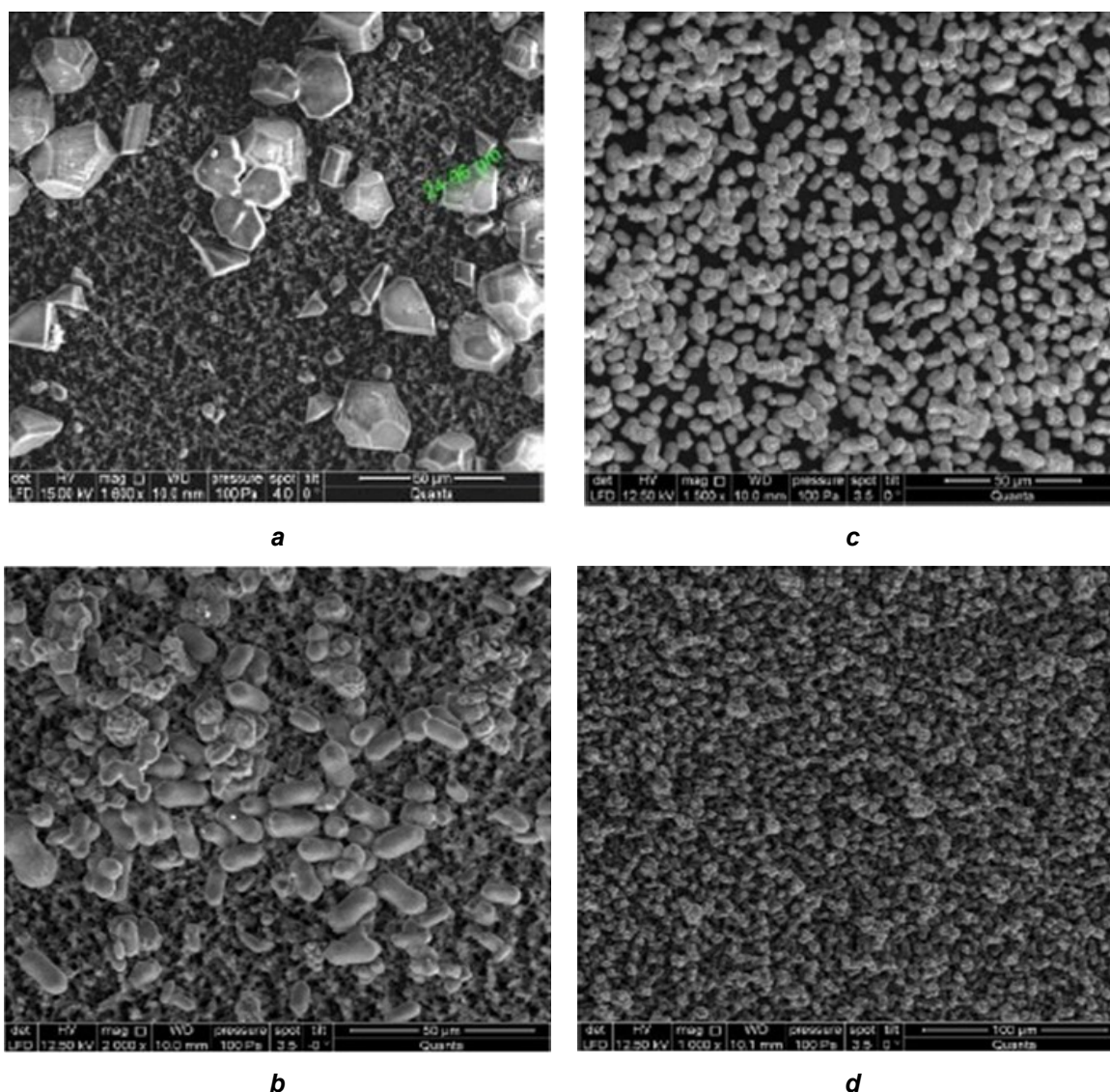


Рис. 6. Кристаллы, вымываемые из мембранного канала: а – кристаллы, образовавшиеся без добавления ингибитора; б – доза ингибитора 2 мг/дм³; в – доза ингибитора 5 ppm; д – доза ингибитора 10 мг/ дм³

Fig. 6. Crystals washed out of the membrane channel: a – crystals formed without adding antiscalant; b – antiscalant dose of 2 mg/dm³; c – antiscalant dose of 5 ppm; d – antiscalant dose of 10 mg/dm³

Работа испытательной установки осуществлялась в режиме рециркуляции. Исходная вода (подземные воды Московской области) помещалась в бак исходной воды, а затем насосом подавалась в мембранный модуль.

В мембранном модуле исходная вода разделялась на пермеат (вода, прошедшая через мембрану) и концентрат (вода, содержащая все отфильтрованные примеси). Объем бака составлял 50 л. Использовался роторный насос, обеспечивающий подачу 160–200 л в час при давлении 16 бар. Эксперименты по зародышеобразованию карбоната кальция проводились с использованием об-

разца грунтовых вод, отобранных в Московской области. Концентрация кальция в образце воды составила 4,6 мг-экв/дм³, а содержание щелочности – 6,1 мг-экв/дм³. Значение солесодержания составило 760 мг/дм³.

На первом этапе был получен концентрат ОО с использованием мембранного элемента 1812 BLN, который был помещен в сосуд под давлением для очистки исходной грунтовой воды.

В исходную воду добавляли реагент (Аминат-К). Доза антискаланта составляла 5 мг/дм³. Исходная вода поступала из емкости 1 в мембранный модуль с помощью насоса. Давление составляло 12 бар.

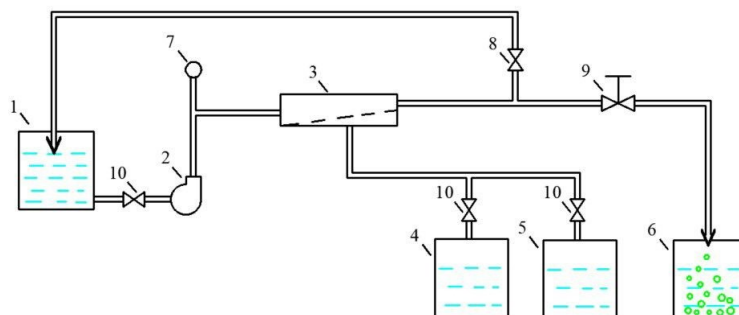


Рис. 7. Технологическая схема опытной установки: 1 – бак исходной воды; 2 – рабочий насос; 3 – мембранный аппарат; 4 – бак сбора пермеата (степень извлечения до 0,9); 5 – бак сбора пермеата (степень извлечения от 0,9 до 0,98); 6 – бак сбора концентрата после гидравлической промывки; 7 – манометр; 8 – регулирующий вентиль; 9 – кран сброса давления при гидравлической промывке; 10 – шаровые краны
Fig. 7. Flow chart of the pilot plant: 1 – feed water tank; 2 – pump; 3 – membrane module; 4 – product water collection tank (extraction rate up to 0.9); 5 – product water collection tank (extraction rate from 0.9 to 0.98); 6 – wash water collection and crystal precipitation tank; 7 – pressure gauge; 8 – pressure control valve; 9 – wash valve; 10 – product water valves

Пермеат мембраны обратного осмоса собирался в резервуаре 3. Значение восстановления составило 80 %, что соответствовало начальному значению коэффициента уменьшения объема воды K , равному 5. Значения концентрации ионов и начального коэффициента уменьшения объема K определялись на протяжении всего цикла испытаний. Начальный коэффициент уменьшения объема K определяется как отношение количества исходной воды в резервуаре 1 в начале эксперимента к объему в резервуаре концентрата 1 в определенный момент эксперимента. Использовались мембранные элементы стандартной модели 1812. Элементы с низконапорными обратноосмотическими мембранами (модель BLN 1812, селективность по соли 95–96 %) и низкоселективными нанофильтрационными мембранами (модель 70 NE 1812, селективность по соли 70 %) были поставлены компанией Toray. Для отделения и осаждения сульфата кальция из морской воды была создана специально подготовленная имитация, соответствующая составу воды из Персидского залива, концентрированная с помощью обратноосмотических мембран до значения солевого содержания 60 000 мг/дм³. Концентрация кальция составила 23 мг-экв/дм³, сульфата – 55 мг-экв/дм³, магния – 112 мг-экв/дм³, хлорида – 580 мг-экв/дм³, хлорида – 500 мг-экв/дм³. Концентрации кальция и магния определялись трилонометрическим методом.

Определение концентрации сульфат-ионов проводилось турбидиметрическим методом. Концентрации ионов натрия определялись методом атомной адсорбции, а сухой

остаток – весовым методом. Значения электропроводности, солевого содержания и температуры определялись с помощью лабораторного кондуктометра модели Cond. 730 9WNW. Значения pH определялись с помощью лабораторного pH-метра HI 2215.

Фотографии кристаллов с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) были сделаны во время тестовых запусков и роста кристаллов. Кристаллы образовывались из-за высокого пересыщения в транзитном потоке в мембранных каналах и частично осаждались на поверхности мембраны. К концу каждой серии экспериментов была организована процедура гидравлической промывки мембраны. Для начала промывки открывался клапан регулирования давления концентрата 10, после чего следовало быстрое падение давления и увеличение транзитного потока. Таким образом, образовавшиеся и осажденные мембранные кристаллы выносились концентратом в емкость для концентрата 4. Затем суспензию кристаллов после осаждения фильтровали через мембранный микрофильтр MFAS-OS-3. Затем осажденные кристаллы промывали дистиллированной водой и высушивали при температуре 50 °C. Затем кристаллы исследовали с помощью методов СЭМ. Использовался сканирующий электронный микроскоп с термоэмиссионным катодом Quanta 250 FEI Company, а затем дисперсия энергии (GENESIS APEX 2 EDS System с APOLLO X SDD EDAX). Микроскопические наблюдения проводились с использованием потенциометров 12,5 и 15 кВ в режиме низкого вакуума. Дальнейший анализ средних значе-

ний кристаллов и оценка общего количества осажденного кальция позволили разработать зависимости скорости зародышеобразования

и роста кристаллов от пересыщения. Рост и снижение концентрации кальция в ходе эксперимента показаны на рис. 8а.

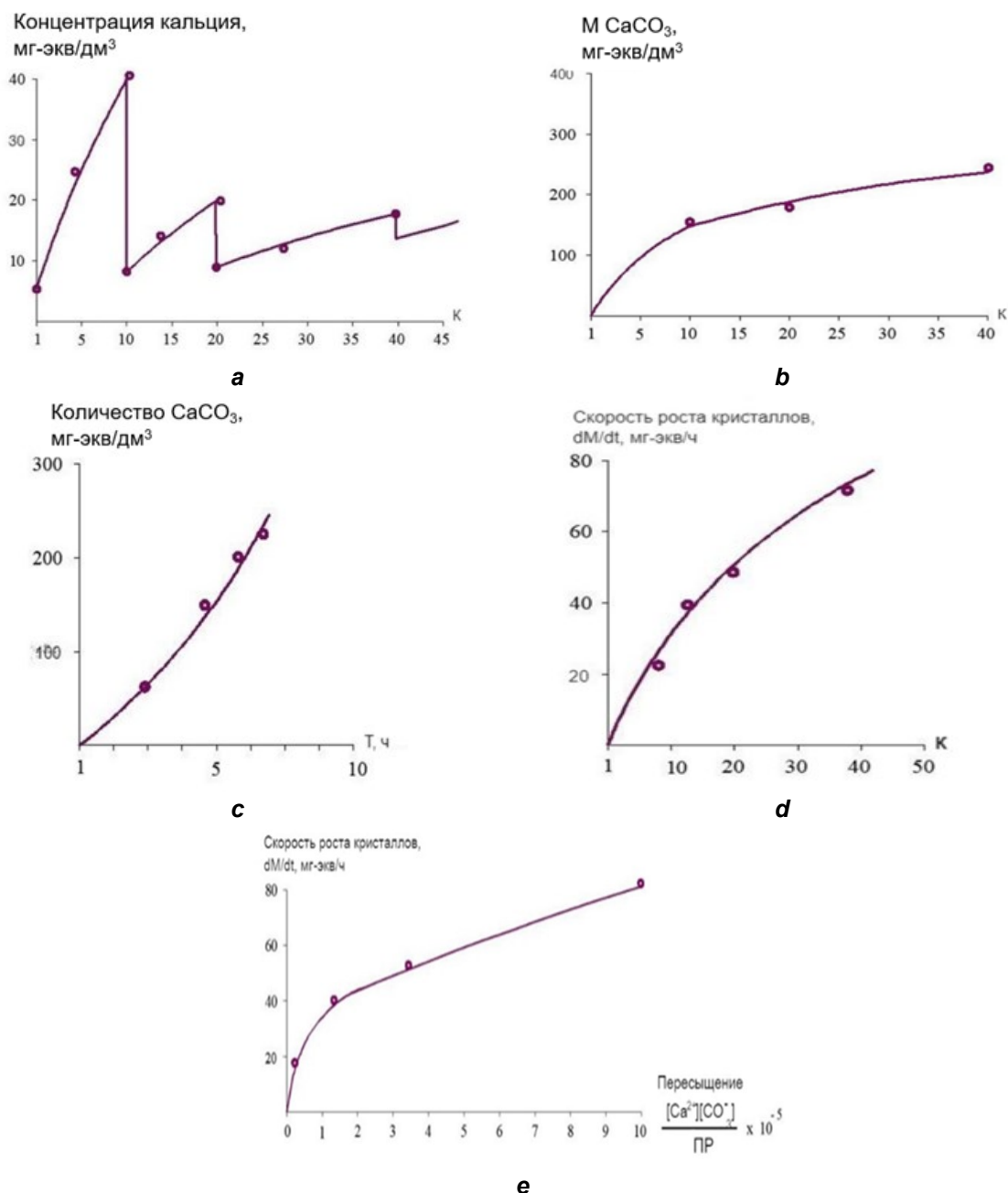


Рис. 8. Результаты экспериментов с образованием карбоната кальция в потоке концентрата. Оценка скоростей роста карбоната кальция: а – изменение концентрации ионов кальция в зависимости от значения K ; б – масса накопленного карбоната кальция в зависимости от значения K ; с – масса накопленного карбоната кальция в зависимости от времени; д – рассчитанные значения скорости роста кристаллов в зависимости от значения K ; е – значения скорости роста кристаллов в зависимости от пересыщения раствора карбонатом кальция

Fig. 8. Results of experiments with the formation of calcium carbonate in the concentrate flow. Estimation of the growth rates of calcium carbonate: а – change in the concentration of calcium ions depending on the K value; б – the mass of accumulated calcium carbonate depending on the K value; с – the mass of accumulated calcium carbonate depending on time; д – calculated values of the crystal growth rate depending on the K value; е – values of the crystal growth rate depending on the supersaturation of the solution with calcium carbonate

Эксперименты включали в себя концентрирование концентрата морской воды в режиме рециркуляции с использованием нанофильтрационных мембран с низкой задерживающей способностью [12–14]. В качестве исходной воды использовалась специально подготовленная имитация концентрата морской воды.

Основной целью использования нанофильтрационных мембран является их плохая задерживающая способность по отношению к одновалентным ионам, особенно при высоких значениях солесодержания, и их высокая задерживающая способность по отношению к двухвалентным ионам. Таким образом, становится возможным отделить ионы кальция, магния и сульфата от ионов натрия и хлорида, увеличить концентрацию ионов кальция и

сульфата сверх значений их производства растворимости. Была приготовлена имитация концентрата морской воды со значением солесодержания $60\,000\text{ мг/дм}^3$. Имитационный раствор был помещен в резервуар исходной воды. Для обработки концентрата морской воды применялись мембраны 70 NE (Togay) и nanoNF (Membranium).

Целью использования двух типов мембран было сравнение их характеристик для выбора наиболее эффективной.

На рис. 9 показаны значения концентрации ионов кальция, магния, натрия, сульфата и хлорида как в концентрате, так и в пермеате, в ходе экспериментов с мембранами nanoNF и 70NE. Зависимости снижения производительности мембранных элементов от К представлены на рис. 10.

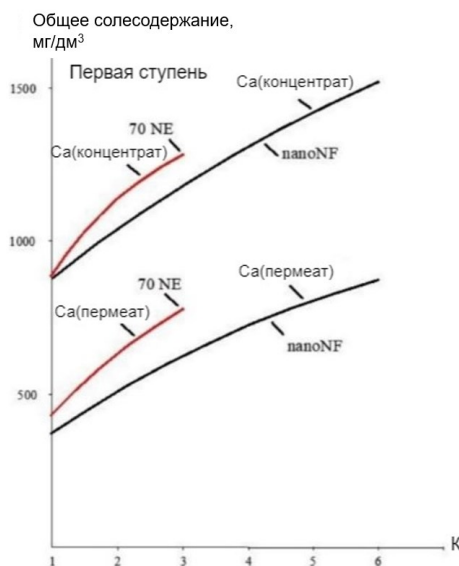


Рис. 9. Зависимости селективностей мембран 70NE и NanoNF по ионам кальция
Fig. 9. Dependences of selectivity of 70NE and NanoNF membranes on calcium ions

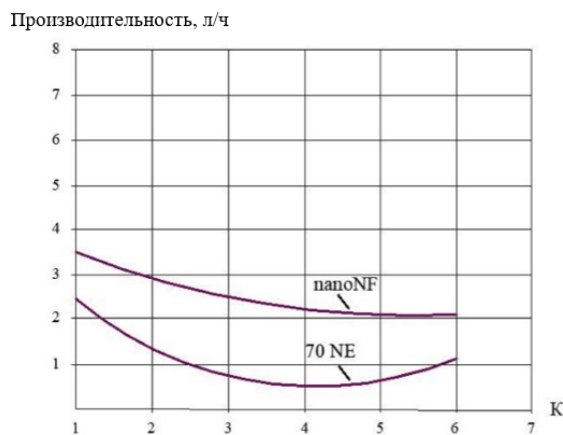


Рис. 10. Зависимости снижения производительности мембранных элементов 70NE и NanoNF в процессе обработки концентрата на каждой ступени
Fig. 10. Dependences of the decrease in the performance of membrane elements 70NE and NanoNF during concentrate processing at each stage

В сериях экспериментов было достигнуто сокращение объема исходной воды в шесть раз ($K = 6$). Концентрат после обработки собирался в бак.

Концентрат обрабатывался на установке: обработка производилась в циркуляционном режиме, объем был сокращен до 2,5 л (что соответствует значению $K = 8$).

В процессе увеличения значения с 6 до 8 в циркулирующем растворе наблюдалась опалесценция. При достижении значения $K = 8$ проводилась промывка со сбросом давления, в результате которой с поверхности мембран срывались образованные в потоке и осажденные кристаллы. Попадая в раствор с зародышевыми кристаллами, дополнительно удаленные с мембран кристаллы действуют как кристаллы затравки, вызывая быстрый рост и укрупнение кристаллов, а также их быстрое осаждение.

Осадок сульфата кальция осаждался в течение 15 мин на дно бака. После этого раствор из бака декантировался.

Далее циркуляционные эксперименты повторялись: из раствора удалялся пермеат в количестве 0,3–0,4 л, благодаря чему объем раствора концентрата был сокращен до значения $V = 2$ л, что соответствовало значению $K = 10$.

После достижения $K = 10$ в объем концентрата снова добавлялся осадок кристаллов затравки и проводилась промывка со сбросом давления.

После осаждения и отделения кристаллов затравки полученный раствор концентрата представлял собой смесь солей – хлорида натрия и сульфата натрия.

На рис. 11 показаны зависимости концентраций ионов кальция, магния, натрия, а также сульфат-ионов и хлорид-ионов от значений K во время проведения экспериментов по осаждению гипса из концентрата.

Видны снижения концентраций кальций-ионов и сульфат-ионов при концентрировании, что говорит о росте кристаллов в аппарате при концентрировании раствора.

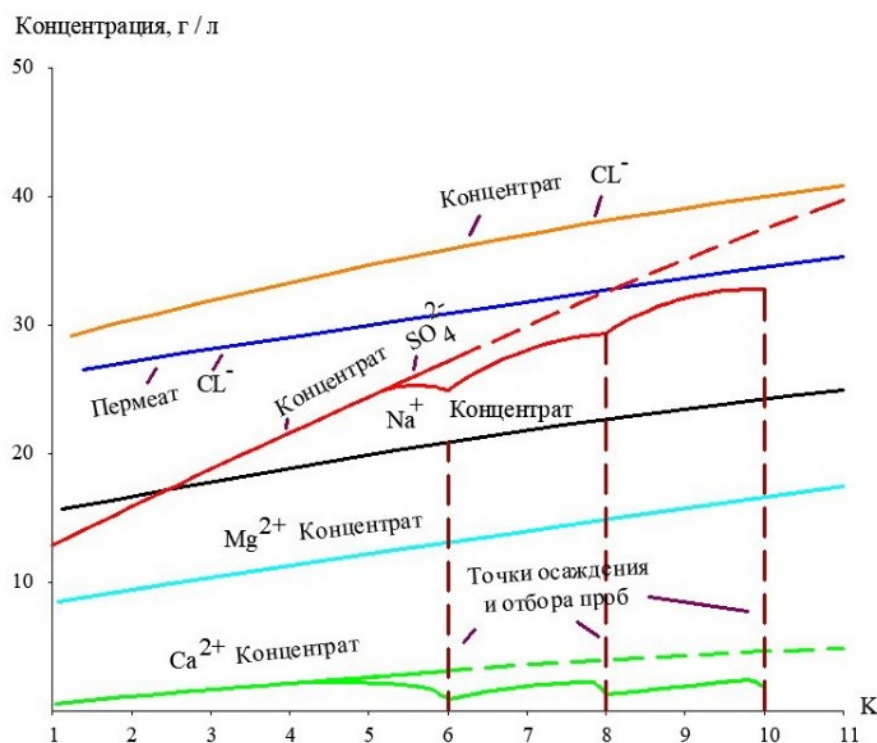


Рис. 11. Зависимости концентраций ионов кальция, магния, натрия, хлорид-ионов и сульфат-ионов от K в процессе проведения экспериментов по осаждению гипса из концентрата

Fig. 11. Dependences of the concentrations of calcium, magnesium, sodium, chloride and sulfate ions on the value of the coefficient K during experiments on circulation, conductivity and deposition of calcium sulfate

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 8 показаны основные этапы оценки скорости роста кристаллов карбоната кальция

как функции пересыщения. Для оценки скорости роста кристаллов количество карбоната кальция оценивалось на разных этапах про-

мывки и осаждения: $K = 10$, $K = 20$, $K = 40$ (рис. 8b). Затем, предполагая, что периоды времени, необходимые для достижения значений K , равны 10, 20 и 40, можно построить графическую зависимость от количества карбоната кальция в ходе эксперимента (рис. 8с). Результаты определения значений производных этой функции в различные моменты, соответствующие значениям K , достигнутыми в ходе испытания, дают зависимость скорости роста кристаллов от значений K (рис. 8d). И, наконец, можно построить зависимость скорости роста кристаллов от значений пересыщения (рис. 8е).

Значения пересыщения, соответствующие составу концентрата при различных значениях K , определялись с использованием данных, представленных в табл. 1. (рис. 12).

Для оценки скорости зародышеобразования в потоке концентрата в зависимости от пересыщения был определен средний размер кристаллов, смываемых с мембранного канала при определенном значении K , затем изучены объем и масса одного кристалла и,

наконец, оценено образование кристаллов (скорость зародышеобразования) как скорость роста карбоната кальция (как отношение скорости роста карбоната кальция к массе одного кристалла).

Результаты оценки скорости зародышеобразования кристаллов и обнаруженный размер кристаллов, смываемых с модуля, в зависимости от значения пересыщения, показаны на рис. 13 (а и b).

Различные размеры кристаллов связаны с условиями их образования в присутствии ингибиторов [1, 15–17]. Чем сильнее и эффективнее ингибитор, тем выше значение пересыщения, необходимое для начала гомогенного зародышеобразования [1, 19, 20]. Это было исследовано в [1] и подтверждено фотографиями.

В проведенных экспериментах дозы ингибитора составляли 2, 5 и 10 мг/дм³. Это влияло на коэффициенты пересыщения и скорости зародышеобразования, а также на размеры кристаллов, вымываемых из мембранного модуля.

Таблица 1. Оценка коэффициентов пересыщения при различных значениях K и скоростях зародышеобразования

Table 1. Estimation of supersaturation coefficients for different values of K and nucleation rates

№	K	Ca, мг-экв/дм ³	HCO ₃ , мг-экв/дм ³	pH	Солесодержание, мг/дм ³	ПР, (мг-экв/дм ³) ²	CO ₃ /HCO ₃	CO ₃ , мг-экв/дм ³	Пересыщение: $\frac{[Ca] \cdot [SO_3]}{PP}$	K	Средний размер кристаллов, мкм	Доза ингибитора, мг/дм ³	Масса кристалла, кг
1	1	4,5	2	7,3	200	$5,22 \cdot 10^{-9}$	0,01	0,02	20	–	–	–	–
2	2	8	3,2	7,6	380		0,015	0,04	100	–	–	–	–
3	3	12	6	7,9	520		0,018	0,1	200	–	–	–	–
4	4	18	7,4	8	–		0,02	0,14	540	–	–	–	–
5	5	20	9	8,2	650		0,03	–	1000	–	–	–	–
6	15	40	40	9	4600	–	0,3	12	$1,2 \cdot 10^5$	1	7	1	$35 \cdot 10^{-17}$
7	20	70	60	9,2	5700	–	0,4	24	$3,3 \cdot 10^5$	1,5	5	3	$12,5 \cdot 10^{-17}$
8	30	100	80	9,3	7300	–	0,5	40	$7,8 \cdot 10^5$	2	3	5	$2,7 \cdot 10^{-17}$

Как видно из табл. 2, в результате проведения эксперимента по разделению ионов, получены растворы, пересыщенные по сульфату кальция.

Концентрирование морской воды с помощью нанофильтрационных мембран показало

увеличение пересыщения за счет увеличения концентрации двухвалентных ионов и одно-временное снижение ионной силы за счет низкого удаления натрия и хлоридов [27]. В таблице приведены результаты расчета коэффициента пересыщения сульфата кальция.

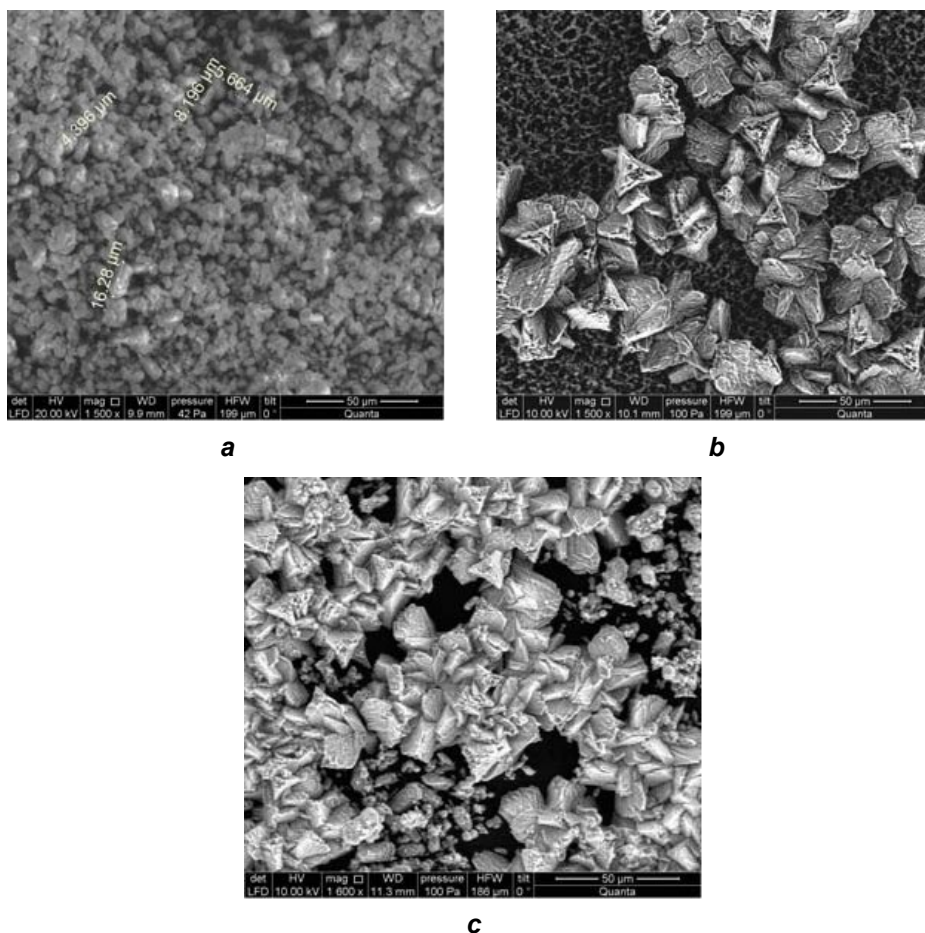


Рис. 12. СЭМ-фотографии кристаллов, смытых с мембранного модуля и выращенных в пересыщенном объеме воды: а – после зародышеобразования; b и c после 5 и 9 циклов экспериментов

Fig. 12. SEM photographs of crystals washed from the membrane module and grown in a supersaturated volume of water: a – after nucleation; b and c after 5 and 9 cycles of experiments

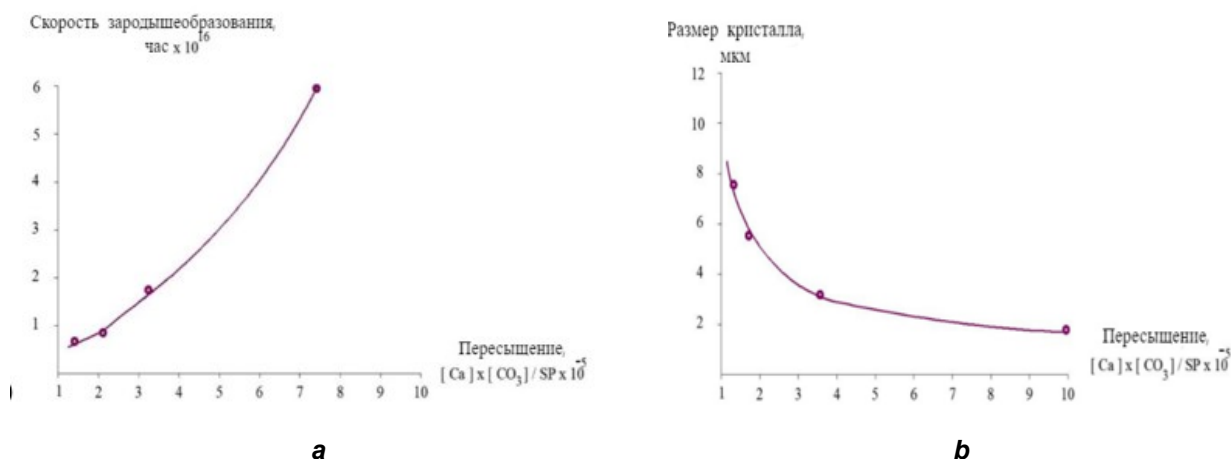


Рис. 13. Оценка скоростей зародышеобразования в зависимости от значений пересыщения: а – зависимость скоростей роста кристаллов от значений K ; b – зависимость скорости роста кристаллов от пересыщения карбонатом кальция

Fig. 13. Evaluation of nucleation rates depending on supersaturation values: a – dependence of crystal growth rates on K values; b – dependence of crystal growth rate on calcium carbonate supersaturation

Таблица 2. Результаты определения степени пересыщения полученных растворов по сульфату кальция

Table 2. The results of determining the degree of supersaturation of the obtained solutions by calcium sulfate

№ п/п	Проба	[Ca], г-ион/дм ³	[SO ₄], г-ион/дм ³	μ, мг-экв/ дм ³ ·10 ⁻³	f ²	Пересыщение $\frac{f^2 \cdot [Ca] \cdot [SO_4]}{PP_{CaSO_4}}$
1	Подпитка, K=1	30	20	2,2	0,015	$\frac{3}{35}$
2	K (K = 4)	25	100	2,4	0,01	$\frac{25}{35}$
3	K (K = 6)	30	135	1,6	0,02	$\frac{78}{35}$
4	K _n (K = 8)	16	140	1,3	0,02	$\frac{48}{35}$
5	После разбавления 1:4	6,5	38	0,22	0,1	$\frac{25}{35}$
6	K = 4	16	130	1,15	0,03	$\frac{64}{35}$

Достигнуто двукратное пересыщение по сульфату кальция, но такого значения пересыщения оказалось недостаточно для быстрого достижения опалесценции – видимого выпадения осадка сульфата кальция из пересыщенного раствора.

Вместе с тем, определение значения пересыщения, достигнутого в результате обработки исходного концентрата в первой серии (K = 6), показало, что в результате была достигнута степень пересыщения 2,7.

Этого оказалось достаточно для выпадения сульфата кальция. Видимое выпадение сульфата кальция было замечено на следующие сутки.

Таким образом, установлено, что быстрое выпадение сульфата кальция наблюдается при достижении значения степени пересыщения выше 2,5–2,7. Значения пересыщения определялись по уравнению (1):

$$СП_{CaSO_4} = \frac{f^2 [Ca] \cdot [SO_4]}{PP_{CaSO_4}}, \quad (1)$$

где СП – значение степени насыщения (точнее пересыщения) раствора по сульфату кальция, f² – среднее значение произведения коэффициентов активностей ионов кальция и сульфат-ионов, [Ca] и [SO₄] – концентрации ионов кальция и сульфат-ионов в концентрате, г-ион/дм³, PP_{SO₄} – произведение растворимости гипса. Значения ионной силы определялись с использованием уравнения (2). Связь между квадратом среднего значения

коэффициентов активности и значениями ионной силы описывается уравнением 2 [28] и определялась с помощью графика, представленного на рис. 14. Значения ионной силы (мг-экв/дм³) определялись с помощью уравнения (3), где в квадратных скобках указаны концентрации ионов.

$$f^2 = \frac{1}{40 \cdot (KM)^{0,75}}, \quad (2)$$

$$\mu = \{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [SO_4^{2-}] + 0.5[Na^+] + [Cl^-] + [HCO_3^-]\} \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

На рис. 15. представлены зависимости роста степени пересыщения испытуемых растворов от K. Наибольшее значение (трехкратного) пересыщения было достигнуто при концентрировании исходной воды в шесть раз с применением нанофильтрационных мембран Nano NF.

Использование мембран 70NE не позволяет достичь такого результата из-за того, что они задерживают одновалентные ионы, что ведет к росту ионной силы, следовательно, снижается степень пересыщения.

При использовании процесса разделения ионов, значения пересыщения оказываются выше благодаря сокращению ионной силы раствора.

Из рис. 15 видно, что процесс концентрирования не был доведен до конца (до самопроизвольного выпадения сульфата кальция).

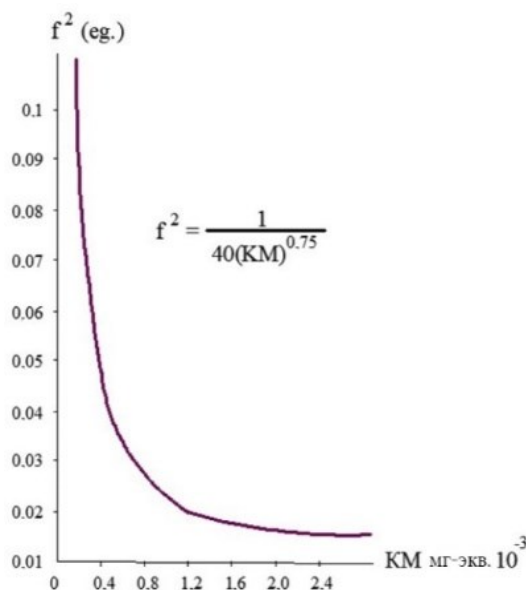


Рис. 14. График для определения величин коэффициентов активности ионов кальция и сульфат-ионов в зависимости от величины ионной силы раствора μ
Fig. 14. Graph for determining the values of the activity coefficients of calcium and sulfate ions depending on the value of ionic strength μ

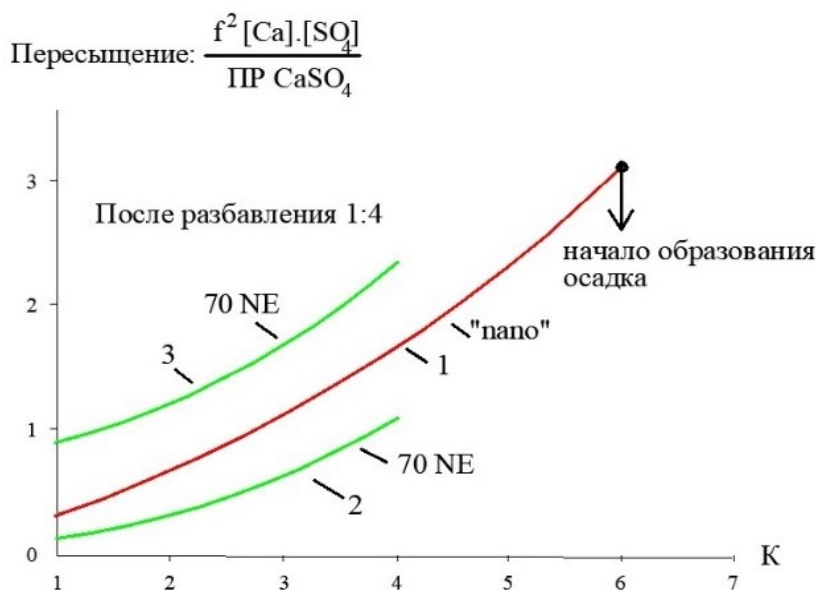


Рис. 15. Зависимости роста пересыщения раствора по сульфату кальция от K:
1 – с применением мембран NanoNF; 2 – с использованием мембран 70NE; 3 – после разбавления концентрата деионизованной водой в соотношении 1:4 (мембраны 70 NE)
Fig. 15. Dependences of the growth of the degree of supersaturation of calcium sulfate on K:
1 – NanoNF membranes; 2 – 70 NE membranes; 3 – after dilution of the concentrate with deionized water in a ratio of 1:4 (70 NE membranes)

На рис. 16 показаны фотографии СЭМ кристаллов сульфата кальция (гипса), смытых с поверхности мембраны (а) и после роста в пересыщенном растворе (б). Продукты растворимости и значения пересыщения как карбоната кальция (кальцита), так и дигидрата сульфата кальция (гипса) определялись на

протяжении всего исследования. Результаты экспериментального исследования процесса зародышеобразования и скорости роста кристаллов карбоната кальция и сульфата кальция представлены в зависимости от уровня пересыщения, времени роста и присутствия ингибитора.

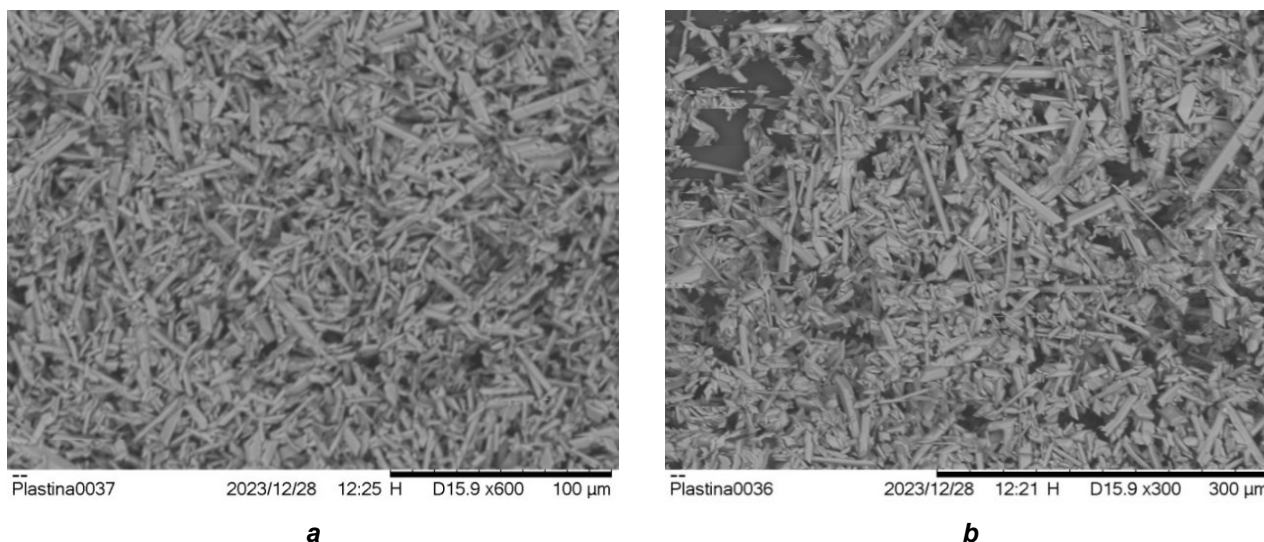


Рис. 16. Кристаллы сульфата кальция, образовавшиеся в потоке за счет пересыщения (а) и выросшие кристаллы, вымываемые из модуля (б). Степень пересыщения в потоке концентрата: 2,9

Fig. 16. Calcium sulfate crystals formed in the flow due to supersaturation (a) and grown crystals washed out of the module (b). Degree of supersaturation in the concentrate flow: 2,9

Показаны примеры применения новой технологии опреснения грунтовых и морских вод. Данная технология может быть также использована для усовершенствования и модификации существующих систем с использованием дополнительных мембранных блоков, оснащенных рулонными мембранными элементами открытого канала с использованием низкоселективных нанофильтрационных мембран. Это позволяет сократить расход концентрата от 10 до 100 раз, снизить расход реагентов и избежать осадкообразования. Технология позволяет не только сократить сброс концентрата, но и разделить его на ряд концентрированных растворов, таких как хлорид натрия, сульфат магния и хлорид магния. Это позволяет не только избавиться от сбросов в канализацию, но и извлечь ценные компоненты и получить концентрат [7, 8, 10].

Принципы разделения двухвалентных и одновалентных ионов с использованием нанофильтрационных мембран продемонстрированы на рис. 17 и 18.

Снижение объема концентрата в емкости 5 происходит непрерывно. Концентрат поступает в емкость, затем направляется в модуль 7 и реактор 8.

Пермеат, после модуля 8, постоянно отбирается из модуля и направляется в емкость питательной воды 1.

Таким образом, процесс снижения расхода концентрата заканчивается, когда расход продукта модуля 7 становится ниже расхода кон-

центрата, поступающего в емкость 5. В этот момент значение солесодержания в емкости 5 достигает своего максимума. Расчет объема емкости 5 осуществляется с использованием уравнений баланса масс. Он рассчитывается как разница между количеством концентрата, поступающего в емкость 5 за сутки, и производением количества модуля 7 за сутки. Расход транзитного потока через реактор 8 выбирается исходя из времени, необходимого для пребывания в реакторе, и скорости восходящего потока, поддерживаемой для выхода кристаллов из реактора. Также объем реактора можно рассчитать исходя из предположения, что необходимое количество концентрата отбирается из установки один раз в сутки. Например, при производительности установки ОО 1000 м³/сутки и максимальном значении начального коэффициента снижения расхода, $K = 200$, суточный объем отбираемого концентрата составляет 5 м³, что позволяет отвозить концентрат автотранспортом. На рис. 19 представлены результаты роста карбоната кальция в концентратной емкости при работе пилотной установки.

Расход реагентов и потребление энергии являются основными факторами, влияющими на цену воды. Кроме того, стоимость концентрата теперь оказывает большее влияние на цены на воду.

Представлены соотношения для определения основных эксплуатационных расходов (потребление энергии и реагентов) на основе

оценки скорости образования отложений, общего удаления сульфата кальция и карбоната кальция, графиков очистки и платежей за сброс концентрата в канализацию (рис. 20).

Промышленное применение представленных технологий снижения расхода концентрата (рис. 17 и 18) связано с высокими капитальными и эксплуатационными затратами. Такое применение представляется целесооб-

разным в таких случаях, когда слив концентрата не может быть использован. Проблема может быть решена только вывозом отходов автотранспортом. При использовании установок обратного осмоса и нанофильтрации для получения питьевой или технической воды существенный экономический эффект достигается при снижении сброса концентрата в канализацию в 5–10 раз.

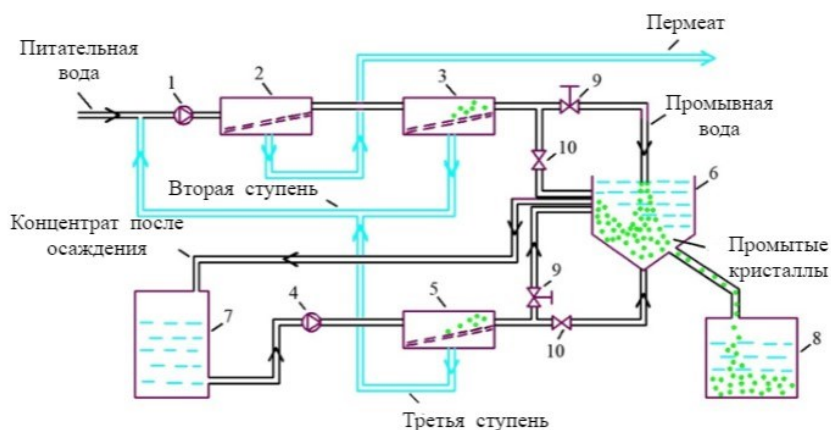


Рис. 17. Схема процесса очистки вод с использованием стадии нанофильтрации открытого канала и реактора осаждения труднорастворимых солей: 1 – насос питательной воды; 2 – мембранный модуль первой ступени; 3 – мембранный модуль второй ступени с открытым каналом; 4 – насос третьей ступени (снижение концентрации); 5 – модуль третьей ступени с открытым каналом; 6 – реактор зародышеобразования; 7 – емкость для сбора концентрата после отстаивания; 8 – емкость для сбора кристаллов; 9 – электромагнитный клапан для промывки; 10 – клапан регулирования давления

Fig. 17. Schematic diagram of the groundwater purification process using the open-channel nanofiltration stage and a reactor for precipitation of poorly soluble salts: 1 – feedwater pump; 2 – first-stage membrane module; 3 – second-stage membrane module with an open channel; 4 – third-stage pump (concentration reduction); 5 – third-stage module open channel; 6 – scale nucleation reactor; 7 – tank for collecting concentrate after settling; 8 – tank for collecting crystals; 9 – electromagnetic valve for washing; 10 – pressure regulating valve



Рис. 18. Пилотная установка, изготовленная с использованием модулей открытого канала для снижения расхода концентрата, работающая в непрерывном режиме.

Производительность продукта – 150 л/ч

Fig. 18. Pilot plant manufactured using open channel modules to reduce concentrate consumption, operating in continuous mode. Product capacity is 150 liters per hour

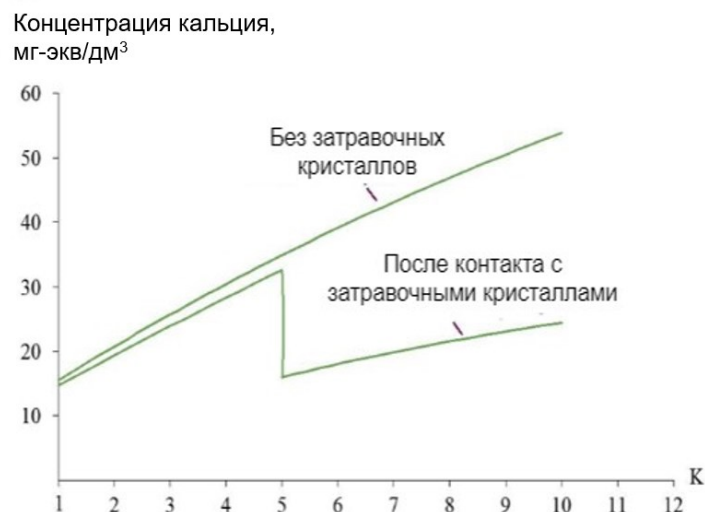


Рис. 19. Результаты оценки скорости роста карбоната кальция в реакторе
Fig. 19. Results of the assessment of the growth rate of calcium carbonate in the reactor

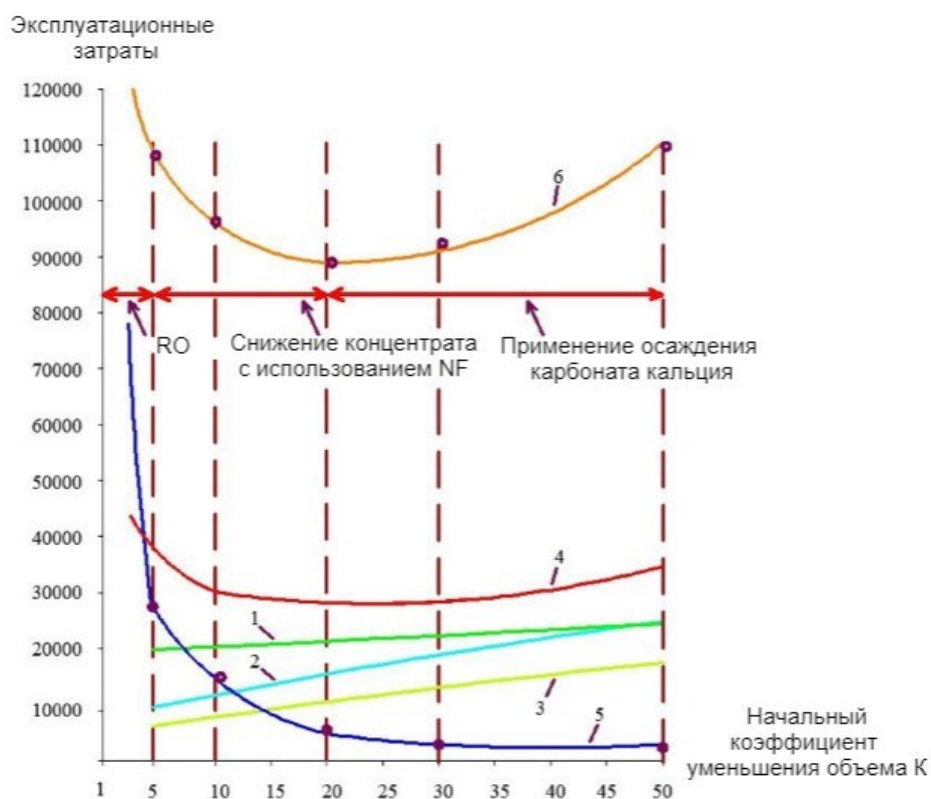


Рис. 20. Оценка эксплуатационных затрат в зависимости от K для различных случаев применения разработанных технологий. Для установки производительностью 1000 м³/сут: 1 – затраты на ингибитор; 2 – затраты на замену мембраны; 3 – затраты на расход моющих реагентов; 4 – затраты на электроэнергию; 5 – затраты на слив концентрата; 6 – общие эксплуатационные затраты
Fig. 20. Estimation of operating costs depending on K for different cases of application of the developed technologies. For a plant with a capacity of 1000 cubic meters of commercial water per day: 1 – costs of antiscalant; 2 – costs of membrane replacement; 3 – costs of consumption of cleaning reagents; 4 – costs of electricity; 5 – costs of concentrate drainage; 6 – total operating costs

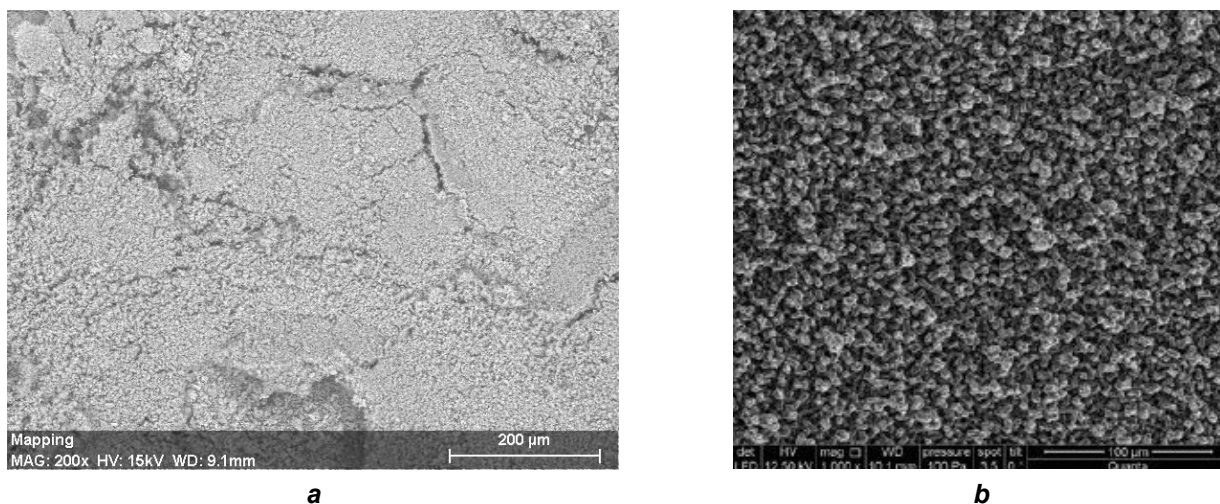


Рис. 21. Кристаллы карбоната кальция, образовавшиеся в потоке в присутствии ингибитора (а) и выросшие кристаллы, вымытые из модуля и выпавшие в осадок (б). Коэффициент пересыщения в потоке концентрата: 1000
Fig. 21. Calcium carbonate crystals formed in the flow in the presence of antiscalant (a) and grown crystals washed out of the module and precipitated (b). Supersaturation coefficient in the concentrate flow: 1000



Рис. 22. Кристаллы, образовавшиеся в потоке концентрата и прилипшие к поплавку ротаметра
Fig. 22. Crystals formed in the concentrate flow and stuck to the rotameter float

Примеры установок обратного осмоса, оснащенных дополнительными мембранными блоками снижения расхода концентрата, оснащенными модулями с открытыми каналами, приведены на рис. 5. Опыт эксплуатации этих установок выявил отрицательный эффект: появление гомогенного зародышеобразования в потоке концентрата, заметного из-за отложения кристаллов карбоната кальция в счетчиках расхода и ротаметрах (рис. 19 и 22). Это часто связано с нарушением рецептуры и увеличением значений извлечения

сверх рекомендуемого максимального значения. Величину пересыщения, вызывающую гомогенное зародышеобразование, можно определить, приняв средний размер кристаллов в отложениях. Как видно из рис. 21, который является фотографией СЭМ, средний размер составляет около одного микрона, что указывает на то, что высокое значение пересыщения было достигнуто из-за примененного высокого восстановления, что соответствует значению коэффициента K (начальный коэффициент уменьшения объема) 40. Табл. 1 и

рис. 13 показывают, что чем выше используется доза ингибитора осадкообразования, тем выше должно быть пересыщение для начала гомогенного зародышеобразования и, чем выше скорость зародышеобразования, тем меньше размер кристаллов, образующихся в потоке. Этот наблюдаемый эффект вдохновил авторов на разработку новой безреагентной методики снижения концентрации путем получения затравочных кристаллов в потоке путем создания условий пересыщения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Пересыщение раствора является ключевым фактором в создании системы, в которой отсутствует образование отложений мало растворимых солей на мембранах, а соли кальция удаляются из концентрата без использования реагентов.

2. Использование нанофильтрационных мембран с низкой селективностью NanoNF позволяет уменьшить и даже избежать образования карбонатных отложений в аппаратах

с открытым каналом, а также увеличить концентрацию двухвалентных ионов кальция в концентрате и контролировать зародышеобразование и отложение малорастворимых солей в мембранных каналах.

3. Можно выделить три основных компонента новой разработанной технологии, такие как использование нанофильтрационных мембран с низкой селективностью для обеспечения снижения образования отложений на поверхности мембраны и увеличения общего содержания растворенных веществ в концентрате, использование модулей с открытым каналом для предотвращения осадкообразования и увеличения перепада давления (сопротивления потоку), контроль значений пересыщения и скорости роста кристаллов.

4. Разработана технология разделения ионов, которая позволяет не только снижать концентрацию, достигаемую осаждением карбоната кальция и сульфата кальция, но и применять разделение ионов для получения отдельных растворов хлорида натрия, хлорида магния и сульфата магния.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pervov A. Investigation of Scaling and Inhibition Mechanisms in Reverse Osmosis Spiral Wound Elements // *Membranes*. 2022. Vol. 12. Iss. 9. P. 1–21. <https://doi.org/10.3390/membranes12090852>.
2. Xiaoqiang Wang, Ruizhu Hu, Jilin Wei, Tinglin Huang, Kaihong Li, Haitao Cheng Experimental Study on Softening High-Calcium Sulfate Reverse Osmosis Concentrate Using Induced Crystallization Method // *Water*. 2025. Vol. 17. Iss. 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/w17010004>.
3. Alrehaili O., Perreault F., Sinha S., Westerhoff P. Increasing Net Water Recovery of Reverse Osmosis with Membrane Distillation Using Natural Thermal Differentials Between Brine and Co-Located Water Sources: Impacts at Large Reclamation Facilities // *Water Research*. 2020. Vol. 184. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116134>.
4. Turek M., Mitko K., Skora P., Dydo P., Jakobik-Kolon A., Warzecha A. et al. Improving the Performance of a Salt Production Plant by Using Nanofiltration as a Pretreatment // *Membranes*. 2022. Vol. 12. Iss. 12. P. 1–11. <https://doi.org/10.3390/membranes12121191>.
5. Joy M., Boussemaere R. Investigation of Carbon Dioxide for Scale Control in Reverse Osmosis Systems // *Journal of Environmental Management*. 2025. Vol. 373. P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123837>.
6. Fumio Yokoyama, Mitsutoshi Nakajima, Sosaku Ichikawa Analysis of Calcium Sulfate Scaling Phenomena on Reverse Osmosis Membranes by Scaling-Based Flux Model // *Membranes*. 2022. Vol. 12. Iss. 9. P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/membranes12090894>.
7. Pervov A., Htet Zaw Aung, Spitsov D. Treatment of Mine Water with Reverse Osmosis and Concentrate Processing to Recover Copper and Deposit Calcium Carbonate // *Membranes*. 2023. Vol. 13. Iss. 2. P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/membranes13020153>.
8. Pervov A., Andrianov A. Deposition of Calcium and Magnesium from RO Concentrate By Means Of Seed Crystallization and Production of Softened Water for Technical Purposes // *Desalination and Water Treatment*. 2018. Vol. 110. P. 10–18. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.21875>.
9. García-Trinanes P., Chairapoulou M.A., Campos L.C. Investigating Reverse Osmosis Membrane Fouling and Scaling by Membrane Autopsy of A Bench Scale Device // *Environmental Technology*. 2022. Vol. 43. Iss. 21. P. 3198–3211. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1918262>.
10. Nassr M., Dischinger S.M., Ji Yeon Lee, Gleason K.L., Molins S., Spycher N. et al. Mineral Scale Formation during Crossflow Reverse Osmosis at Constant Flux and Constant Transmembrane Pressure Conditions // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2025. Vol. 64. Iss. 2. P. 1295–1308. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c04059>.

11. Ahmed M.A., Amin S., Mohamed A.A. Fouling in reverse osmosis membranes: monitoring, characterization, mitigation strategies and future directions // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Iss. 4. P. 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14908>.
12. Popov K., Oshchepkov M., Pervov A., Golovesov V., Ryabova A., Trukhina M. et al. A Case Study of Calcium Carbonate Crystallization during Reverse Osmosis Water Desalination in Presence of Novel Fluorescent-Tagged Antiscalants // *Membranes*. 2022. Vol. 12. Iss. 2. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/membranes12020194>.
13. Ramirez-Garcia P., Duran-Olivencia M.A., Kellermeier M., Van Driessche A.E.S. Determining the Operational Window of Green Antiscalants: A Case Study for Calcium Sulfate // *Desalination*. 2022. Vol. 544. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116128>.
14. Кисель А.В. Опреснение морской воды Черного, Азовского и Каспийского морей методами мембранных технологий // *Вестник науки*. 2019. Т. 3. № 2. С. 79–94. EDN: YWLVBR.
15. Jiapeng Li, Yunhuan Chen, Hailong Wang, Xinyue Liu, Yulong Ma, Yongsheng Ren Investigation of the Effect of Phosphonate Antiscalants on the Reverse Osmosis Membranes' Permeation And Desalination Performance in Mine Wastewater Treatment Process // *Journal of Water Process Engineering*. 2024. Vol. 68. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106310>.
16. Мосин О.В., Игнатов И. Современные технологии опреснения морской воды // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2012. № 4. С. 13–19. EDN: NPSEGI.
17. Головесов В.А. Решения проблем, возникающих при использовании установок обратного осмоса в питьевом водоснабжении // *Яковлевские чтения. Сб. докладов XVI Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева (г. Москва, 15 марта 2021 г.)*. М., 2021. С. 48–55. EDN: GNRXUA.
18. Al-Anzi B.S., Al-Rashidi A., Abraham L., Fernandes J., Al-Sheikh A., Alhazza A. Brine Management from Desalination Plants for Salt Production Utilizing High Current Density Electrodialysis-Evaporator Hybrid System: A Case Study in Kuwait // *Desalination*. 2021. Vol. 498. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114760>.
19. Pervov A., Xuan Quyet Nguyen Application of Reverse Osmosis and Nanofiltration Techniques at Municipal Drinking Water Facilities // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. P. 1–10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199706004>.
20. Gadalla M.A., Fatah A.A., Elazab H.A. A Novel Renewable Energy Powered Zero Liquid Discharge Scheme for RO Desalination Applications // *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023. Vol. 8. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100407>.
21. Попов К.И., Ощепков М.С. Современное состояние теории действия ингибиторов солеотложений // *VIII научно-практическая конференция «Современные технологии водоподготовки и защиты оборудования от коррозии и накипеобразования»*. Сборник докладов VIII научно-практической конференции в рамках международной выставки «Химия-2019» «Экспоцентр» на Красной Пресне (г. Москва, 16–17 сентября 2019 г.). М., 2019. С. 5–11. EDN: XALSQR.
22. El Sayed M.M., Abulnour A.M.G., Tewfik S.R., Sorour M.H., Hani H.A., Shaalan H.F. Reverse Osmosis Membrane Zero Liquid Discharge for Agriculture Drainage Water Desalination: Technical, Economic, and Environmental Assessment // *Membranes*. 2022. Vol. 12. Iss. 10. P. 1–10. <https://doi.org/10.3390/membranes12100923>.
23. Cappelle M., Walker W.S., Davis T.A. Improving Desalination Recovery Using Zero Discharge Desalination (ZDD): A Process Model for Evaluating Technical Feasibility // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2017. Vol. 56. Iss. 37. P. 10448–10460. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b02472>.
24. Xianhui Li, Hasson D., Semiat R., Shemer H. Intermediate Concentrate Demineralization Techniques for Enhanced Brackish Water Reverse Osmosis Water Recovery – A Review // *Desalination*. 2019. Vol. 466. P. 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.05.004>.
25. Omerspahic M., Al-Jabri H., Amir Siddiqui S., Saadaoui I. Characteristics of Desalination Brine and Its Impacts on Marine Chemistry and Health, With Emphasis on the Persian/Arabian Gulf: A Review // *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. P. 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.845113>.
26. Abu Sharkh B., Al-Amoudi A.A., Farooque M., Fellows C.M., Ihm S., Lee S. et al. Seawater Desalination Concentrate – A New Frontier for Sustainable Mining of Valuable Minerals // *Clean Water*. 2022. Vol. 5. P. 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00153-6>.
27. Murtaza M., Alarifi S.A., Rasm M.Y., Kamal M.S., Mahmoud M., Al-Ajmi M. Single Step Calcium Sulfate Scale Removal at High Temperature Using Tetrapotassium Ethylenediaminetetraacetate with Potassium Carbonate // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. P. 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14385-6>.
28. Yan Yan, Tao Yu, Huan Zhang, Jiayu Song, Chengtun Qu, Jinling Li et al. Co-Deposition Mechanisms of Calcium Sulfate and Calcium Carbonate Scale in Produced Water // *Crystals*. 2021. Vol. 11. Iss. 12. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/cryst11121494>.

REFERENCES

1. Pervov A. Investigation of Scaling and Inhibition Mechanisms in Reverse Osmosis Spiral Wound Elements. *Membranes*. 2022;12(9):1-21. <https://doi.org/10.3390/membranes12090852>.
2. Xiaoqiang Wang, Ruizhu Hu, Jilin Wei, Tinglin Huang, Kaihong Li, Haitao Cheng Experimental Study on Softening High-Calcium Sulfate Reverse Osmosis Concentrate Using Induced Crystallization Method. *Water*. 2025;17(1):1-16. <https://doi.org/10.3390/w17010004>.
3. Alrehaili O., Perreault F., Sinha S., Westerhoff P. Increasing Net Water Recovery of Reverse Osmosis with Membrane Distillation Using Natural Thermal Differentials Between Brine and Co-Located Water Sources: Impacts at Large Reclamation Facilities. *Water Research*. 2020;184:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116134>.
4. Turek M., Mitko K., Skora P., Dydo P., Jakobik-Kolon A., Warzecha A. et al. Improving the Performance of a Salt Production Plant by Using Nanofiltration as a Pretreatment. *Membranes*. 2022;12(12):1-11. <https://doi.org/10.3390/membranes12121191>.
5. Joy M., Boussemaere R. Investigation of Carbon Dioxide for Scale Control in Reverse Osmosis Systems. *Journal of Environmental Management*. 2025;373:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123837>.
6. Fumio Yokoyama, Mitsutoshi Nakajima, Sosaku Ichikawa Analysis of Calcium Sulfate Scaling Phenomena on Reverse Osmosis Membranes by Scaling-Based Flux Model. *Membranes*. 2022;12(9):1-20. <https://doi.org/10.3390/membranes12090894>.
7. Pervov A., Htet Zaw Aung, Spitsov D. Treatment of Mine Water with Reverse Osmosis and Concentrate Processing to Recover Copper and Deposit Calcium Carbonate. *Membranes*. 2023;13(2):1-20. <https://doi.org/10.3390/membranes13020153>.
8. Pervov A., Andrianov A. Deposition of Calcium and Magnesium from RO Concentrate By Means Of Seed Crystallization and Production of Softened Water for Technical Purposes. *Desalination and Water Treatment*. 2018;110:10-18. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.21875>.
9. García-Trinanes P., Chairapoulou M.A., Campos L.C. Investigating Reverse Osmosis Membrane Fouling and Scaling by Membrane Autopsy of A Bench Scale Device. *Environmental Technology*. 2022;43(21):3198-3211. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1918262>.
10. Nassr M., Dischinger S.M., Ji Yeon Lee, Gleason K.L., Molins S., Spycher N. et al. Mineral Scale Formation during Crossflow Reverse Osmosis at Constant Flux and Constant Transmembrane Pressure Conditions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2025;64(2):1295-1308. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c04059>.
11. Ahmed M.A., Amin S., Mohamed A.A. Fouling in reverse osmosis membranes: monitoring, characterization, mitigation strategies and future directions. *Heliyon*. 2023;9(4):1-27. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14908>.
12. Popov K., Oshchepkov M., Pervov A., Golovesov V., Ryabova A., Trukhina M. et al. A Case Study of Calcium Carbonate Crystallization during Reverse Osmosis Water Desalination in Presence of Novel Fluorescent-Tagged Antiscalants. *Membranes*. 2022;12(2):1-15. <https://doi.org/10.3390/membranes12020194>.
13. Ramirez-Garcia P., Duran-Olivencia M.A., Kellermeier M., Van Driessche A.E.S. Determining the Operational Window of Green Antiscalants: A Case Study for Calcium Sulfate. *Desalination*. 2022;544:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116128>.
14. Kisel A.V. Desalination of Sea Water from the Black, Azov and Caspian Seas Using Membrane Technologies. *Vestnik nauki*. 2019;3(2):79-94. (In Russ.). EDN: YWLVBR.
15. Jiapeng Li, Yunhuan Chen, Hailong Wang, Xinyue Liu, Yulong Ma, Yongsheng Ren Investigation of the Effect of Phosphonate Antiscalants on the Reverse Osmosis Membranes' Permeation And Desalination Performance in Mine Wastewater Treatment Process. *Journal of Water Process Engineering*. 2024;68:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106310>.
16. Mosin O.V., Ignatov I. Modern Technologies of Seawater Desalination. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2012;4:13-19. (In Russ.). EDN: NPSEGI.
17. Golovesov V.A. Solutions to Problems Arising from The Use of Reverse Osmosis Units in Drinking Water Supply. In: *Yakovlevskie chteniya. Sbornik dokladov XVI Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati akademika RAN S.V. Yakovleva = Yakovlev Readings. Collection of Reports of The XVI International Scientific and Technical Conference Dedicated to The Memory of Academician of The Russian Academy of Sciences S.V. Yakovlev*. 15 March 2021, Moscow. Moscow, 2021. P. 48–55. (In Russ.). EDN: GNRXUA.
18. Al-Anzi B.S., Al-Rashidi A., Abraham L., Fernandes J., Al-Sheikh A., Alhazza A. Brine Management from Desalination Plants for Salt Production Utilizing High Current Density Electrodialysis-Evaporator Hybrid System: A Case Study in Kuwait. *Desalination*. 2021;498:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114760>.

19. Pervov A., Xuan Quyet Nguyen Application of Reverse Osmosis and Nanofiltration Techniques at Municipal Drinking Water Facilities. *E3S Web of Conferences*. 2019;97:1-10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199706004>.
20. Gadalla M.A., Fatah A.A., Elazab H.A. A Novel Renewable Energy Powered Zero Liquid Discharge Scheme for RO Desalination Applications. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023;8:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100407>.
21. Popov K.I., Oshchepkov M.S. Current State of the Theory of Action of Scale Inhibitors. In: *VIII nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennye tekhnologii vodopodgotovki i zashchi-ty oborudovaniya ot korrozii i nakipeobrazovaniya»*. *Sbornik dokladov VIII nauchno-prakticheskoi konferentsii v ramkakh mezhdunarodnoi vystavki «Khimiya-2019» «Ekspotsentr» na Krasnoi Presne = VIII Scientific and Practical Conference «Modern Technologies of Water Treatment and Protection of Equipment From Corrosion and Scale Formation». Collection of Reports of The VIII Scientific and Practical Conference within The Framework of The International Exhibition «Chemistry-2019» «Expocentre» on Krasnaya Presnya*. 16–17 September 2019, Moscow. Moscow, 2019. P. 5–11. (In Russ.). EDN: XALSQR.
22. El Sayed M.M., Abulnour A.M.G., Tewfik S.R., Sorour M.H., Hani H.A., Shaalan H.F. Reverse Osmosis Membrane Zero Liquid Discharge for Agriculture Drainage Water Desalination: Technical, Economic, and Environmental Assessment. *Membranes*. 2022;12(10):1-10. <https://doi.org/10.3390/membranes12100923>.
23. Cappelle M., Walker W.S., Davis T.A. Improving Desalination Recovery Using Zero Discharge Desalination (ZDD): A Process Model for Evaluating Technical Feasibility. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2017;56(37):10448-10460. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b02472>.
24. Xianhui Li, Hasson D., Semiat R., Shemer H. Intermediate Concentrate Demineralization Techniques for Enhanced Brackish Water Reverse Osmosis Water Recovery – A Review. *Desalination*. 2019;466:24-35. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.05.004>.
25. Omerspahic M., Al-Jabri H., Amir Siddiqui S., Saadaoui I. Characteristics of Desalination Brine and Its Impacts on Marine Chemistry and Health, With Emphasis on the Persian/Arabian Gulf: A Review. *Frontiers in Marine Science*. 2022;9:1-12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.845113>.
26. Abu Sharkh B., Al-Amoudi A.A., Farooque M., Fellows C.M., Ihm S., Lee S. et al. Seawater Desalination Concentrate – A New Frontier for Sustainable Mining of Valuable Minerals. *Clean Water*. 2022;5:1-17. <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00153-6>.
27. Murtaza M., Alarifi S.A., Rasm M.Y., Kamal M.S., Mahmoud M., Al-Ajmi M. Single Step Calcium Sulfate Scale Removal at High Temperature Using Tetrapotassium Ethylenediaminetetraacetate with Potassium Carbonate. *Scientific Reports*. 2022;12:1-18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14385-6>.
28. Yan Yan, Tao Yu, Huan Zhang, Jiayu Song, Chengtun Qu, Jinling Li et al. Co-Deposition Mechanisms of Calcium Sulfate and Calcium Carbonate Scale in Produced Water. *Crystals*. 2021;11(12):1-17. <https://doi.org/10.3390/cryst11121494>.

Информация об авторах

Первов Алексей Германович,

д.т.н., профессор кафедры водоснабжения и водоотведения,
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
129337, г. Москва, Ярославское ш., 26, Россия,
e-mail: ale-pervov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7518-2342>
Author ID: 168126

Спицов Дмитрий Владимирович,

к.т.н., доцент, директор Института инженерно-экологического строительства и механизации,
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
129337, г. Москва, Ярославское ш., 26, Россия,
✉e-mail: spitsovdv@mgsu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6252-9485>
Author ID: 531559

Information about the authors

Alexei G. Pervov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Water Supply and Sanitation,
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
26 Yaroslavl'skoe Sh., Moscow 129337, Russia,
e-mail: ale-pervov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7518-2342>
Author ID: 168126

Dmitriy V. Spitsov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Director of the Institute for Environmental Engineering Construction and Mechanization,
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University);
26 Yaroslavl'skoe Sh., Moscow 129337, Russia,
✉e-mail: spitsovdv@mgsu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6252-9485>
Author ID: 531559

Саид Ахмад Мурад Ибрагимович,
аспирант,
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет;
129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26,
Россия,
e-mail: msav2511@gmail.com

Murat I. Saeed Ahmad,
Postgraduate Student,
Moscow State University of Civil Engineering
(National Research University);
26 Yaroslavskoe Sh., Moscow, 129337,
Russia,
e-mail: msav2511@gmail.com

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 17.04.2025.
Одобрена после рецензирования 16.05.2025.
Принята к публикации 19.05.2025.

Information about the article

The article was submitted 17.04.2025.
Approved after reviewing 16.05.2025.
Accepted for publication 19.05.2025.



Повышение эффективности систем создания микроклимата

Н.Ю. Саввин^{1✉}, Т.Н. Ильина², Р.В. Лесовик³, А.Г. Шевцова⁴, В.М. Киреев⁵

^{1,2,3,4,5}Белгородский государственный технологический университет, Белгород, Россия

Аннотация. Работа посвящена исследованию эффективности работы конденсаторной установки холодильной машины с использованием частотных преобразователей для регулирования скорости вращения вентиляторов. Исследование направлено на повышение энергетической эффективности системы за счет оптимизации режимов работы вентиляторов и поддержания стабильной температуры хладагента на выходе из конденсатора. Проведенное моделирование демонстрирует, что функционирование одного вентилятора на предельной частоте может быть сопоставимо по эффективности охлаждения с работой нескольких вентиляторов на меньших скоростях. Такой результат свидетельствует о возможности снижения энергопотребления при использовании частотных преобразователей для регулирования работы вентиляторов. В статье рассмотрен принцип работы автономного инвертора напряжения, применяемого для генерации синусоидального выходного сигнала, а также особенности реализации векторной широтно-импульсной модуляции. Описаны ключевые этапы моделирования – формирование управляющих сигналов, расчет временных интервалов коммутации обмоток двигателя и преобразование координат из трехфазной системы в двухфазную систему координат α и β . Приведена структура блоков формирователей секторов и пространственный вектор напряжений, полученный в результате моделирования. Результаты моделирования показали эффективность предложенных методов для повышения качества выходного напряжения и улучшения характеристик работы вентиляционных систем. Исследование имеет практическое значение для проектирования и модернизации систем управления вентиляторами конденсаторов холодильных установок, способствуя снижению энергопотребления и повышению надежности оборудования. Статья написана на базе Центра Высоких Технологий Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.

Ключевые слова: холодильные комплексы, энергоэффективность, конденсаторный узел, режимы работы вентиляторов конденсаторов, преобразователь частоты для регулирования частотой вращения вентиляторов

Для цитирования: Саввин Н.Ю., Ильина Т.Н., Лесовик Р.В., Шевцова А.Г., Киреев В.М. Повышение эффективности систем создания микроклимата // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 501–515. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-501-515>. EDN: RCDNSS.

Original article

Improving the efficiency of microclimate creation systems

Nikita Yu. Savvin^{1✉}, Tatyana N. Ilyina², Ruslan V. Lesovik³,
Anastasia G. Shevtsova⁴, Vitaly M. Kireev⁵

^{1,2,3,4,5}Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

Abstract. The work is devoted to the study of the efficiency of the condenser unit of a refrigeration machine using frequency converters to regulate the rotation speed of fans. The research is aimed at increasing the energy efficiency of the system by optimizing the operating modes of the fans and maintaining a stable temperature of the refrigerant at the outlet of the condenser. The simulation demonstrates that the operation of one fan at the maximum frequency can be comparable in terms of cooling

efficiency with the operation of several fans at lower speeds. This result indicates the possibility of reducing energy consumption when using frequency converters to regulate fan operation. The article discusses the principle of operation of an autonomous voltage inverter used to generate a sinusoidal output signal, as well as the implementation features of vector pulse width modulation. The key stages of modeling are described – the formation of control signals, the calculation of time intervals for switching motor windings and the transformation of coordinates from a three-phase system to a two-phase coordinate system α and β . The structure of the sector shaper blocks and the spatial stress vector obtained as a result of the simulation are presented. The simulation results have shown the effectiveness of the proposed methods to increase the quality of the output voltage and improve the performance of ventilation systems. The study is of practical importance for the design and modernization of fan control systems for condensers in refrigeration units, contributing to lower energy consumption and increased equipment reliability. The article was written on the basis of the Center for High Technologies of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Keywords: refrigeration complexes, energy efficiency, condenser unit, operating modes of condenser valves, frequency converter for regulating the rotational speed of the valves

For citation: Savvin N.Yu., Ilyina T.N., Lesovik R.V., Shevtsova A.G., Kireev V.M. Improving the efficiency of microclimate creation systems. Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate. 2025;15(3):501-515. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-501-515>. EDN: RCDNSS.

ВВЕДЕНИЕ

Рост потребности в системах охлаждения как в промышленной, так и в бытовой сферах диктует необходимость разработки энергоэффективных решений, направленных на снижение потребления электроэнергии холодильными установками. Это может быть достигнуто за счет совершенствования алгоритмов управления и модернизации элементов гидравлической системы.

Согласно исследованиям Международного института, основанным на сравнительном анализе энергопотребления в различных секторах экономики по всему миру, около 17 % глобального электропотребления приходится на системы искусственного охлаждения, включая климатические установки [1, 2]. Наибольшие энергозатраты характерны для таких объектов, как холодильные комплексы, распределительные центры с низкотемпературным хранением и холодильные установки

мясоперерабатывающих производств. В этих предприятиях до 50 % всей используемой электроэнергии уходит на процессы охлаждения, а в летний период доля может возрастать до 60 %. В связи с этим одной из приоритетных задач в области повышения энергоэффективности холодильного оборудования является оптимизация процесса конденсации. Успешное решение данной задачи позволяет стабилизировать работу оборудования, снизить суммарное энергопотребление, продлить срок его службы и увеличить интервалы между техническим обслуживанием. Суть оптимизации заключается в регулировании температуры и давления хладагента в зоне конденсации, что способствует повышению общей эффективности и уменьшению энергозатрат. Так как работа конденсатора тесно связана с эффективностью системы охлаждения, последняя также требует рационального управления [3, 4].



Рис. 1. Внешний вид вентиляторов холодильной машины
Fig. 1. The exterior of the fans of the refrigerating machine

Переохлаждение определяется как разница между температурой конденсации хладагента при заданном давлении и фактической температурой жидкости в тех же условиях. Эффективный диапазон переохлаждения составляет от 4 до 7 К. Для достижения оптимальных значений используется регулирование воздушного потока через теплообменную поверхность конденсатора. Это осуществля-

ется с помощью вентиляторов, чьи рабочие характеристики должны быть согласованы с тепловой нагрузкой конденсатора. В качестве примера в данном исследовании рассматривается холодильный агент типа R22. Воздух, проходящий через теплообменник конденсатора с начальной температурой t_{ae} , нагревается до температуры t_{as} . Детальный график процесса теплопереноса представлен на рис. 2.

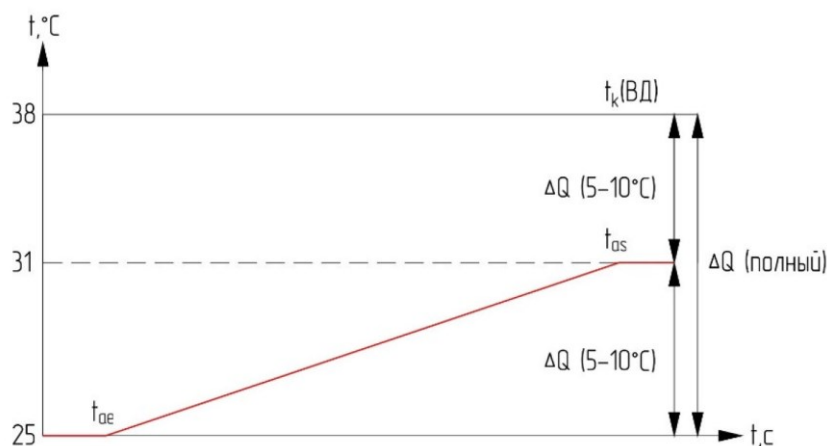


Рис. 2. Изменение температуры воздуха при охлаждении конденсатора
 t_k – показания температуры конденсации, $\Delta\theta$ – разность температур
Fig. 2. Air temperature change during condenser cooling
 t_k – condensation temperature readings, $\Delta\theta$ – temperature difference

Снижение теплопередающих характеристик конденсатора нарушает процесс конденсации хладагента, что ведет к росту давления в контуре до критических значений. Это увеличивает нагрузку на компрессорный электродвигатель, повышая его энергопотребление вследствие возросшего сопротивления рабочего цикла. Давление на нагнетательной линии может стать причиной отказа компрессора и других ключевых компонентов системы, включая испаритель. Сопутствующие эффекты – утечка хладагента, перегрев компрессора и снижение давления на всасывании – ухудшают тепловой режим двигателя. Перегрев обмоток ведет к росту тока, активации защит и аварийной остановке агрегата управляющим модулем.

Во время функционирования холодильного оборудования вентиляторы, обслуживающие конденсатор, могут либо работать непрерывно, либо включаться циклично в зависимости от текущего температурного режима и нагрузки. Также возможно изменение скорости вращения лопастей, что дает возможность гибко управлять воздушным потоком и повышать эффективность отвода тепла от конденсатора [6].

Устройства управления работой вентиляторов представляют собой специализирован-

ные системы, обеспечивающие корректную и эффективную работу вентиляторных узлов, способствуя поддержанию оптимальных параметров теплообмена.

Одним из способов улучшения энергетической эффективности вентиляторных систем является внедрение частотно-регулируемого привода (ЧРП), который обеспечивает плавное регулирование скорости вращения всех вентиляторов одновременно. Такой подход позволяет достичь уровня теплоотдачи, сопоставимого с режимом работы вентиляторов на максимальной мощности при традиционном ступенчатом управлении [7]. Следует учитывать, что интеграция ЧРП заметно увеличивает стоимость системы управления.

МЕТОДЫ

Для обоснования применения частотных преобразователей необходимо провести анализ режимов работы вентиляторов с плавным регулированием скорости, при которых обеспечивается эквивалентный уровень охлаждения, сравнимый с режимами включения одного, двух или трех вентиляторов на полной мощности. Основным показателем эффективности теплоотвода при этом выступает температура хладагента на выходе из конденсатора [9]. Моделирование процессов проводилось с применением комплекса инженерного анализа

SolidWorks, предоставляющего широкий спектр инструментов для расчета рабочих параметров проектируемых конструкций [8]. Особенно следует отметить модуль SolidWorks Flow Simulation, полностью интегрированный в основную CAD-платформу, что обеспечивает легкий импорт трехмерных моделей и последующее выполнение комплексного теплотехнического анализа [10].

При моделировании жидкостной среды необходимо задать ее физико-технические характеристики – плотность, вязкость, температуру и другие параметры. С помощью инструментов SolidWorks создается расчетная сетка, описывающая структуру потока жидкости. Далее возможно применение различных методов анализа – от оценки скоростей потока до распределения давления и других параметров. В процессе выполненного исследования была сформирована численная модель, описывающая поведение хладагента в пределах пластинчатого теплообменного устройства, являющегося частью конденсаторного узла холодильной установки, в составе которой предусмотрена трехвентиляторная систе-

ма охлаждения. Для реализации моделирования использовался программный модуль SolidWorks Flow Simulation [11]. Пространственная конфигурация теплообменного аппарата была смоделирована с применением инструментов твердотельного проектирования, доступных в среде SolidWorks.

Материалы, соответствующие конструкционным элементам, задавались следующим образом: пластиковые составные части для вентиляторных лопастей, металлические компоненты для несущих и крепежных деталей, а также медные трубки, соединяющие конденсатор с гидравлической частью системы [12].

Для оценки эффективности работы системы охлаждения были использованы реальные геометрические параметры промышленных вентиляторов, применяемых в конденсаторных установках [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения эффективности работы конденсаторной установки холодильной машины с одним центральным вентилятором, работающим с частотой 1400 об/мин, представлены на рис. 3–5.

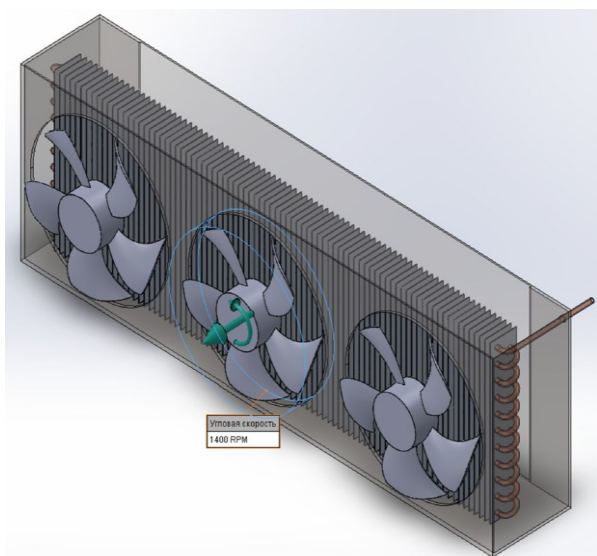


Рис. 3. Режимы функционирования вентиляторов (1×1400 об/мин)
Fig. 3. Fan operating modes (1×1400 revolutions per minute)

На следующем этапе была проведена симуляция, включающая расчет скорости вращения трех вентиляторов с сохранением прежней эффективности системы охлаждения [14].

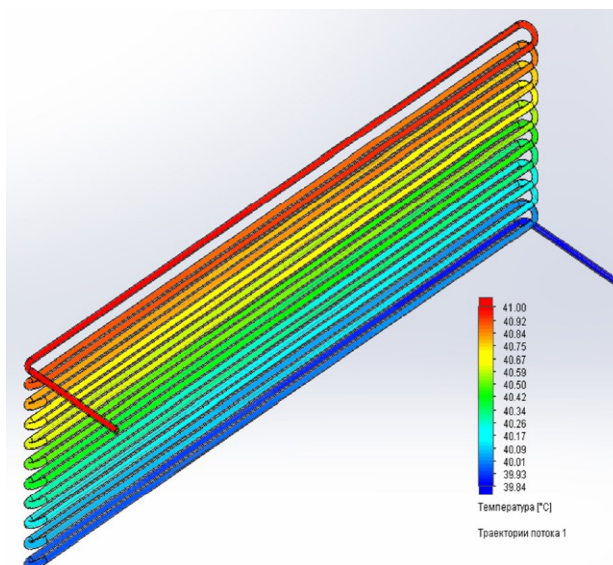


Рис. 4. Температурный профиль охлаждающей жидкости внутри трубки при скорости вращения 1400 об/мин (один вентилятор)
Fig. 4. Temperature profile of the coolant inside the tube at 1400 revolutions per minute (one fan)

Данный процесс обеспечивал поддержание одинаковой температуры теплоносителя на выходе из конденсаторного узла. Полученные результаты моделирования визуализированы на рис. 7–10.

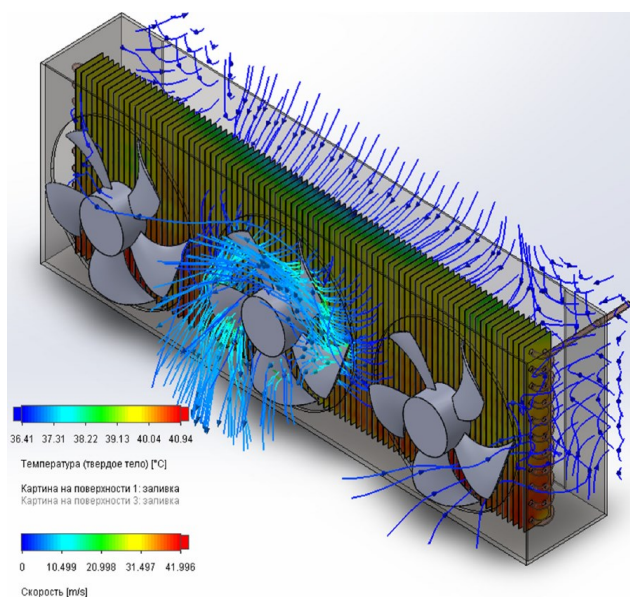


Рис. 5. Аэродинамическая характеристика процесса охлаждения воздушной средой при скорости вращения 1400 об/мин (один вентилятор)

Fig. 5. Aerodynamic characteristics of the air cooling process at a rotation speed of 1400 revolutions per minute (one fan)

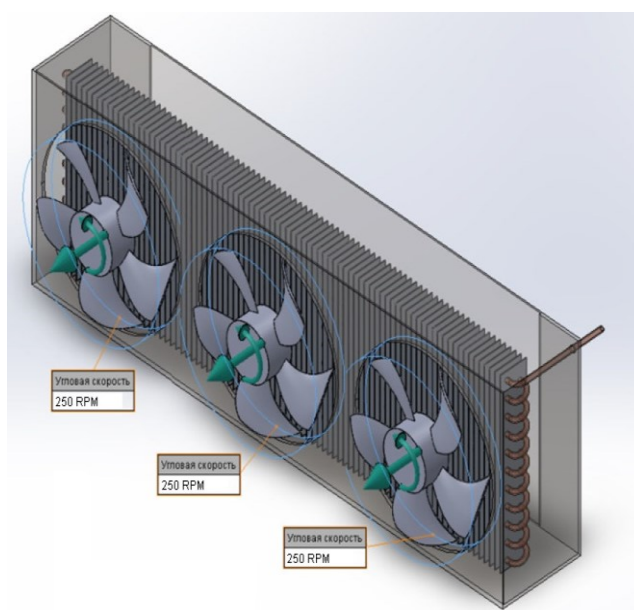


Рис. 6. Рабочие параметры вентиляторов при скорости вращения 250 об/мин (три вентилятора)

Fig. 6. Operating parameters of the fans at a rotation speed of 250 revolutions per minute (three fans)

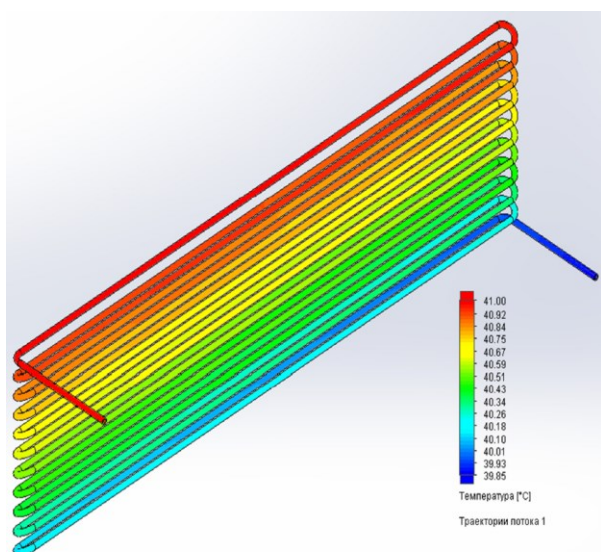


Рис. 7. Термодинамические параметры хладагента в трубке при работе трех вентиляторов с частотой 250 об/мин

Fig. 7. Thermodynamic parameters of the refrigerant in the tube during operation of three fans with a frequency of 250 revolutions per minute

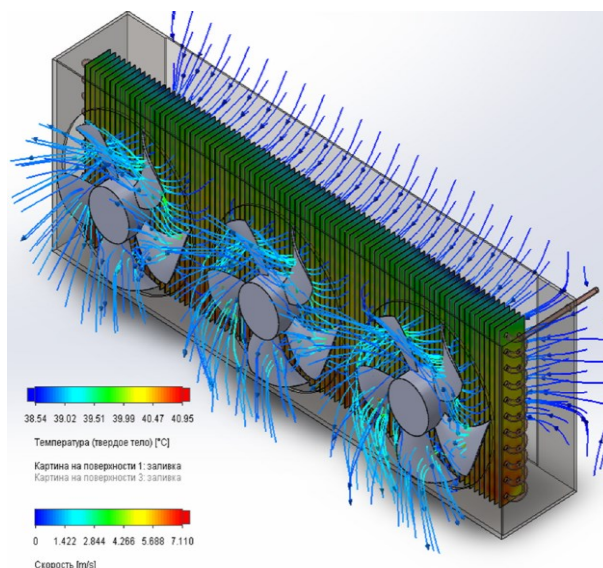


Рис. 8. Аэродинамическая характеристика процесса охлаждения воздушной средой при работе трех вентиляторов с частотой 250 об/мин

Fig. 8. Aerodynamic characteristics of the air cooling process during operation of three fans with a frequency of 250 revolutions per minute

По результатам проведенного моделирования было установлено, что работа одного вентилятора с частотой 1400 об/мин обеспечивает тот же уровень теплоотведения, что и

три вентилятора, вращающиеся со скоростью 250 об/мин.

В этих условиях температура хладагента на выходе составила 39,85 °C. На следующем

этапе исследования было рассчитано, какая частота вращения двух вентиляторов из системы необходима для достижения аналогичного уровня теплоотвода и поддержания тем-

пературы хладагента на том же уровне. Результаты вычислительных экспериментов представлены в виде графиков, которые можно увидеть на рис. 10–11.

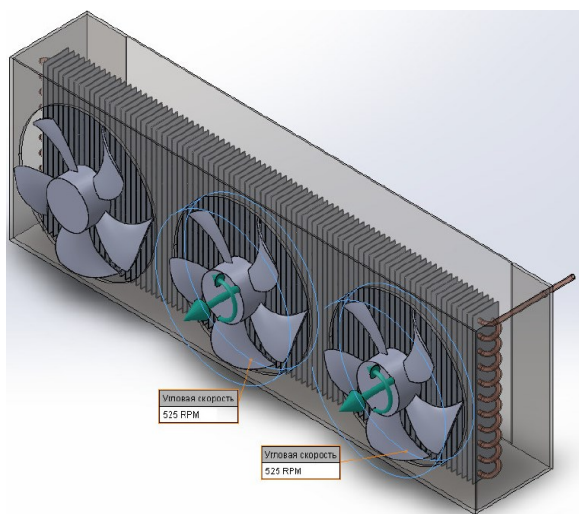


Рис. 9. Рабочие характеристики вентиляторов при частоте вращения 525 об/мин (два вентилятора)
Fig. 9. Fan operating characteristics at rotational speed 525 revolutions per minute (two fans)

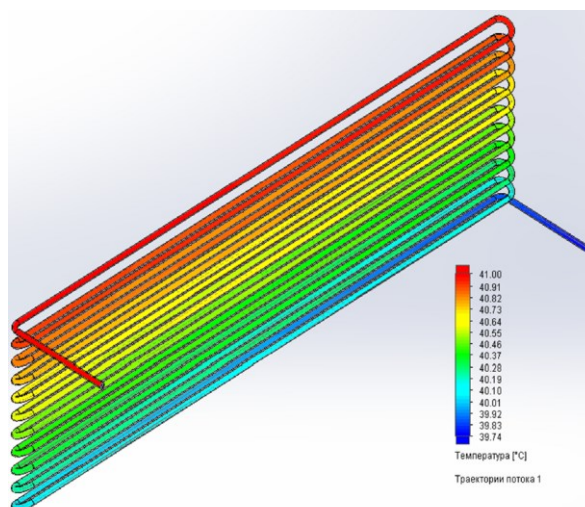


Рис. 10. Термодинамические параметры хладагента в трубке при работе двух вентиляторов с частотой 525 об/мин
Fig. 10. Thermodynamic parameters of the refrigerant in the tube during operation of two fans with a frequency of 525 revolutions per minute

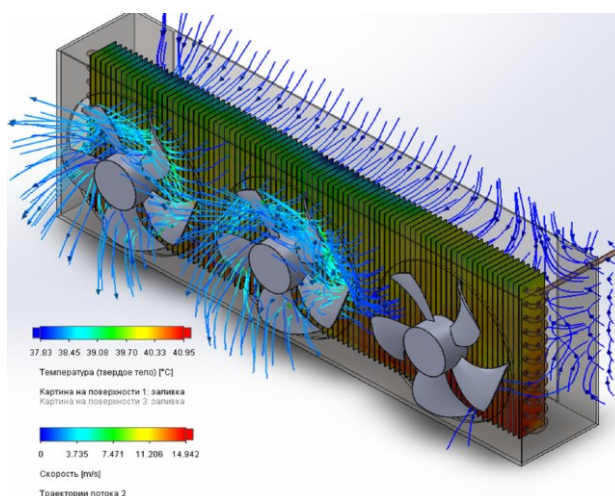


Рис. 11. Аэродинамическая характеристика охлаждения воздушной средой при работе двух вентиляторов с частотой 525 об/мин
Fig. 11. Aerodynamic characteristics of air cooling during operation of two fans with a frequency of 525 revolutions per minute

По результатам численного моделирования было установлено, что применение одного вентилятора с частотой вращения 1400 об/мин позволяет достичь сопоставимого уровня тепловой эффективности как и при одновременной работе трех вентиляторов, функционирующих на скорости 250 об/мин.

В процессе анализа зафиксирована стабильная температура хладагента, равная 39,85 °C.

Графическая интерпретация зависимости температурного режима охлаждающей среды от скорости вращения вентилятора представлена на рис. 12.

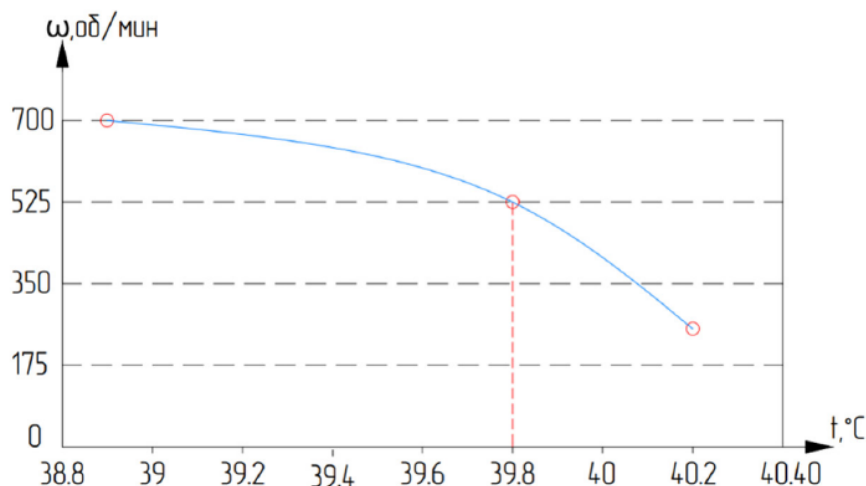


Рис. 12. Визуализация корреляционной связи между температурными показателями охладителя и оборотами воздуходвигателей

Fig. 12. Visualization of the correlation between the temperature parameters of the cooler and the revolutions of the air-pumping mechanisms

Вследствие выполненного моделирования установлено, что необходимо применение преобразователя частоты для регулирования частотой вращения вентиляторов. Особо следует отметить, что управление блоком конденсаторных батарей и вентиляторов осуществляется через частотный преобразователь. Для осмысления основополагающих

принципов создания математической модели необходимо проанализировать методы генерации синусоидальных напряжений на выходе частотного преобразователя. Генерация синусоидального выходного сигнала производится посредством автономного инвертора напряжения [17–26], который также известен как автономный инвертор напряжения (рис. 13).

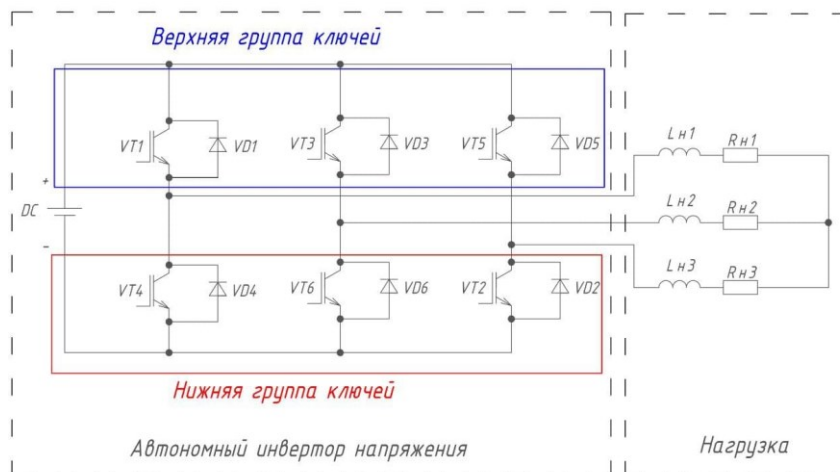


Рис. 13. Принципиальная схема автономного инвертора напряжения преобразователя частоты

Fig. 13. Schematic diagram of an autonomous voltage inverter of a frequency converter

Активный инвертор преобразователя частоты (АИПЧ) состоит из шести биполярных транзисторов с изолированным затвором, которые разделены на две группы: верхние и нижние ключи.

Процесс проектирования системы управления требует определения оптимальных комбинаций состояний переключателей для

поддержания заданного уровня выходного напряжения на выходе АИПЧ.

Для этого необходимо разработать схему генерации широтно-импульсной модуляции (ШИМ), основанную на синусоидальных входных напряжениях фаз А, В и С [27].

Метод векторной ШИМ определяет не конкретные значения мгновенно приложенных

напряжений к катушкам электромотора, а точные промежутки времени переключения обмоток через силовую схему моста, необходимые для формирования требуемого направления электрического поля. Исследование структур активной инверсии демонстрирует наличие

восемью допустимых комбинаций подключения транзисторных ключей, включая две позиции покоя. Любое из указанных состояний создает конкретный ориентированный вектор, формирующий геометрический правильный шестиугольник (рис. 14).

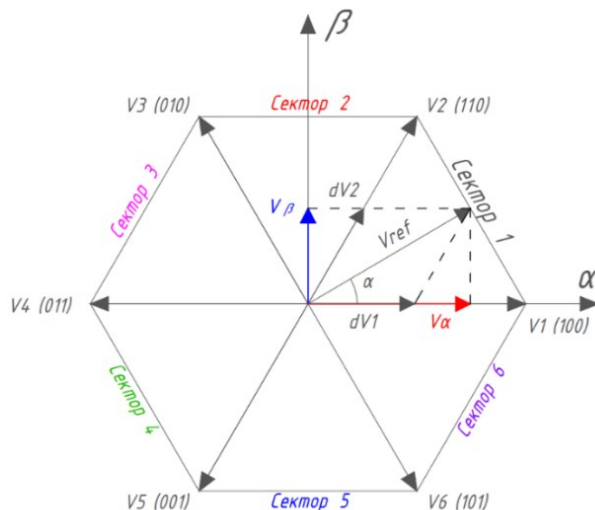


Рис. 14. Система векторов напряжений
Fig. 14. The system of stress vectors

Для формирования вектора напряжений необходимо произвести преобразование Парка, т. е. выполнить преобразование из неподвижной трехфазной системы координат в двухфазную α и β . [28].

Формирование вектора напряжения требует предварительного осуществления преобразования Парка, которое заключается в переходе из стационарной трехфазной системы координат в подвижную двухфазную систему α и β .

После определения ориентации результирующего вектора напряжения относительно полученной двухфазной системы, следующим шагом становится идентификация сектора, в границах которого этот вектор расположен. Установление конкретного сектора производится посредством сравнительного анализа углового значения самого вектора с границами секторов, обозначенными пересекающимися векторами напряжений.

Выполнение данной процедуры осуществляет функциональный модуль Sector Constructor.

Конструктивная схема частотного преобразователя (рис. 15) включает в себя следующие компоненты:

- источник питания с переменным напряжением промышленной сети;

- устройство для однонаправленного преобразования энергии (выпрямитель);

- емкость фильтра, предназначенная для сглаживания пульсаций в промежуточном контуре постоянного тока;

- шесть управляемых полупроводниковых ключа;

- активно-индуктивную нагрузку и приборы измерения осцилляционного типа для регистрации временных характеристик напряжений и токов нагрузки.

Система управления частотно-регулируемым приводом реализована на основе нескольких функциональных узлов: преобразователя координат Парка, устройства задания временных интервалов, модуля определения секторов вращения векторного напряжения и генератора синусоидальных форм напряжения питания.

Значение частоты выходного напряжения устанавливается через блок, формирующий постоянную величину частоты f_z , выраженную в герцах. В ходе моделирования были получены осциллограммы, отражающие поведение как линейных, так и фазных напряжений на выходе нагрузки. Эти графики представлены на рис. 16–19 и соответствуют работе системы при установленной частоте выходного напряжения $f = 50$ Гц.

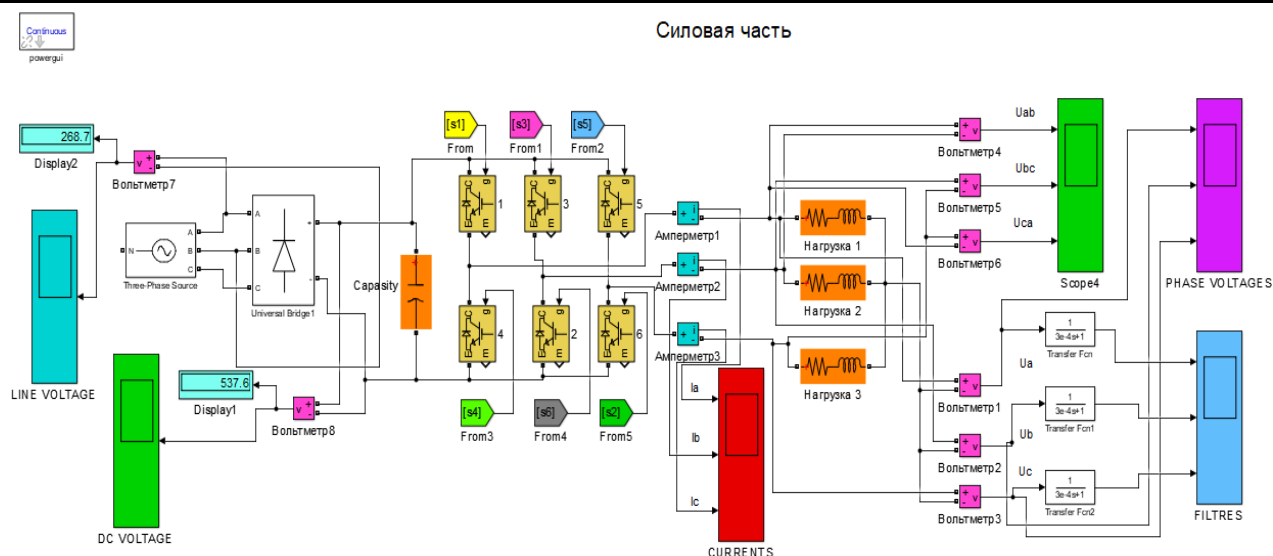


Рис. 15. Энергетический блок устройства преобразования частотных характеристик электрического сигнала

Fig. 15. The power unit of the device for converting the frequency characteristics of an electrical signal

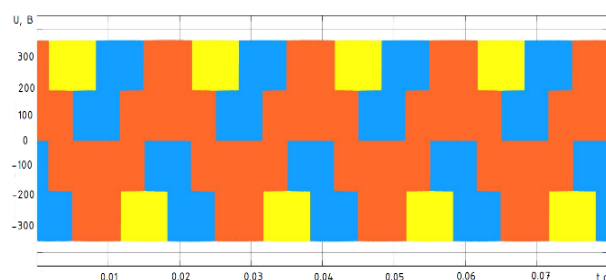


Рис. 16. Графическое представление осцилляции линейных потенциалов на подключенной нагрузке

Fig. 16. Graphical representation of linear potential oscillations on a connected load

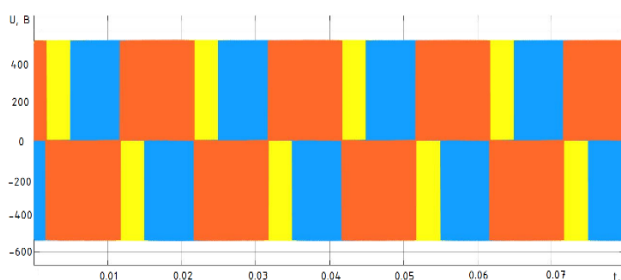


Рис. 17. Диаграмма колебаний межфазных напряжений на потребителе электроэнергии

Fig. 17. Diagram of fluctuations of interfacial voltages at the electric power consumer

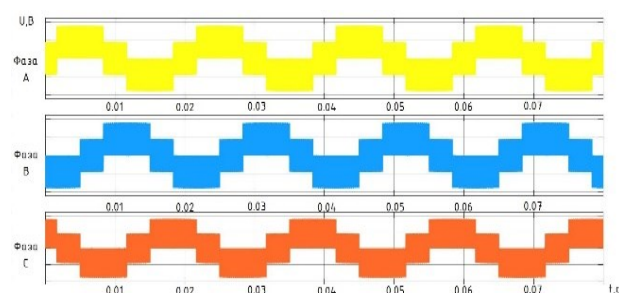


Рис. 18. График временных зависимостей потенциала фазы нагрузки в каналах А, В, С

Fig. 18. Graph of time dependences of the load phase potential in channels A, B, C

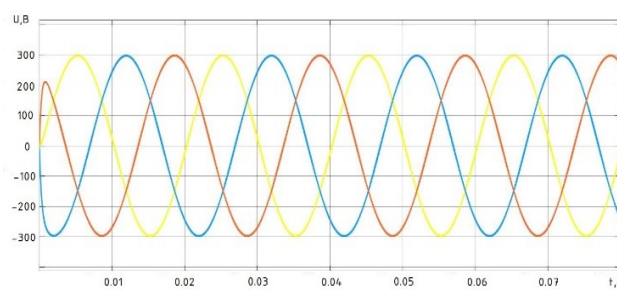


Рис. 19. Графическое отображение гармонических составляющих межфазных напряжений на нагрузочном элементе после прохождения фильтрационных процессов

Fig. 19. Graphical representation of the harmonic components of the interfacial stresses on the load element after passing through filtration processes.

С помощью инструмента XY Graph для проверки правильности формирования пространственного вектора напряжений построен график вращения пространственного вектора (рис. 20).

Моделирование позволило проанализировать уровень нелинейных искажений, возникающих при эксплуатации частотного преобразователя с применением метода ШИМ. Новаторским аспектом исследования стало включение гипотез касательно активных со-

противлений основных компонентов электрической цепи. Так, предполагалось, что активное сопротивление открытых вентилях приближается к нулю, а закрытых – стремится к бесконечно большому величинам. Используемые алгоритмизированные подходы обеспечивают значительное улучшение характеристик выходного напряжения, хотя предъявляют повышенные требования к ресурсам вычислений относительно стандартных схем широтно-импульсной модуляции.

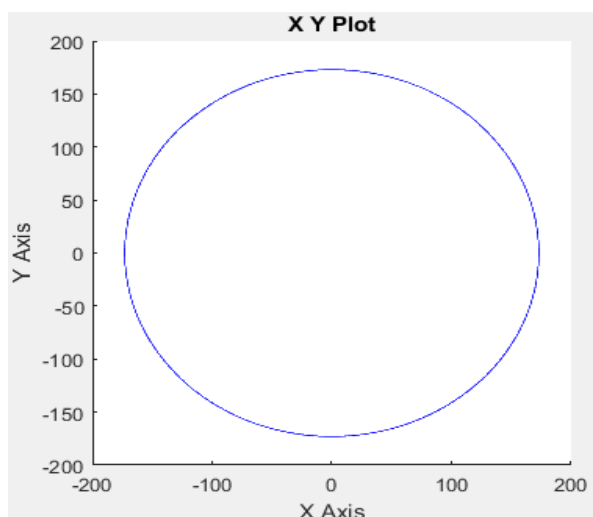


Рис. 20. Динамика траектории перемещения трехмерного вектора электрических потенциалов в вращающемся координатном пространстве

Fig. 20. Dynamics of the trajectory of a three-dimensional vector of electric potentials in a rotating coordinate space.

Работа частотно регулируемого преобразователя базируется на формировании ступенчатого изменения фазового напряжения, ограничивая количество допустимых векторных состояний фазного напряжения. Пространство напряжений делится на правильные шестиугольники, внутри каждого из которых возможно позиционирование итогового вектора напряжения путем пошагового переключения между ближайшими вершинами, обеспечивая возврат к начальной позиции фазы. Формируемое выходное напряжение определяется комбинацией трех смежных вершин, образующих замыкающий конец желаемого вектора напряжения в виде пространствременного треугольника. Применение технологии пространственной векторной ШИМ совместно с алгоритмами снижения гармонического состава и повышения эффективности операций переключения в силовых устройствах открывает новые перспективы повышения управляемости электроприводов вентиляторов. Использование новейших высокоэффективных микроконтроллеров дает возмож-

ность реализовать подобные стратегии, что положительно сказывается на результатах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа посвящена углублению методов анализа энергетической эффективности частотных преобразователей в схемах управления вентиляционными системами конденсаторов.

Проведен подробный обзор принципов проектирования пространственно-векторной ШИМ, раскрыты фундаментальные и практические аспекты разработки математической модели частотного преобразователя с функцией пространственно-векторной ШИМ. Моделирование проводилось средствами программного комплекса MATLAB/Simulink.

По результатам проведенных испытаний сформированы графики колебаний фазных и межфазных напряжений в нагрузочной цепи. Выявлены пути дальнейшего совершенствования подходов к формированию выходных сигналов, такие как дополнительная обработка сигнального тракта фильтрующими элементами и модернизация управляющих стра-

тегий. При помощи отображения траекторий вращающегося пространственного вектора в графике XY Graph проверялась достоверность проведенного моделирования. Современные технологические достижения, включающие применение частотных преобразователей с поддержкой пространственно-векторной ШИМ и инновационных решений по увеличению коэффициента полезного действия работы переключателей силовых модулей, открывают широкие возможности для повышения производительности электродвигателей промышленного назначения. Высокоскоростные цифровые платформы предоставляют значитель-

ные ресурсы для автоматизации производственных циклов. Практическая реализация предложенных разработок позволит увеличить производительность оборудования и обеспечить экономическую выгоду предприятиям. Особое значение имеет дальнейшая разработка способов дополнительной обработки спектрального состава выходного напряжения преобразователя, целью которой является уменьшение влияния отдельных гармоник. Такая мера приведет к снижению энергетических затрат на процессы коммутации и повысит показатели электромагнитной совместимости устройств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дюпон Ж.-Л., Домански П., Лебрен Ф., Циглер Ф. Роль холода в мировой экономике. 38-я Информационная записка МИХ по холодильным технологиям (июнь 2019 г.) // Холодильная техника. 2020. № 5. С. 6–13. EDN: UAYIY.
2. Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д. Математическое моделирование преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22. № 2. С. 46–58. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2023-2-46-58>. EDN: SGDZER.
3. Куцев Л.А., Саввин Н.Ю. Тепловизионные исследования оригинальной пластины теплообменника // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2021. № 1. С. 38–45. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-1-38-45>. EDN: JCGTZO.
4. Азизов. Д., Сайдиев Ф. Основы холодильной техники и технического обслуживания холодильных систем. Ташкент: Baktria press, 2017. 176 с.
5. Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д. Исследование эффективности охлаждения пластинчатого теплообменника конденсатора промышленной холодильной машины при различных скоростях вращения вентиляторов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 42–56. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56>. EDN: FLWLIB.
6. Ильина Т.Н., Саввин Н.Ю., Аверкова О.А., Логачев К.И. Возобновляемые и вторичные источники энергии инженерных систем при эксплуатации и реконструкции зданий и сооружений // Вестник Евразийской науки. 2023. Т. 15. № 4. С. 1–12. EDN: ENJZMH.
7. Виноградов А.Б., Коротков А.А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2018. 184 с. EDN: UTVMTV.
8. Лунева С.К. Моделирование процессов тепломассопереноса в программной среде SolidWorks/FlowSimulation // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2018. № 2. С. 27–31. EDN: XQCQRV.
9. Ильина Т.Н., Саввин Н.Ю., Аверкова О.А., Логачев К.И. Цифровой двойник инженерных систем общественного здания // Вестник Евразийской науки. 2024. Т. 16. № 6. С. 1–11. EDN: WIIZJG.
10. Попов А.Ю. Моделирование распределения воздушного потока в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. № 3-3. С. 74–77. EDN: YFMCBP.
11. Соловьёв А.Н., Глазунова Л.В. Моделирование процесса охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры в SolidWorks // Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т. 10. № 4. С. 466–473. EDN: NBRXPZ.
12. Саввин Н.Ю. Математическое моделирование жизненного цикла инженерных систем здания // Инженерные системы и сооружения. 2024. № 4. С. 15–23. <https://doi.org/10.36622/2074-188X.2024.34.62.002>. EDN: CVDXBN.
13. Коркодинов Я.А. Обзор семейства k-ε моделей для моделирования турбулентности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2013. Т. 15. № 2. С. 5–16. EDN: QYXPQP.
14. Корниенко Ф.В. Увеличение эффективности испарительного конденсатора компрессионных холодильных машин // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3. С. 231–234. EDN: PJZWLR.
15. Саввин Н.Ю., Лесовик Р.В., Ильина Т.Н. Повышение эффективности систем теплоснабжения // Строительство и архитектура. 2025. Т. 13. № 2. С. 1–3. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-2-3-3>. EDN: KLWBDJ.

16. Кореньков Е.В. Применение частотного регулирования в системах вентиляции для повышения энергоэффективности // Вестник магистратуры. 2022. № 2-2. С. 32–34. EDN: LKSLVR.
17. Semenyshyna I., Haibura Yu., Mushenyk I., Sklyarenko I., Kononets V. Development of the Method for Structural-Parametric Optimization In Order To Improve the Efficiency of Transition Processes In Periodic Systems // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4. Iss. 3. P. 29–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140862>. EDN: YGJCLJ.
18. Moskalenko V., Dovbysh A., Naumenko I., Moskalenko A., Korobov A. Improving the Effectiveness of Training the Onboard Object Detection System for a Compact Unmanned Aerial Vehicle // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4. Iss. 9. P. 19–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139923>. EDN: YGJWKT.
19. Rakhmonov I.U., Saidkhodzhaev A.G., Khakimov T.Kh., Niyozov N.N. Design and Implementation of Programmable Logic Educational Simulators for Enhancing Power Supply System Learning // Проблемы современной науки и образования. 2024. № 3. С. 10–13. EDN: DOPUXD.
20. Саввин Н.Ю., Овсянников Ю.Г., Феоктистов А.Ю., Алифанова А.И. Анализ подходов проектирования с использованием средств информационного моделирования с учётом особенностей этапов жизненного цикла объекта // Строительное производство. 2025. № 2. С. 97–104. https://doi.org/10.54950/26585340_2025_2_97. EDN: AKBSHE.
21. Savvin N.Yu., Ramazanov R.S., Alifanova A.I. Review of Systems Approach and Design Methods, Including CAD Methods and Systems Engineering // Science Prospects. 2025. Iss. 5. P. 237–241. EDN: PNSJXZ.
22. Куцев Л.А., Мелькумов В.Н., Саввин Н.Ю. Компьютерное моделирование движения теплоносителя в гофрированном канале пластинчатого теплообменника // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. № 4. С. 51–58. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2020.60.4.005>. EDN: QEMGOY.
23. Голембиовский Ю.М., Томашевский Ю.Б., Щербаков А.А., Луков Д.Ю., Старков А.В. Автономный однофазный инвертор с высоким качеством выходного напряжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: энергетика. 2018. Т. 18. № 1. С. 75–81. <https://doi.org/10.14529/power180110>. EDN: YVJCMD.
24. Кривоногов С.В., Романова А.А. Модель системы мониторинга для повышения качества энергии в системах электроснабжения потребителей // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10. № 4. С. 89–98. EDN: PWEFNN.
25. Викентьева О.Л., Дерябин А.И., Шестакова Л.В., Кычкин А.В. Синтез информационной системы управления подсистемами технического обеспечения интеллектуальных зданий // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 10. С. 1191–1201. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.10.1191-1201>. EDN: ZRZRUP.
26. Васильев Б.Ю., Козярук А.Е., Мардашов Д.В. Увеличение коэффициента использования автономного инвертора при пространственно-векторном управлении // Электротехника. 2020. № 4. С. 14–23. EDN: NQSEPG.
27. Zhilin E.V., Prasol D.A., Savvin N.Y. Optimization of the Structure of Filter-Compensating Devices in Networks with Powerful Non-Linear Power Consumers Based on Fuzzy Logic // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2022. Vol. 12. Iss. 6. P. 5730–5737. <http://doi.org/10.11591/ijece.v12i6.pp5730-5737>.
28. Маклаков А.С. Гибридный алгоритм модуляции на основе пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. № 1. С. 92–100. <https://doi.org/10.14529/power180112>. EDN: LAVJUD.
29. Костылев А.В. Векторная ШИМ для двухсекционного преобразователя частоты // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2015. Т. 15. № 2. С. 34–40. <https://doi.org/10.14529/power150205>. EDN: TNUSLD.

REFERENCES

1. Dyupon Zh.-L., Domanski P., Lebren F., Tsigler F. The Role of Refrigeration in the Global Economy. 38th IIR Information Note on Refrigeration Technologies (June 2019). *Refrigeration Technology*. 2020;5:6-13. (In Russ.). EDN: UAYIY.
2. Savvin N.Yu., Garbuzov D.D. Mathematical Simulation of Frequency Converter with Space Vector Pulse Width Modulation. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):46-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2023-2-46-58>. EDN: SGDZER.
3. Kushev L.A., Savvin N.Yu. Thermal Imaging Studies of the Original Heat Exchanger Plate. Bulletin of Belgorod State Technological University Named After. V. G. Shukhov. 2021;1:38-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-1-38-45>. EDN: JCGTZO.

4. Azizov. D., Saidiev F. *Fundamentals of Refrigeration Engineering and Maintenance of Refrigeration Systems*. Tashkent: Baktria Press, 2017. 176 p. (In Russ.).
5. Savvin N.Tu., Garbuzov D.D. Investigation of the Cooling Efficiency of the Plate Heat Exchanger of the Condenser of an Industrial Refrigeration Machine at Different Fan Speeds. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named After. V. G. Shukhov*. 2023;10:42-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56>. EDN: FLWLIB.
6. Ilina T.N., Savvin N.Yu., Averkova O.A., Logachev K.I. Renewable and Secondary Energy Sources Of Engineering Systems in the Operation and Reconstruction of Buildings and Structures. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023;15(4):1-12. (In Russ.). EDN: ENJZMH.
7. Vinogradov A.B., Korotkov A.A. *Control Algorithms for a High-Voltage Multilevel Frequency Converter*. Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin, 2018. 184 p. (In Russ.).
8. Luneva S.K. Modeling of Heat and Mass Transfer Processes in the Software Environment Solid-Works/Flowsimulation. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa*. 2018;2:27-31. (In Russ.). EDN: XQCQRV.
9. Ilina T.N., Savvin N.Yu., Averkova O.A., Logachev K.I. Digital Twin of Public Building Engineering Systems. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(6):1-11. (In Russ.). EDN: WIIZJG.
10. Popov A.Yu. Simulating Air Flow Distribution in Solidworks Flow Simulation Software. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2017;3-3:74-77. (In Russ.). EDN: YFMCBP.
11. Soloviev A.N., Glazunova L.V. Simulation of Electronic Equipment Elements Cooling In SolidWorks. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010;10(4):466-473. (In Russ.). EDN: NBRXPZ.
12. Savvin N.Yu. Mathematical Modeling of the Life Cycle of Building Engineering Systems. *Inzhenernye sistemy i sooruzheniya*. 2024;4:15-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/2074-188X.2024.34.62.002>. EDN: CVDXBN.
13. Korkodinov Ia.A. The Review of Set of $k-\epsilon$ Models for Modeling Turbulence. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science*. 2013;15(2):5-16. (In Russ.). EDN: QYXPQP.
14. Kornienko F.V. Increasing the Efficiency of the Evaporative Condenser of Compression Refrigeration Machines. *Engineering Journal of Don*. 2012;3:231-234. (In Russ.). EDN: PJZWLR.
15. Savvin N.Yu., Lesovik R.V., Ilina T.N. Improving the Efficiency of Heating Systems. Construction and Architecture. 2025;13(2):1-3. (In Russ.). <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-2-3-3>. EDN: KLWBDJ.
16. Korenkov E.V. Application of Frequency Control in Ventilation Systems to Improve Energy Efficiency. *Vestnik magistratury*. 2022;2-2:32-34. (In Russ.). EDN: LKSLVR.
17. Semenyshyna I., Haibura Yu., Mushenyk I., Sklyarenko I., Kononets V. Development of the Method for Structural-Parametric Optimization In Order To Improve the Efficiency of Transition Processes In Periodic Systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018;4(3):29-35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140862>. EDN: YGJCLJ.
18. Moskalenko V., Dovbysh A., Naumenko I., Moskalenko A., Korobov A. Improving the Effectiveness of Training the Onboard Object Detection System for a Compact Unmanned Aerial Vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018;4(9):19-26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139923>. EDN: YGJWKT.
19. Rakhmonov I.U., Saidkhodzhaev A.G., Khakimov T.Kh., Niyozov N.N. Design and Implementation of Programmable Logic Educational Simulators for Enhancing Power Supply System Learning. *Problems of Modern Science and Education*. 2024;3:10-13. EDN: DOPUXD.
20. Savvin N.Yu., Ovsyannikov Yu.G., Feoktistov A.Yu., Alifanova A.I. Analysis of Design Approaches Using Information Modeling Tools Taking Into Account the Characteristics of the Stages of the Object's Life Cycle. *Construction Production*. 2025;2:97-104. (In Russ.). https://doi.org/10.54950/26585340_2025_2_97. EDN: AKBSHE.
21. Savvin N.Yu., Ramazanov R.S., Alifanova A.I. Review of Systems Approach and Design Methods, Including CAD Methods and Systems Engineering. *Science Prospects*. 2025;5:237-241. EDN: PNSJXZ.
22. Kushchev L.A., Melkumov V.N., Savvin N.Yu. Computer Simulation of Flow in Corrugated Channel of Plate Heat Exchanger. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020;4:51-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/VSTU.2020.60.4.005>. EDN: QEMGOY.
23. Golembiovsky Yu.M., Tomashevsky Yu.B., Scherbakov A.A., Lukov D.Yu., Starkov A.V. Autonomous Single-Phase Inverter With High Quality of Output Voltage. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2018;18(1):75-81. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power180110>. EDN: YVJCMD.
24. Krivonogov S.V., Romanova A.A. Monitoring System Model for Improving Energy Quality in Consumer Power Supply Systems. *International Journal of Open Information Technologies*. 2022;10(4):89-98. (In Russ.). EDN: PWEFNN.

25. Vikentyeva O.L., Deryabin A.I., Shestakova L.V., Kychkin A.V. Synthesis of Information System for Smart House Hardware Management. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2017;12(10):1191-1201. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.10.1191-1201>. EDN: ZRZRUP.
26. Vasiliev B.Y., Kozyaruk A.E., Mardashov D.V. Increasing the Utilization Factor of an Autonomous Inverter Under Space Vector Control. *Russian Electrical Engineering*. 2020;4:14-23. (In Russ.). EDN: NQSEPG.
27. Zhilin E.V., Prasol D.A., Savvin N.Y. Optimization of the Structure of Filter-Compensating Devices in Networks with Powerful Non-Linear Power Consumers Based on Fuzzy Logic. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022;12(6):5730-5737. <http://doi.org/10.11591/ijece.v12i6.pp5730-5737>.
28. Maklakov A.S. Hybrid Modulation Based On SHEPWM and SVPWM. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2018;18(1):92-100. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power180112>. EDN: LAVJUD.
29. Kostylev A.V. The Vector PWM for Two-Section Frequency Converter. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2015;15(2):34-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power150205>. EDN: TNUSLD.

Информация об авторах

Саввин Никита Юрьевич,

к.т.н., доцент кафедры теплогазоснабжения
и вентиляции,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46,
Россия,
✉e-mail: n-savvin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>
Author ID: 1108836

Ильина Татьяна Николаевна,

д.т.н., профессор кафедры теплогазоснабжения
и вентиляции,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия,
e-mail: ilinatat50@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8677-256X>

Лесовик Руслан Валерьевич,

д.т.н., профессор кафедры строительное
материаловедение, изделия и конструкции,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46,
Россия,
e-mail: ruslan_lesovik@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8973-9271>
Author ID: 367491

Шевцова Анастасия Геннадьевна,

д.т.н., профессор кафедры эксплуатации
и организации движения автотранспорта,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия,
e-mail: shevcova-anastasiya@mail.ru
Author ID: 640475

Information about the authors

Nikita Yu. Savvin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of
The Department Heat and Gas Supply
and Ventilation,
Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov,,
46, Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia,
✉e-mail: n-savvin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>
Author ID: 1108836

Tatyana N. Ilyina,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of The Department
of Heat and Gas Supply and Ventilation,
Belgorod State Technical University
named after V.G. Shukhov,
46, Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia,
e-mail: ilinatat50@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8677-256X>

Ruslan V. Lesovik,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of The Department
of Construction Materials Science, Products
and Structures,
Belgorod State Technical University
named after V.G. Shukhov,
46, Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia,
e-mail: ruslan_lesovik@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8973-9271>
Author ID: 367491

Anastasia G. Shevtsova,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
Operation and Organization of Vehicle Traffic,
Belgorod State Technical University
named after V.G. Shukhov,
46, Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia,
e-mail: ido@bstu.ru
Author ID: 640475

Киреев Виталий Михайлович,
к.т.н., доцент кафедры теплогазоснабжения
и вентиляции,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46,
Россия,
e-mail: vit31rus@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9907-6923>
Author ID: 731062

Vitaly M. Kireev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Heat and Gas Supply
and Ventilation,
Belgorod State Technical University
named after V.G. Shukhov,
46, Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia,
e-mail: vit31rus@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9907-6923>
Author ID: 731062

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regard-
ing the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and ap-proved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 16.04.2025.
Одобрена после рецензирования 12.05.2025.
Принята к публикации 13.05.2025.

Information about the article

The article was submitted 16.04.2025.
Approved after reviewing 12.05.2025.
Accepted for publication 13.05.2025.



Критерии системы качества проектных организаций: модульный подход с учетом рисков

А.Ю. Самарин¹, А.Х. Байбурин²✉

¹ООО «Априори-Строй», Челябинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия

Аннотация. Цель исследования – разработка критериев системы качества проектной организации с применением модульного и риск-ориентированного подходов. Модульный подход позволяет оценить различные аспекты деятельности проектной организации, деконструируя их на отдельные модули, исходя из организационно-технической модели функционирования. Предложены модули кадрового потенциала, инженерно-технической обеспеченности и оценки качества проектной продукции. В каждом модуле оцениваются критерии с определенными коэффициентами весомости. Определение количественных показателей критериев производится экспертным методом, а назначение коэффициентов весомостей базируется на многокритериальном методе анализа иерархий (АНР). На примере модуля кадрового потенциала показано составление матрицы парных сравнений и расчеты индексов ее согласованности. Риск-ориентированный подход классифицирует проектные организации на три уровня в зависимости от комплексной оценки по трем модулям. Полученные численные значения факторов позволяют произвести ранжирование по степени значимости, и на основе этого разработать корректирующие мероприятия, направленные на улучшение проблемных областей деятельности проектной организации. Систематизированный перечень критериев вводит комплексный показатель системы качества предприятия, который может служить индикатором подготовленности проектировщиков к выполнению контрактов различного уровня с учетом возможных рисков ошибок. Результаты апробации показали, что модульный подход в управлении качеством позволяет не только повысить эффективность проектной организации, но и снизить риски, связанные с ошибками проектирования и строительства.

Ключевые слова: проектирование зданий и сооружений, управление рисками в строительстве, анализ видов и последствий отказов, приоритетное число риска.

Для цитирования: Самарин А.Ю., Байбурин А.Х. Критерии системы качества проектных организаций: модульный подход с учетом рисков // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 516–525. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-516-525>. EDN: YQQYKF.

Original article

Criteria of the quality system of design organizations: modular approach taking into account risks

Alexander Yu. Samarin¹, Albert Kh. Baiburin²✉

¹Apriori-Stroy LLC, Chelyabinsk, Russia

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The purpose of the research is to develop criteria for the quality system of a design organization using modular and risk-based approaches. The modular approach makes it possible to evaluate various aspects of the project organization's activities, deconstructing them into separate modules based on the organizational and technical model of functioning. Modules of human resources, engineering and technical support and evaluation of the quality of project products are proposed. In each

module, criteria with certain weight coefficients are evaluated. The quantitative indicators of the criteria are determined by an expert method, and the assignment of weighting coefficients is based on the multi-criteria hierarchy analysis (AHP) method. Using the personnel potential module as an example, the compilation of a matrix of paired comparisons and calculations of its consistency indices are shown. The risk-based approach classifies project organizations into three levels, depending on a comprehensive assessment in three modules. The numerical values of the factors obtained make it possible to make a ranking according to the degree of significance, and based on this, to develop corrective measures aimed at improving the problematic areas of the project organization. The systematized list of criteria introduces a comprehensive indicator of the enterprise's quality system, which can serve as an indicator of designers' readiness to perform various levels of contracts, taking into account possible error risks. The results of the testing showed that a modular approach to quality management allows not only to increase the efficiency of the design organization, but also to reduce the risks associated with design and construction errors.

Keywords: design of buildings and structures, risk management in construction, failure mode and effects analysis, risk priority number.

For citation: Samarin A.Yu., Baiburin A.Kh. Criteria of the quality system of design organizations: modular approach taking into account risks. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):516-525. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-516-525>. EDN: YQQYKF.

ВВЕДЕНИЕ

Существующее положение в строительной отрасли характеризуется ростом требований к безопасности, экономичности и средовой устойчивости зданий. Многофакторность выбора решений и материалов обосновывает особое внимание к разработке проектной документации, как к иницилирующему этапу, критически влияющему на жизненный цикл объекта строительства. Дефекты проектирования, реализуя накопительный эффект негативных рисков, приводят к серьезным последствиям на этапах возведения и эксплуатации здания, что подтверждено исследованиями и статистическими данными [1–3]. Согласно исследованию Европейского комитета по стандартизации (CEN), около 20 % аварий в строительстве связаны с недостаточным качеством проектных решений [4]. Аналогичные исследования на территории Российской Федерации приводят данное значение в диапазоне от 10 до 35 % [5]. Верификации ошибок проектирования служат отлаженные процессы внутреннего контроля, независимой экспертизы и авторского надзора на этапах возведения объекта [6]. Тем не менее, на основании статистического анализа лишь 10 % объектов, при проведении экспертизы проектной документации не имели замечаний, а наиболее часто локализация дефектов относилась к вопросам конструирования (15 %), расчетной части (23 %) и оформления чертежей (24 %) [7]. Необходимость снижения рисков проектных ошибок актуализирует разработку критериев системы качества проектной организа-

ции, обеспечивающих определение и интерпретацию уровня качества и направленных на снижения вероятности возникновения негативных рисков путем проведения корректирующих мероприятий.

Достижение данной цели возможно при внедрении комплексного подхода к управлению качеством на всех этапах проектной деятельности, начиная с установления системных требований отбора подрядчика и заканчивая проектным сопровождением выполнения строительных работ, в том числе с применением риск-ориентированных подходов [8].

Методологические подходы Европейского Союза (ЕС) в разработке критериев качества проектной деятельности отражены в директивах и стандартах ЕС [9, 10] и нацелены на охват всего жизненного цикла объекта от начальной концепции до эксплуатации, что минимизирует риск дефектов, связанных с некачественным проектированием. Принятая в развитых странах категоризация объекта проектирования по ответственности определяет уровень внимания к нему органов государственного контроля и степень регулирующих мер. При этом внедрение технологий информационного моделирования зданий (BIM) позволяет не только улучшить качество проектной документации, но и снизить риски, связанные с координацией и корректировкой проектных решений на этапах возведения и эксплуатации зданий и сооружений [11].

Критерии качества проектных работ в строительной отрасли Российской Федерации установлены требованиями нормативно-

технической документации и федерального законодательства в области безопасности, надежности и долговечности строительных объектов. Ключевым регулятором является независимая экспертиза, определяющая их соответствие требованиям технических регламентов и исходных данных. Выявленные на этапе строительства и эксплуатации критические дефекты, как правило, приводят к необходимости повторной переработки проектных решений и росту затрат на устранение ошибок в процессе использования объекта. Анализируя методологические подходы отечественных и зарубежных государственных регуляторов, стоит отметить отсутствие на этапах контроля единой системы качественных показателей и учета рисков, позволяющей количественно и качественно оценивать уровень проектных решений экспертами в рамках единого подхода ко всем рассматриваемым объектам [12]. Данное условие фактически создает основание вольной интерпретации трактовок законодательства и строительных норм, что ведет к недостаточному уровню оценки и малой (мнимой) величине идентифицированных рисков.

МЕТОДЫ

Модульный подход в оценке проектной организации позволяет структурировать и детализировать критерии качества методами декомпозиции организационной управленческой модели, системного подхода и квалиметрии [13]. Проведенные научные исследования подчеркивают важность интеграции критериев качества проектной организации в единую систему с формированием комплексного показателя [2, 13]. Применение методов многофакторного анализа обосновывает актуальность критериев в контексте всего жизненного цикла объекта строительства [14, 15]. В исследовании [14] разработаны 26 критериев в отношении выбора проектных решений и материалов, влияющих на качественные характеристики средовой устойчивости здания и его энергоэффективности.

Имплементация рассмотренных методологических основ в рамках разработки критериев на основании модульного подхода оценки качества проектной организации обоснована рядом основополагающих принципов: декомпозиция; системный подход; иерархичность и гибкость.

Декомпозиция

Разделение структуры процесса проектирования на отдельные модули, каждый из которых отвечает за определенный аспект деятельности проектной организации, что существенно упрощает процесс анализа и позво-

ляет более точно оценивать специфические параметры присущие отдельным критериям качества организационной и управленческой структуры.

Системный подход

Взаимосвязанность модулей и критериев качества обеспечивает комплексную оценку деятельности проектной организации с учетом факторов риска и операционной производительности. Комплексная оценка качества формируется на основе интегрального показателя, который учитывает весомость каждого критерия и модуля в целом, позволяя получить общую оценку с учетом всех аспектов деятельности и при этом определить эффективность работы по каждому аспекту деятельности.

Иерархичность и гибкость

Модули структурируются в системные иерархии, где общая оценка качества формируется на основе взвешенной оценки каждого модуля и входящих критериев. Возможность адаптации модульной структуры в зависимости от специфики организации и задач анализа делает подход универсальным для различных типов масштаба и сложности организационных структур.

Разработка критериев качества для оценки проектной организации является ключевым этапом, определяющим объективность всей системы оценки.

Использование методологических основ системного подхода и многокритериального анализа [14] позволяют выявить критерии качества в условиях множественных целей и ограничений, характерных для процесса проектирования.

Примененный в формировании показателей и весомости метод анализа иерархий (АНР), предложенный Томасом Саати [16], определяет реализацию принципа ранжирования на основе сравнительных оценок, что позволяет структурировать сложные задачи, такие как оценка качества проектной организации, на иерархические уровни, упрощая процесс оценки и выбора оптимальных решений.

Анализ требований государственных стандартов, профессиональных и отраслевых стандартов, научных исследований и практических данных послужило основой формирования перечня релевантных и измеримых критериев качества, отражающих наиболее ответственные сферы проектной деятельности.

Реализация методологического подхода АНР заключается в четком определении цели, в данном случае, это формирование показателей качества для оценки проектной органи-

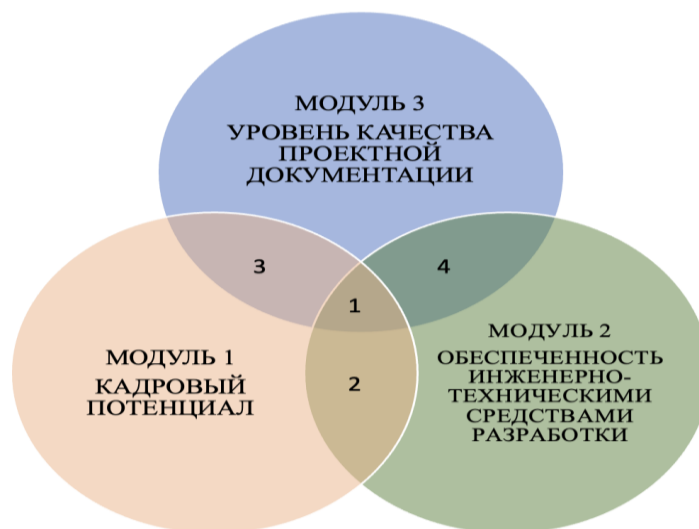
зации и формировании иерархической структуры, которая делится на несколько уровней.

Первый уровень определяет цель, заключенную в ранжировании критериев качества, на втором уровне анализируется основные модули оценки и на третьем уровне – крите-

рии качества для каждого модуля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результатом анализа структур проектных организаций выделены три ключевых модуля, которые охватывают наиболее важные аспекты технологического процесса (рисунок).



Взаимосвязь модулей оценки проектной организации
Interrelation of modules for design organization assessment

Модуль кадрового потенциала определяет уровень используемых трудовых ресурсов, что является основой успешного выполнения проектных задач. Модуль инженерно-технической обеспеченности обосновывает зависимость уровня качества от степени технической оснащённости, информационной безопасности и мобильности компании. Модулем уровня качества проектов оценивается соответствие выпускаемой документации нормативным и иным требованиям.

На основе взаимосвязей между исследуемыми модулями, предложена типология проектных организаций, характеризующихся различным уровнем качества и величиной рисков, что позволяет их классифицировать и разработать соответствующие стратегии управления (табл. 1). Исследуемая типология позволяет выделить организации по уровню системы качества и присущих рисков, что важно для разработки стратегии управления качеством и рисками и принятия решения о привлечении компании к конкурсным процедурам на исполнение контрактов проектных работ. Если для организаций высокого уровня основное внимание должно быть направлено на поддержании стандартов и адаптацию к внешним изменениям, то организации среднего уровня должны концентрироваться на улучшении внутренних процессов и внедрении

современных технологий. Низкокачественные показатели требуют кардинальных изменений в подходах к управлению качеством и модернизации всех аспектов проектной деятельности, возможности таких организаций на отраслевом рынке должны быть серьезно ограничены в части доступа к конкурентным конкурсным процедурам. При разработке и оценке критериев качества модуля кадрового потенциала K_1 методом анализа иерархий (АНР) произведено парное сравнение исследуемых показателей, каждому из которых присвоено кодированное значение. Принятые к анализу критерии по модулю K_1 (табл. 2): уровень аттестации (1.1), профессиональное совершенство (1.2), квалификация (1.3), уровень коллективного опыта (1.4), технологии информационного моделирования (BIM) (1.5), научный потенциал (1.6), стабильность инженерного состава (1.7), удовлетворенность сотрудников (1.8), уровень командной слаженности (1.9). Нормализация значений матрицы производится через отношение суммированного значения столбцов к количеству исследуемых критериев:

$$K_i = W_i / W_{i+1,n}, \quad (1)$$

где K_i – кодированное значение i -критерия; W_i – балл приоритета показателя; n – число оцениваемых критериев.

Таблица 1. Классификация проектных организаций: модульный подход

Table 1. Classification of project organizations: a modular approach

Уровень организации	Качественные показатели	Уровень рисков
Высокий уровень (поз. 1 рис. 1)	<ul style="list-style-type: none"> - высокий уровень профессионализма и квалификации; - стабильность кадрового состава; - интегрирование BIM среды; - адаптивность и мобильность рабочих мест; - высокий уровень оперативного контроля 	Низкие, связанные с внешними факторами, такими как изменения в нормативной базе или экономическая нестабильность
Средний уровень (поз. 3, 4 рис. 1)	<ul style="list-style-type: none"> - средний уровень профессионализма и квалификации; - малая интеграция BIM среды при достаточном уровне технического оснащения; - ограниченная мобильность рабочих мест; - неразвита система электронного документооборота 	Средние с локализацией во внутренних процессах, таких как текучесть кадров, недостаточная интеграция современных технологий или неэффективный операционный контроль качества
Низкий уровень (поз. 2 рис. 1)	<ul style="list-style-type: none"> - низкий уровень профессионализма и квалификации; - высокая текучесть и неудовлетворенность кадрового состава; - устаревшее оборудование и средства проектирования; - неразвита информационная среда компании 	Высокие риски, связанные с низким качеством выполнения проектов, возможными сбоями в техническом обеспечении и кадровыми проблемами

Таблица 2. Матрица парных сравнений критериев по модулю кадровый потенциал

Table 2. A matrix of paired comparisons of criteria modulo human potential

K_1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8
1.1	1	3	5	3	7	5	4	6	4
1.2	1/3	1	3	2	5	3	3	4	3
1.3	1/5	1/3	1	1/2	3	2	2	3	2
1.4	1/3	1/2	2	1	4	2	3	3	3
1.5	1/7	1/5	1/3	1/4	1	1/2	1/2	2	1
1.6	1/5	1/3	1/2	1/2	2	1	2	2	3
1.7	1/4	1/3	1/2	1/3	2	1/2	1	3	2
1.8	1/6	1/4	1/3	1/3	1/2	1/2	1/3	1	2
1.9	1/4	1/3	1/2	1/3	1	1/3	1/2	1/2	1

Вес каждого критерия исчисляется средним арифметическим строк нормализованной матрицы (табл. 3):

$$P_i = [1 \times (W_1/W_2) \times \dots \times (W_i/W_n)] / n, \quad (2)$$

где P_i – весомость критерия качества по модулю; K_i – кодированное значение i -критерия; W_i – балл приоритета показателя; n – число оцениваемых критериев.

Таблица 3. Весомость критериев по модулю кадрового потенциала

Table 3. The weight of criteria modulo human potential

K_1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8
W	0,328	0,191	0,102	0,121	0,035	0,063	0,080	0,035	0,045

Аналогично были построены матрицы парных сравнений по остальным модулям. Согласованность матриц парных сравнений проверялась индексами согласованности (CI) и случайного индекса (RI). Индекс CI определен как отклонение от согласованности, где значение CI , близкое к нулю, указывает на высо-

кую согласованность и рассчитывается по формуле:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (3)$$

где CI – индекс согласованности; λ_{\max} – максимальное собственное значение матриц; n – число критериев.

Величина отношения согласованности CR рассчитывается как отношение:

$$CR = CI / RI, \quad (4)$$

где CR – отношение согласованности; CI – индекс согласованности; RI – случайное согласованное индексное значение размерности матрицы (табличное значение).

Для матрицы размером 9×9 индекс $RI = 1,45$. Для рассматриваемого случая $\lambda_{\max} = 9,35$, таким образом $CI = 0,043$, $CR = 0,03$. При величине $CR < 0,1$ считается, что матрица согласована достаточно хорошо, что обеспечивает заданные погрешности определения численных величин весомостей.

Аналогичным способом были рассчитаны показатели по модулям уровня инженерно-технической обеспеченности проектной организации (K_2) и оценки качества проектов (K_3).

Сводная таблица весомости критериев по каждому модулю получена переранжированием показателей, исходя из определенных величин весомостей критериев в каждом модуле (табл. 4). Проведенный анализ критериев качества проектной документации развивает положения научных работ данной тематики.

В ранее представленных трудах [17, 18] определение показателей аналогично базируется на принципах экспертного подхода, при этом отсутствие имплементации принципов модульного подхода не позволяет в полной мере отразить их взаимосвязь в организационной проектной деятельности, учитывая оценку параметров технологического процесса и роль участников в создании интеллектуального продукта.

Научными работами [2, 19] предложены вариации комплексного подхода к оценке качества строительства и определения единичных показателей. Необходимость анализа критериев качества, исходя из их согласованности с наблюдаемым уровнем дефектности проектной документации и строительства и присущими рисками, отражена в трудах зарубежных ученых [8, 11, 20].

Предложенная методика углубляет и расширяет описанные подходы в части проектных работ, как основополагающего начального процесса жизненного цикла строительного объекта. Известно, что в процентном отношении возможность повышения эффективности продукции на стадиях жизненного цикла составляет: на стадии НИОКР и проектирования – 75 %, подготовки производства – 19 %, тогда как на стадии производства – лишь 6 % [21].

Ошибки проектирования являются источником значительных ущербов на стадии реализации и использования продукции [22, 23].

Результаты проведенного анализа весомости модулей интерпретируют модуль оценки качества проектов как наиболее значимый (весомость 0,5).

Модуль включает ключевые критерии, такие как уровень бездефектности, использование BIM-среды проектирования, система внутреннего контроля документации, и другие, что подчеркивает важность высококачественной проектной документации в строительной сфере.

Кадровый потенциал имеет существенное значение (весомость 0,3). Здесь наиболее весомым критерием является аттестация персонала, что свидетельствует о важности профессиональной квалификации и сертификации сотрудников для успешного выполнения проектов.

Модуль инженерно-технической обеспеченности проектной организации получил наименьший вес 0,2, вместе с тем, критерии, связанные с технической оснащенностью и современными средствами проектирования, остаются важными для обеспечения конкурентоспособности и эффективности организации.

При апробации методики были получены конкретные значения оценок по модулям. Далее корреляционным анализом определялись наиболее связанные показатели модулей, а корреляция оценивалась при помощи критериев Спирмена (ρ_{xy}) и Кендалла (τ_{xy}).

Обнаруженные корреляции обосновывают повышенное внимание к зависимым критериям при определении риска в области проектных работ и разработке ряда корректирующих мер и управленческих решений.

В результате анализа определены наиболее согласованные критерии уровня аттестации и профессионального совершенства ($\rho_{xy} = 0,9$, $\tau_{xy} = 0,8$) по модулю кадрового потенциала; оснащенности техническими средствами и уровня современного программного обеспечения ($\rho_{xy} = 0,75$, $\tau_{xy} = 0,70$) по модулю инженерно-технической обеспеченности; бездефектности проектирования и внутреннего контроля разработки проектной документации ($\rho_{xy} = 0,82$, $\tau_{xy} = 0,76$). Степень связанности показателей отражает актуальные особенности современных подходов к проектированию в отрасли и специфику деятельности проектных организаций.

Таблица 4. Структура и весомости критериев модульной системы оценки
Table 4. The structure and weight of the criteria of the modular assessment system

Наименование критерия	Весомость
1. Модуль кадрового потенциала	0,30
1.1. Уровень аттестации персонала	0,328
1.2. Профессиональное совершенство	0,191
1.3. Объем коллективного опыта	0,121
1.4. Уровень квалификации работников	0,102
1.5. Стабильность инженерного состава	0,080
1.6. Научный потенциал организации	0,063
1.7. Степень командной слаженности	0,045
1.8. Технологии информационного моделирования (BIM)	0,035
1.9. Удовлетворенность сотрудников	0,035
2. Модуль инженерно-технической обеспеченности	0,20
2.1. Оснащенность техническими средствами	0,359
2.2. Мобильность рабочих мест	0,188
2.3. Современное программное обеспечение	0,134
2.4. Информационная доступность	0,092
2.5. Система электронного документооборота	0,090
2.6. Информационная надежность и безопасность	0,075
2.7. Уровень системы облачных решений и удаленного доступа	0,062
3. Модуль оценки качества проектов	0,50
3.1. Бездефектность проектирования	0,223
3.1. Внутренний контроль разработки проектной документации	0,127
3.1. Цифровизация BIM-среды проектирования	0,095
3.1. Операционная эффективность	0,072
3.1. Соответствие требованиям исходной документации	0,081
3.1. Регламентация документооборота и нормоконтроля	0,075
3.1. Эффективность исполнения договорных обязательств	0,069
3.1. Эстетическое и функциональное качество проектных решений	0,065
3.1. Уровень наукоемкости методов и проектной продукции	0,064
3.1. Риск-ориентированный подход	0,051
3.1. Экологическая устойчивость и энергоэффективность инженерных решений	0,043
3.1. Применение подходов жизненного цикла и адаптивности в проектных решениях	0,035

Примечание: частные коэффициенты весомости приведены в пределах модуля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная система критериев служит основанием для модульной оценки уровня качества проектных организаций и принятия корректирующих воздействий в рамках организационного процесса. Методика позволяет оценивать систему качества проектной организации путем суммирования взвешенных оценок по всем критериям и идентифицировать критические области, требующие улучшения. Систематизированный перечень критериев позволяет ввести комплексный показатель системы качества предприятия, который может служить индикатором подготовленности проектировщиков к выполнению контрактов различного уровня с учетом возможных рисков ошибок.

Результаты анализа критериев деятельности проектной организации позволяют не только определить сильные и слабые стороны

текущей системы управления предприятием, но и разработать конкретные меры по ее совершенствованию. В частности, по результатам оценки организаций-представителей было рекомендовано:

- усилить внутренний контроль проектной документации и процессов в рамках модуля оценки качества проектов;
- внедрить и поддерживать высокие стандарты профессиональной подготовки и сертификации кадров;
- повысить уровень инженерно-технической обеспеченности организации, особенно в части современных средств проектирования и информационной безопасности.

Эти меры позволят значительно снизить риски и повысить общую конкурентоспособность проектной организации на рынке. Внедрение методов оценки качества и управления рисками в проектных организациях является

необходимым условием для повышения надежности и безопасности строительных объектов.

Как показывает апробация, применение модульной методики позволяет оптимизировать и структурировать количественные и ка-

чественные критерии, что является основанием для совершенствования системы качества и планирования корректирующих мероприятий в структуре проектных компаний на основании операционного анализа процессов разработки проектной документации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Байбурун А.Х., Стоякин И.В. Аварии зданий и сооружений (уроки строительных аварий). Челябинск: Цицеро, 2019. 124 с.
2. Байбурун А.Х. Обеспечение качества и безопасности возводимых гражданских зданий. М.: Изд-во АСВ, 2015. 336 с.
3. Лапина А.П., Пономаренко А.В., Шенцова К.В., Котесова А.А. Анализ причин аварий на разных этапах жизненного цикла объекта строительства // Строительные материалы и изделия. 2019. Т. 2. № 2. С. 17–22. EDN: WRKZYE.
4. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. М.: Изд-во АСВ, 2007. 256 с.
5. Акристиний В.А., Жарков Д.А. Анализ реализуемых методов строительно-технической экспертизы проектной документации // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. № 4-2. С. 1–16. EDN: XKLZBS.
6. Самофалов М., Папинигис В. Качество конструкторской проектной документации с точки зрения технической экспертизы в Литве // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 2. С. 4–11. EDN: LRPZYQ.
7. Yijie Wang, Linzao Hou, Mian Li, Ruixiang Zheng A Novel Fire Risk Assessment Approach for Large-Scale Commercial and High-Rise Buildings Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) and Coupling Revision // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021. Vol. 18. Iss. 13. P. 1–30. <https://doi.org/10.3390/ijerph18137187>.
8. Tabejamaat S., Ahmadi H., Barmayehvar B. Boosting Large-Scale Construction Project Risk Management: Application of the Impact of Building Information Modeling, Knowledge Management, and Sustainable Practices for Optimal Productivity // Energy Science & Engineering. 2024. Vol. 12. Iss. 5. P. 2284–2296. <https://doi.org/10.1002/ese3.1746>.
9. Rachmadhani M.M., Immawan T., Mansur A., Choi W. Risk Management Framework Design Based on ISO 31000 and SCOR Model // Spektrum Industri. 2023. Vol. 21. Iss. 1. P. 41–51. <https://doi.org/10.12928/si.v21i1.93>.
10. Азгальдов Г.Г. Квалиметрия в архитектурно-строительном проектировании. М.: Стройиздат, 1989. 272 с.
11. Theilig K., Lourenzo B., Reitberger R., Lang W. Life Cycle Assessment and Multi-Criteria Decision-Making for Sustainable Building Parts: Criteria, Methods, and Application // The International Journal of Life Cycle Assessment. 2024. Vol. 29. P. 1965–1991. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02331-9>.
12. Selleck R., Hassall M., Cattani M. Determining the Reliability of Critical Controls in Construction Projects // Safety. 2022. Vol. 8. Iss. 3. P. 1–23. <https://doi.org/10.3390/safety8030064>.
13. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
14. Голубова О.С. Показатели оценки качества проектно-сметной документации в строительстве // Актуальные вопросы экономики строительства и городского хозяйства: доклады международной науч.-практ. конф. (г. Минск, 13–14 мая 2014 г.). Минск, 2014. С. 55–65.
15. Алиулова В.А., Петроченко М.В. Оценка качества проектной документации повторного использования // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 6. С. 730–740. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.6.730-740>. EDN: WGMNRP.
16. Сборщиков С.Б., Бахус Е.Е. Многофакторная параметрическая модель эффективности организационных решений по обеспечению качества строительства // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 12. С. 60–67. EDN: YTWAAH.
17. Tuhacek M., Svoboda P. Quality of Project Documentation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 471. Iss. 5. P. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/5/052012>.
18. Лихолетов В.В. Значимость теории ошибок для инженерного дела и развития отечественного инженерного образования // Инженерное образование. 2024. № 35. С. 158–180. https://doi.org/10.54835/18102883_2024_35_15. EDN: ARJPOF.
19. Mingke Zhou, Yuegang Tang, Huai Jin, Bo Zhang, Xuwen Sang A BIM-Based Identification and Classification Method of Environmental Risks in the Design of Beijing Subway // Journal of Civil Engineering and Management. 2021. Vol. 27. Iss. 7. P. 500–514. <https://doi.org/10.3846/jcem.2021.15602>.

20. Seoung-Wook Whang, Sohrab Donyavi, Roger Flanagan, Sangyong Kim Contractor-Led Design Risk Management in International Large Project: Korean Contractor's Perspective // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2023. Vol. 22. Iss. 3. P. 1387–1398. <https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2085718>.

REFERENCES

1. Baiburin A.Kh., Stoyakin I.V. *Accidents of Buildings and Structures (Lessons From Construction Accidents)*. Chelyabinsk: Tsitsero, 2019. 124 p. (In Russ.).
2. Baiburin A.Kh. *Ensuring The Quality and Safety of Erected Civil Buildings*. Moscow: ASV Publishing House, 2015. 336 p. (In Russ.).
3. Lapina A.P., Ponomarenko A.V., Shentsova K.V., Kotesova A.A. Analysis of the Causes of Accidents at Different Stages of Life Cycle of The Construction Object. *Stroitelnye materialy i izdelya*. 2019;2(2):17-22. (In Russ.). EDN: WRKZYE.
4. Perelmutter A.V. *Selected Problems of Reliability and Safety of Building Structures*. Moscow: ASV Publishing House, 2007. 256 p. (In Russ.).
5. Akristiniy V.A., Zharkov D.A. Analysis of Implemented Methods of Construction and Technical Expertise of Project Documentation. *International Journal of Applied Sciences and Technology Integral*. 2019;4-2:1-16. (In Russ.). EDN: XKLZBS.
6. Samofalov M., Papinigis V. Quality of Design Documentation from the Point of View of Technical Expertise in Lithuania. *Magazine of Civil Engineering*. 2010;2:4-11. (In Russ.). EDN: LRPZYQ.
7. Yijie Wang, Linzao Hou, Mian Li, Ruixiang Zheng A Novel Fire Risk Assessment Approach for Large-Scale Commercial and High-Rise Buildings Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) and Coupling Revision. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(13):1-30. <https://doi.org/10.3390/ijerph18137187>.
8. Tabejamaat S., Ahmadi H., Barmayehvar B. Boosting Large-Scale Construction Project Risk Management: Application of the Impact of Building Information Modeling, Knowledge Management, and Sustainable Practices for Optimal Productivity. *Energy Science & Engineering*. 2024;12(5):2284-2296. <https://doi.org/10.1002/ese3.1746>.
9. Rachmadhani M.M., Immawan T., Mansur A., Choi W. Risk Management Framework Design Based on ISO 31000 and SCOR Model. *Spektrum Industri*. 2023;21(1):41-51. <https://doi.org/10.12928/si.v21i1.93>.
10. Azgaldov G.G. *Qualimetry in Architectural and Construction Design*. Moscow: Stroyizdat, 1989. 272 p. (In Russ.).
11. Theilig K., Lourenço B., Reitberger R., Lang W. Life Cycle Assessment and Multi-Criteria Decision-Making for Sustainable Building Parts: Criteria, Methods, and Application. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2024;29:1965-1991. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02331-9>.
12. Selleck R., Hassall M., Cattani M. Determining the Reliability of Critical Controls in Construction Projects. *Safety*. 2022;8(3):1-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.3390/safety8030064>.
13. Saati T. *Decision Making. Hierarchy Process Analysis*. Moscow: Radio and Communications, 1993. 278 p. (In Russ.).
14. Golubova O.S. Indicators for Assessing the Quality of Design and Estimate Documentation in Construction. In: *Aktualnye voprosy ekonomiki stroitel'stva i gorodskogo khozyaistva: doklady mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Current Issues in Construction Economics and Urban Management: Reports of The International Scientific and Practical Conference*. 13–14 May 2014, Minsk. Minsk; 2014. p. 55–65. (In Russ.).
15. Aliulova V.A., Petrochenko M.V. The Quality Assessment of Reusable Project Documentation. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2021;16(6):730-740. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.6.730-740>. EDN: WGMNRP.
16. Sborshikov S.S., Bahus E.E. Multifactorial Parametric Model of Efficiency of Organizational Solutions for Ensuring the Construction Quality. *Industrial and Civil Engineering*. 2018;12:60-67. (In Russ.). EDN: YTWAAX.
17. Tuhacek M., Svoboda P. Quality of Project Documentation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;471(5):1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/5/052012>.
18. Likholetov V.V. Significance of Error Theories for Engineering and Development of Domestic Engineering Education. *Inzhenernoe obrazovanie*. 2024;35:158-180. (In Russ.). https://doi.org/10.54835/18102883_2024_35_15. EDN: ARJPOF.
19. Mingke Zhou, Yuegang Tang, Huai Jin, Bo Zhang, Xuewen Sang A BIM-Based Identification and Classification Method of Environmental Risks in the Design of Beijing Subway. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2021;27(7):500-514. <https://doi.org/10.3846/jcem.2021.15602>.

20. Seoung-Wook Whang, Sohrab Donyavi, Roger Flanagan, Sangyong Kim Contractor-Led Design Risk Management in International Large Project: Korean Contractor's Perspective. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2023;22(3):1387-1398. <https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2085718>.

Информация об авторах

Самарин Александр Юрьевич,
генеральный директор ООО «Априори-Строй»,
454091, Челябинск, ул. Российская, 224,
Россия,
e-mail: director@apriory-stroy.ru
<https://orcid.org/0009-0009-9313-7244>
Author ID: 1261518

Байбури Альберт Халитович,
д.т.н., профессор кафедры
строительного производства и теории
сооружений,
Южно-Уральский государственный университет
(НИУ),
советник РААСН,
454080, Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия,
✉e-mail: abayburin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7432-5671>
Author ID: 266980

Information about the authors

Alexandr Yu. Samarin,
General Director of Apriory-Stroy LLC,
224 Rossiyskaya St., Chelyabinsk, 454091,
Russia,
e-mail: director@apriory-stroy.ru
<https://orcid.org/0009-0009-9313-7244>
Author ID: 1261518

Albert Kh. Baiburin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
of Building Technologies and Structural
Engineering,
South Ural State University,
Advisor to the RAACS,
Lenin Ave. 76, Chelyabinsk, 454080,
Russia,
✉e-mail: abayburin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7432-5671>
Author ID: 266980

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

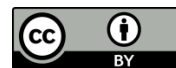
The final manuscript has been read and
approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 26.03.2025.
Одобрена после рецензирования 25.04.2025.
Принята к публикации 28.04.2025.

Information about the article

The article was submitted 26.03.2025.
Approved after reviewing 25.04.2025.
Accepted for publication 28.04.2025.



Влияние структурообразующей модифицирующей добавки Plastobit на основе синтетических восков на физико-механические показатели битума и асфальтобетона

К.Ю. Тюрюханов^{1,2}, С.А. Иванов³✉

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Пермский государственный аграрно-технологический университет

им. академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

³Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия

Аннотация. Целью данной работы является исследование изменения физико-механических характеристик органических вяжущих модифицированных добавками на основе синтетических восков, влияние их на полидисперсные органоминеральные композиции (асфальтобетоны). Такие национальные проекты, как «Безопасные качественные дороги», «Формирование комфортной городской среды» направлены на доведение до нормативных показателей транспортно-эксплуатационных характеристик, восстановление и усовершенствование дорог общего пользования и улично-дорожной сети, а также развитие крупнейших городских агломераций. Применение модифицирующей добавки позволит им продлить межремонтные сроки автомобильной дороги, снизить развитие пластических деформаций. Используя известные методы и современное научно-техническое лабораторное оснащение были проведены сравнительные испытания, которые позволили выявить закономерности изменения физических и эксплуатационных характеристик полидисперсных органоминеральных композиций. На основании проведенных исследований и полученных лабораторных результатов были сформулированы и даны рекомендации применения модифицирующей добавки, что нашло отражение в практическом применении на объектах реконструкции и ремонта автомобильных дорог при устройстве верхних слоев покрытий.

Ключевые слова: структура, синтетический воск, органоминеральная полидисперсная композиция, модифицированный битум, асфальтобетон

Для цитирования: Тюрюханов К.Ю., Иванов С.А. Влияние структурообразующей модифицирующей добавки Plastobit на основе синтетических восков на физико-механические показатели битума и асфальтобетона // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 526–538. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-526-538>. EDN: QMBVSC.

Original article

The effect of the structure-forming modifying additive Plastobit based on synthetic waxes for the physical and mechanical properties of bitumen and asphalt concrete

Kirill Yu. Tyuryukhanov^{1,2}, Sergey A. Ivanov³✉

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

²Perm State Agrarian and Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia

³Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russia.

Abstract. The purpose of this work is to study the changes in the physico-mechanical characteristics of organic binders modified with additives based on synthetic waxes, their effect on polydisperse organomineral compositions (asphalt concrete). National projects such as "Safe, high-quality roads" and "Creating a comfortable urban environment" are aimed at bringing transport and operational characteristics up to standard, restoring and improving public roads and the road network, as well as developing

the largest urban agglomerations. The use of a modifying additive will allow them to extend the inter-repair time of the highway and reduce the development of plastic deformations. Using well-known methods and modern scientific and technical laboratory equipment, comparative tests were carried out, which made it possible to identify patterns of change in the physical and operational characteristics of fine organomineral compositions. Based on the studies carried out and the laboratory results obtained, recommendations for the use of a modifying additive were formulated and given, which was reflected in practical application at the facilities of reconstruction and repair of highways during the installation of the upper layers of coatings.

Keywords: structure, synthetic wax, organomineral polydisperse composition, modified bitumen, asphalt concrete.

For citation: Tyuryukhanov K.Yu., Ivanov S.A. The effect of the structure-forming modifying additive Plastobit based on synthetic waxes for the physical and mechanical properties of bitumen and asphalt concrete. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):526-538. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-526-538>. EDN: QMBVSC.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России идет процесс перехода проектирования зерновых составов полидисперсных органоминеральных композиций (асфальтобетонов) от ГОСТ 9128-2013¹ к методологии по Маршаллу ГОСТ Р 58406.1-2020², ГОСТ Р 58406.2-2020³ и методологии «Объемно-функциональному проектированию» ГОСТ Р 58401.1-2019⁴, ГОСТ Р 58401.2⁵.

Важно отметить, что отличительная особенность между подходами проектирования зерновых составов асфальтобетонных смесей заключается в оценке качества не от физико-механических, а от качества органических вяжущих, применяемых инертных и материалов, объемных свойств асфальтобетонов.

Так как физико-механические характеристики инертных материалов и их химический состав, структура и поведение при определенных нагрузках уже в достаточной мере изучены [1–5], повлиять на конечный продукт и его характеристики представляется возможным за счет органического вяжущего (битума нефтяного дорожного) и разновидностей его модификации.

На протяжении многих десятилетий органические вяжущие (ОВ) использовались в качестве защитных покрытий, гидроизоляций крыш и как связующий (склеивающий) элемент в органоминеральных композициях (ас-

фальтобетонах). Существует и ряд других применений, свидетельство которых отражено в справочнике по битумам одной из крупнейших организаций нефтегазовой отрасли⁶.

Исторически, органические вещества получали из природных битумных залежей, которые располагались на поверхности земли [6, 7]. С развитием нефтегазовой промышленности ОВ стали получать в результате переработки сырой нефти, а точнее остатков вакуумной дистилляции, которые подвергаются процессам окисления воздухом и дальнейшего компаундирования.

Состав ОВ может быть одинаковым. В него входят смесь алифатических, ароматических, нафтеновых углеводородов, малое количество органических кислот, оснований и гетероциклических компонентов, но пропорции каждого вещества всегда отличаются. Это приводит к разным физико-механическим характеристикам готового продукта. Трудности возникают в определении точного химического состава из-за его постоянной изменчивости, от месторождения добытой исходной сырой нефти, транспортировки, способа переработки и т. д. Структуру и химический состав ОВ можно представить в виде трех основных компонентов:

– асфальтены – наиболее высокомолекулярная фракция ОВ;

¹ГОСТ 9128-2013. Смесей асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия.

²ГОСТ Р 58406.1-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей щебеночно-мастичные и асфальтобетон. Технические условия.

³ГОСТ Р 58406.2-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия.

⁴ГОСТ Р 58401.1-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. Технические требования.

⁵ГОСТ Р 58401.2-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Система объемно-функционального проектирования. Технические условия.

⁶Read J., Whiteoak D. The Shell Bitumen Handbook. London: Thomas Telford Publishing, 2003. 472 p.

– мальтены, которые представлены смолами – с меньшей молекулярной массой, отвечающие за растяжимость;

– масла – ароматическая, самая легкая фракция ОВ, отвечающая за вязкость и скорость старения ОВ, насыщенными углеводородами (рис. 1).

На сегодняшний день, в условиях ограниченных рыночных отношений, многие производители модифицирующих добавок для органических вяжущих (битумов) перестали поставлять свою продукцию в Россию. Однако многими публикациями подтверждена эффективность использования модификаторов разного происхождения и влияния на разные критерии оценки как битума, так и полидисперсных органоминеральных композиций (асфальтобетонов) [8–15].

Однако добавление модифицирующих добавок (МД) может улучшить одни характеристики битума и ухудшить другие. При анализе результатов потребитель обращает внимание на базовые основные критерии оценки ОВ, которые установлены государственными стандартами, такие как пенетрация, дуктильность, температура размягчения, температура

вспышки, динамическая вязкость, растяжимость, температура хрупкости, реологическая устойчивость. Но никто не задается вопросом о равномерности распределения МД, сохранности структуры и свойств модифицированного ОВ в процессе транспортировки или хранения, протекания процессов старения и долговечности органического вяжущего в асфальтобетонах. Проведя лабораторные исследования и опираясь на уже полученные знания, можно конкретизировать и описать процесс структурообразования в модифицированном битуме при вводе МД.

Цель исследования – установить закономерности изменения физико-механических характеристик ОВ при вводе структурно модифицирующей добавки на основе синтетического воска, имеющего линейную структуру молекулярной цепи с определенной степенью кристалличности. Определить степень влияния модифицированного органического вяжущего на физико-механические и эксплуатационные характеристики асфальтобетона. А также роль модифицирующей добавки при комплексной модификации органического вяжущего.

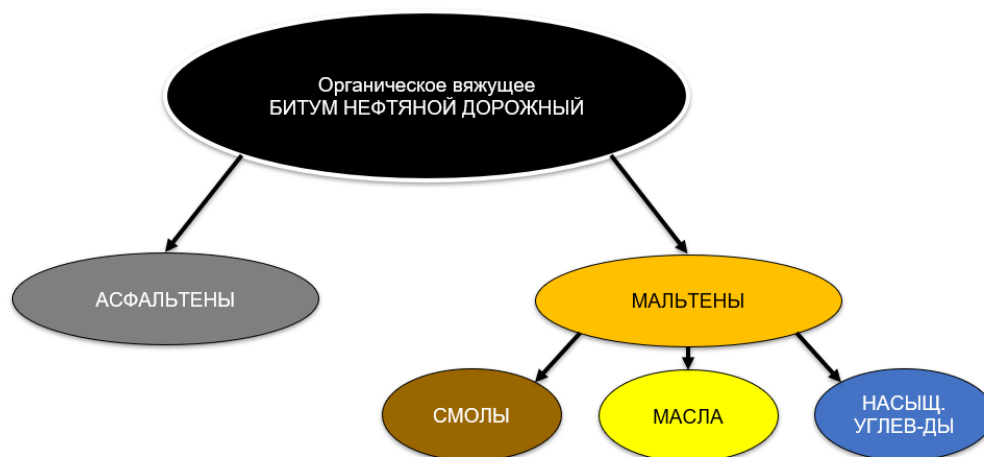


Рис. 1. Состав органического вяжущего битума нефтяного дорожного
Fig. 1. Composition of oil road bitumen

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Составы горячих полидисперсных органоминеральных композиций в мировой практике представлены в виде рационально подобранных зерновых составов минеральных материалов, таких как щебень, песок из отсева дробления горных пород, минерального порошка, природного песка, стабилизирующих добавок и ОВ – битума нефтяного дорожного различных марок (возможно модифицированного), перемешанных в нагретом состоянии. Температурные режимы и время перемешивания

всех составных частей необходимо соблюдать для равномерного распределения в «тонких пленках» и удержания ОВ на поверхности минеральных компонентов.

Все асфальтобетоны регламентированы следующими государственными стандартами: утративший силу ГОСТ 9128-2013, действующие ГОСТ Р 58406.1-2020, ГОСТ Р 58406.2-2020, ГОСТ Р 58401.1-2019, ГОСТ Р 58401.2-2019, требования которых должны быть соблюдены в части используемых вяжущих и инертных материалов, а также соответство-

вать критериям оценки определенным маркам асфальтобетонных смесей и асфальтобетон по физико-механическим и эксплуатационным характеристикам⁷.

При эксплуатации автомобильной дороги покрытие испытывает негативное влияние от транспортных средств, погодно-климатических условий, осадков, реагентов, солнечной радиации и т. д., что приводит к преждевременному разрушению и износу.

При изучении структуры полидисперсных органоминеральных композиций стало известно, что крупный заполнитель в системе «органическое вяжущее – крупный заполнитель – мелкий заполнитель» выступает в роли каркаса, способствующего сопротивляться механическим воздействиям от подвижного состава [16–20].

Мелкий заполнитель совместно с ОВ является асфальтовяжущим веществом, которое отвечает за равномерное распределение во всем объеме асфальтобетонной смеси ОВ, переводя его из объемного состояния в «тонкие пленки» [21].

Немаловажным остается вопрос адгезии ОВ к минеральным материалам, в связи с однополярностью или разнополярностью инертных материалов сцепления качество асфальтобетон будет разное.

Таким образом, в силу разнообразных дорожно-климатических зон регионов и различной степени доступности сырьевых компонентов для изготовления качественных асфальтобетонных смесей, самый доступный способ регулирования физико-механических и эксплуатационных характеристик является модификация ОВ.

Полимерная модификация битумов

Полимерно-битумные вяжущие применяются достаточно обширно как на территориях России, так и за рубежом. Возможное применение полимеров в составе ОВ изучено достаточно подробно, однако, практическое применение нашли полимерные модификаторы некоторых типов, которые представлены в таб. 1.

Использование полимерных модификаторов позволяет регулировать такие характеристики битума, как эластичность, растяжимость, повышение энергии когезии, адгезии, снижение температуры хрупкости и повышение температуры размягчения, что влияет на характеристики асфальтобетон – трещиностойкость и сдвигоустойчивость, снижение

пластических деформаций.

Модификация поверхностно-активными веществами (ПАВ)

Для улучшения адгезионных свойств ОВ, а также смачиваемости в асфальтобетонной смеси, к частицам минеральных материалов применяют анионные и катионные ПАВ.

Молекулы ПАВ состоят из двух частей: полярной гидрофильной функциональной группы, которая является источником сильных межмолекулярных взаимодействий, и неполярной гидрофобной группы – углеводородного радикала, содержащего 10–18 атомов углерода.

По химическому строению ПАВ делятся на ионогенные и неионогенные. Ионогенные ПАВ в зависимости от вида образующихся при диссоциации ионов делятся на анионактивные, катионактивные и амфолитные (амфотерные):

1. В зависимости от происхождения каменных материалов и его химического состава в России преимущественно используют анионактивные ПАВ, такие как окисленный петролатум, госсиполовая кислота, синтетические жирные кислоты (СЖК), кубовые остатки СЖК, железистые соли высших карбоновых кислот, смолы каменноугольные, таловый пек и др. Обеспечивают улучшение адгезии каменных материалов карбонатных (доломит, известняк) и основных (диабаз, базальт) горных пород.

2. К представителям катионных ПАВ относятся амины, полиамины, четвертичные аммониевые основания и их соли, имидазомины, октадециламин. Они улучшают сцепление с кислыми горными породами.

3. Неионогенные ПАВ, такие как кодит, камид, эфиры полиоксиэтиленовых алкифенолов ОП-7 и ОП-10, улучшают адгезию к инертным каменным материалам карбонатных и кислых пород.

4. Деструктурирующие ПАВ – адсорбируясь на поверхности структурообразующих компонентов битума (смол и асфальтенов), происходит изменение прочности и характера взаимодействия между компонентами в битуме. Такой эффект достигается при введении высокомолекулярных аминов и диаминов. Катионные ПАВ типа высших алифатических аминов могут замедлить процесс старения битумов.

5. Структурирующие ПАВ – взаимодействие ОВ с ПАВ образует пространственную

⁷Акимова Т.Н. Асфальтобетон: учебное пособие. М.: Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)), 2020. 161 с.

дисперсную структуру, которая сопряжена с асфальтовыми комплексами битума. При оптимальной концентрации ПАВ класса же-

лезных или кальциевых солей высокомолекулярных карбоновых кислот проявляется структурообразующий эффект.

Таблица 1. Разновидность полимерных модификаторов битума [7,21]

Table 1. Variety of polymeric bitumen modifiers [7,21]

Категория	Представители	Преимущества	Недостатки
Пластомеры	Полиэтилен (PE) Полипропилен (PP)	Обладает хорошими высокотемпературными свойствами, снижает вероятность образования пластических деформаций Относительно низкая стоимость	Снижение или ограниченное улучшение эластичности Проблемы фазового разделения
	Этилен-винилацетат (EVA) Этилен-бутилакрилат (EBA)	Относительно хорошая стабильность при хранении Высокая устойчивость к колееобразованию	Ограниченное улучшение эластичного восстановления Ограниченное улучшение низкотемпературных свойств
Термопластичные эластомеры	Стирол-бутадиен-стирол (SBS) Стирол-изопрен-стирол (SIS)	Повышенная жесткость Пониженная чувствительность к температурным режимам Способность повышать эластичность	Сложность совмещения с некоторыми битумами Низкая устойчивость к нагреванию, окислению и ультрафиолету Высокая стоимость полимера и производства полимерно-битумных вяжущих
	Стирол-этилен / бутилен-стирол (SEBS)	Высокая устойчивость к нагреванию, окислению и ультрафиолету	Нестабильность в хранении Низкая эластичность Высокая стоимость
Реактопласты	Эпоксидные, карбамидные, полиэфирные и др. синтетические смолы	Деформативная и коррозионная устойчивость	Недостаточная пластичность в связи с взаимодействием с отвердителем, становится чрезмерно прочным

Технологические модифицирующие добавки

При производстве, транспортировке, укладке асфальтобетонных смесей могут возникнуть некоторые трудности, такие как температурные режимы разогрева, изготовления и укладки, дальность возки смесей от места производства до места укладки, ресурсообеспеченность качественными исходными материалами, соответствующих нормативным документам и требованиям проекта, материально техническая база и технологичность производственных процессов и т. д. Для улучшения технологических свойств и эффективности производимых асфальтобетонных смесей

возможно применить следующие модификаторы – воски – инновационный материал, обладающий уникальными свойствами при взаимодействии с ОБ.

Классификация представлена на рис. 2. Воски и их качественные характеристики:

- органический материал с низкой температурой плавления, который затвердевает при 40 °С;
- химически воски могут быть углеводородами, спиртами, амидами или сложными эфирами жирных кислот;
- воскообразные полимеры нерастворимы в воде, но могут растворяться в органических растворителях.

Растворимость зависит от химического состава полимера, выбора растворителя и может потребовать повышенной температуры (~50–150 °C);

– воскообразные полимеры имеют высокую температуру плавления и достигают минимальной вязкости расплава на несколько градусов выше температуры расплава.

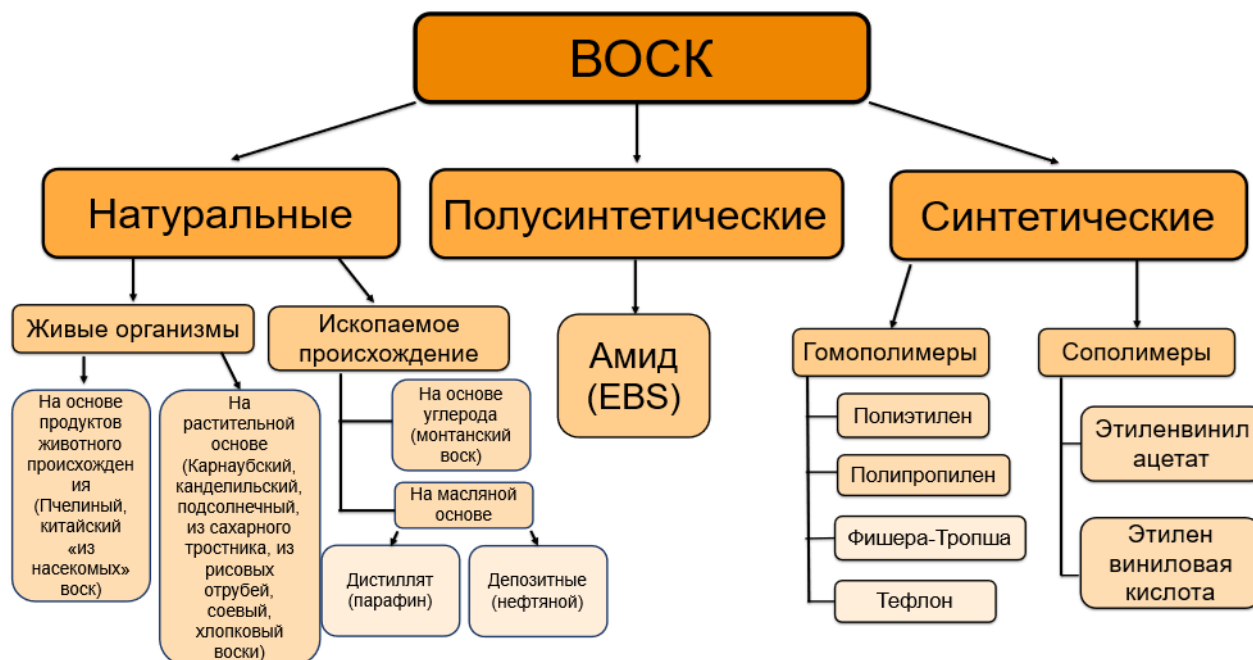


Рис. 2. Классификация восков
Fig. 2. Classification of waxes

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Обширные исследования в области модифицирования ОВ продолжают выявлять новые возможности для оптимизации состава и технологии производства асфальтобетонов с учетом региональных особенностей. Это открывает перспективы для повышения эффективности и надежности дорожного строительства, делая его более адаптивным к изменяющимся условиям эксплуатации [23–25].

Руководствуясь нормативными документами, для применения ОВ в составе асфальтобетонов, необходимо учитывать дорожно-климатическую зону и интенсивность движения автотранспорта по покрытию. Требования, предъявляемые к ОВ, представлены в ГОСТ 33133-2014⁸, ГОСТ 52056-2003⁹, ГОСТ Р 58400.1-2019¹⁰, ГОСТ Р 58400.2-2019¹¹, разнообразие показателей и характеристик ОВ позволяют оценить любой битум и соотнести его к конкретной марке. Современный вектор,

направленный на использование битумов высоких марок, не позволяет применять исходные битумы, произведенные нефтепереработчиками, т. к. доведение ОВ до требуемых физико-механических характеристик возможно только при модификации (улучшении).

Графически охарактеризовать качество битумов возможно следующим образом, как представлено в табл. 2.

Применение модифицирующих добавок позволяет значительно улучшить адгезию между битумом и крупными заполнителями, что уменьшает вероятность отделения асфальтобетона. Это особенно важно в условиях нагрузки, когда движение тяжелых транспортных средств может приводить к образованию колеи и других дефектов. Устойчивость к воздействию степи и термическому старению, которую обеспечивают добавки, способствует сохранению целостности дорожного покрытия на протяжении всего его

⁸ГОСТ 33133-2014. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования.

⁹ГОСТ 52056-2003. Вяжущие полимерно-битумные дорожные на основе блоксополимеров типа стирол-бутадиен-стирол. Технические условия.

¹⁰ГОСТ Р 58400.1-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические требования с учетом температурного диапазона эксплуатации.

¹¹ГОСТ Р 58400.2-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические условия с учетом уровней эксплуатационных транспортных нагрузок.

эксплуатационного срока.

Одним из способов увеличения физико-механических и реологических характеристик асфальтобетонов является модификация битумов композициями на основе модифицированных полиолефинов. Такие продукты уже известны российскому рынку под брендами Honeywell Titan, Sasobit [26–29]. Поставки модифицирующих добавок, представленных производителями затруднительны. Для исследований был выбран аналог рассматриваемых модификаторов Plastobit, отечественного производства, который в полной мере обеспечивает улучшение физико-механических характеристик битума.

Руководствуясь действующими ГОСТ, для определения изменения физико-механических характеристик битума, были выполнены базовые испытания образцов исходного битума и модифицированного битума с разным содержанием модифицирующей добавки в количестве 1, 2 и 3 %.

При смешивании битума с модифицирующей добавкой (характеристики которых представлены в таб. 3) рабочая температура составляла $145 \pm 2^\circ\text{C}$, гомогенизация протекала при непрерывном перемешивании образца в течении 1,5 ч. Результаты базовых физико-механических характеристик представлены в таб. 4.

Таблица 2. Классификация производимых битумов, переход от ГОСТ 33133 к ГОСТ Р 58400.1

Table 2. Classification of produced bitumen, transition from GOST 33133 to GOST R 58400.1

Марки битума по PG (Performance Grade) ГОСТ Р 58400.1–2019										
-	+	34	40	46	52	58	64	70	76	82
-10		34-10	40-10	46-10	52-10	58-10	64-10	70-10	76-10	82-10
-16		34-16	40-16	46-16	52-16	58-16	64-16	70-16	76-16	82-16
-22		34-22	40-22	46-22	52-22	58-22	64-22	70-22	76-22	82-22
-28		34-28	40-28	46-28	52-28	58-28	64-28	70-28	76-28	82-28
-34		34-34	40-34	46-34	52-34	58-34	64-34	70-34	76-34	82-34
-40		34-40	40-40	46-40	52-40	58-40	64-40	70-40	76-40	82-40
-46		34-46	40-46	46-46	52-46	58-46	64-46	70-46	76-46	82-46

Примечание:

	Исходный битум
	Качественный битум
	Требуемый модификации

Таблица 3. Характеристики используемых модифицирующих добавок Plastobit

Table 3. Characteristics of Plastobit modifying additives used

№ п/п	Наименование характеристики	Plastobit 430F
1	Вид	Сферические гранулы
2	Размер	до 2 мм
3	Цвет	белый
4	Температура каплепадения, °С, ГОСТ 6793-74	120–127
5	Динамическая вязкость при 140 °С, мПа*с, ASTM D3236	100–300
6	Пенетрация, 1/10мм, ASTM D1321	не более 3
7	Удельная плотность при 20 °С, ГОСТ 15139-69	0,95–0,96

Исходя из полученных базовых физико-механических результатов испытаний исходного и модифицированного битума, прослеживается зависимость от процента ввода в битум синтетического воска Plastobit на вязкость, температуру размягчения и динамическую вязкость.

Стоит отметить, что низкотемпературный показатель качества ОВ снижается максимум на 5°C , но остается в границах требований ГОСТ. Зависимость вязкости и температуры размягчения от ввода модифицирующей добавки в битум представлена на рис. 3. Исходя из полученных результатов лабораторных ис-

пытаний видно, что при пенетрации исходного битума ближе к нижней границе марки, в данном случае это значение 70/82, при добавлении 1,3 % Plastobit, переходит в более вязкую марку 50/70. В случае, если пенетрация будет по верхней границе марки, то можно предположить, что при аналогичной дозировке добавки битум будет оставаться в марке. Учитывая данный факт, можно выдвинуть гипотезу, которая требует подтверждения, что при незначительном вводе добавки, модифицированный битум будет лучше сопротивляться пластическим деформациям непосредственно в асфальтобетонном покрытии.

Таблица 4. Физико-механические характеристики исходного и модифицированного битума
Table 4. Physical and mechanical characteristics of initial and modified bitumen

Наименование показателя, ед. изм.	ГОСТ	Требования ГОСТ	Битум марки 70/100	Битум марки 70/100 + 1,3 % Plastobit	Битум марки 70/100 + 3,0 % Plastobit
Глубина проникания иглы при 25 °С, 0,1 мм	33136	от 71 до 100	82	66 (на 20 %↑ вязкость)	57 (на 31 %↑ вязкость)
Температура размягчения по КиШ, °С	33142	не ниже 47	47,1	61,9 (на 30%↑ темп. разм.)	75 (на 60 %↑ темп. разм.)
Температура хрупкости, °С	33143	не выше -18	-25	-21 (на 16 %↑ темп. хруп.)	-20 (на 20 %↑ темп. хруп.)
Изменение массы образца после старения	33140	не более 0,6	0,55	0,1 (на 80 %↓)	0,27 (на 50 %↓)
Динамическая вязкость при температуре 60 °С и скорости сдвига 1,5 с после старения, ПА*с, не менее	33140 33142	не менее 220	555,38	1729,6 (в 3 раза ↑ дин. вяз.)	—

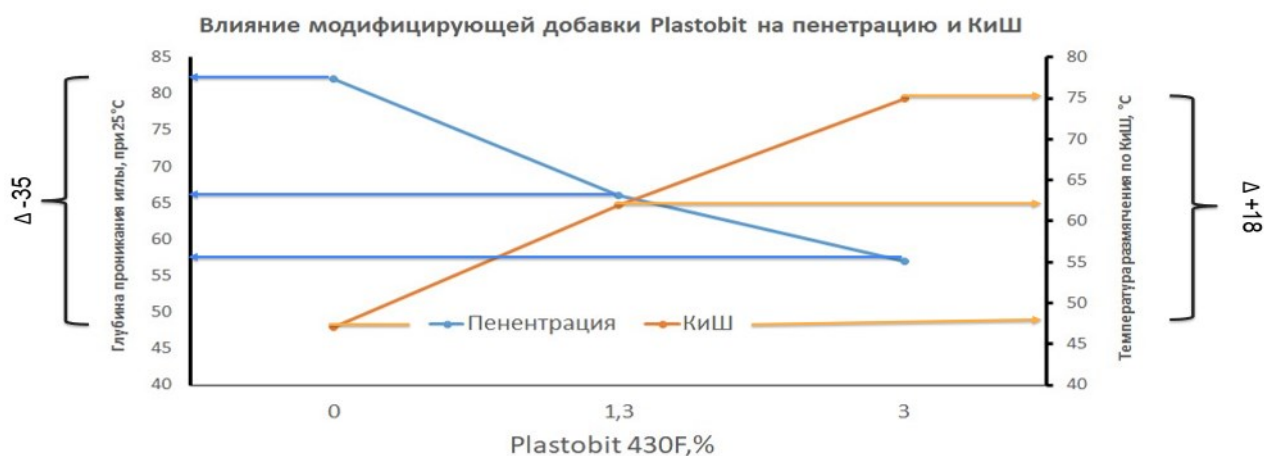


Рис. 3. Влияние модифицирующей добавки на вязкость и температуру размягчения битума по КиШ

Fig. 3. Influence of modifying additive on viscosity and softening point of bitumen by R&B

Далее, для подтверждения выдвинутой гипотезы, были выполнены лабораторные сравнительные испытания асфальтобетонных образцов на соответствие требованиям ГОСТ Р 58406.2-2020, изготовленных из асфальтобетонной смеси типа А11В_н, установленного зернового состава заводом производителем. Результаты физических и эксплуатационных показателей представлены в табл. 5. Таким образом, при лабораторных испытаниях асфальтобетонных образцов

можно проследить снижение пластических деформаций по показателю средней глубины колеи, что подтверждает выдвинутую ранее гипотезу о влиянии модифицирующей добавки в составе битума на эксплуатационные характеристики асфальтобетона. Стоит отметить, что сравнительные испытания проводились на одном зерновом составе асфальтобетонной смеси (таб. 6), с одинаковым содержанием битума, но с разным содержанием модифицирующей добавки Plastobit.

Таблица 5. Сравнительные физические и эксплуатационные характеристики асфальтобетонных образцов с модифицирующей добавкой Plastobit
Table 5. Comparative physical and performance characteristics of asphalt concrete specimens with Plastobit modifying additive

Наименование показателя, ед. изм.	Требования ГОСТ Р 58406.2-2020	Фактические значения на битуме марки 70/100	Фактические значения на битуме марки 70/100 + 1,3 % Plastobit	Фактические значения на битуме марки 70/100 + 3,0 % Plastobit
Объемная плотность, г/см ³	–	2,631	2,650	2,660
Коэффициент водостойкости	0,90	0,88	0,90	0,93
Средняя глубина колеи, мм	не более 4,5	3,55	1,4 (на 60 % ↓)	1,1 (на 69 % ↓)
Содержание воздушных пустот	от 2,0 до 4,5	3,17	2,50 (на 22 % ↓)	2,13 (на 33 % ↓)
Максимальная плотность, г/см ³	–	2,718	2,718	2,718

Таблица 6. Зерновой состав минеральной части асфальтобетонной смеси А11В_n
Table 6. Grain composition of the mineral part of asphalt concrete mixture A11V_n

№ п/п	Наименование	Размер зерен, мм							
		16,0	11,2	8,0	4,0	2,0	0,125	0,063	менее 0,063
1	Частные остатки, г.	0,00	29,91	262,71	480,18	233,42	354,88	36,19	36,34
2	Частные остатки, %	0,00	1,95	17,13	31,31	15,22	23,14	2,36	8,89
3	Полные остатки, %	0,00	1,95	19,08	50,39	65,61	88,75	91,00	100,00
4	Полные проходы, %	100,00	98,05	80,92	49,61	34,39	11,25	8,89	–
5	Полные проходы рецепту	–	–	76,1–86,1	42,4–52,4	27,6–37,6	6,5–12,5	4,8–10,8	–
6	Содержание битума	5,45 сверх 100 % 5,15 в 100 % смеси							

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования по влиянию модифицирующей добавки Plastobit в битум можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально установлено, что при введении модифицирующей добавки происходит изменение физико-механических характеристик таких как, уменьшается глубина проникновения иглы, увеличивается температура размягчения по КиШ, динамическая вязкость, старение битума происходит медленнее.

2. При использовании модифицированного битума в асфальтобетонной смеси уменьшаются пластические деформации, которые характеризуются показателем средней глубины колееобразования.

3. В процессе перемешивания и уплотнения образцов из асфальтобетонной смеси

наблюдается более равномерное смачивание и распределение модифицированного битума на поверхности каменного минерального материала.

Таким образом, применение модифицированного битума с добавкой Plastobit рекомендовано в районах с жарким и умеренным климатом, где вероятность экстремально низких температур стремится к нулю. Важно отметить, что использование модифицирующих добавок также положительно сказывается на экологических характеристиках асфальтобетонов.

Улучшая долговечность дорожного покрытия, они снижают необходимость в частом ремонте и реконструкции, что, в свою очередь, уменьшает выбросы CO₂ и затраты на сырьевые ресурсы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самаров А.С. Влияние заполнителей на свойства и структурообразование асфальтобетонов // Вестник науки. 2024. Т. 4. № 8. С. 225–231. EDN: WOWCZU.
2. Копылов В.Е., Буренина О.Н. Минеральное сырье Республики Саха (Якутия) для производства асфальтобетонов // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 1. С. 1–9. <https://doi.org/10.15862/47TVN116>. EDN: VVNSND.
3. Афанасенко А.А. Оптимизация зернового состава асфальтобетонных смесей с целью обеспечения максимальной плотности // Наука и техника. 2024. Т. 23. № 3. С. 235–241. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241>. EDN: WYWGPN.
4. Тошов Д.З., Шарифов А., Шарипов Ф.Б. Активные минеральные добавки для модифицирования битума и асфальтобетона // Политехнический вестник. Серия: инженерные исследования. 2021. № 4. С. 107–113. EDN: LYGKDK.
5. Ковалев Д.И., Шайхутдинова Р.А. Проблемы колееобразования на автомобильных дорогах // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9. № 1. С. 1–16. <https://doi.org/10.15862/10SATS122>. EDN: TETAZJ.
6. Polacco G., Stastna J., Biondi D., Zanzotto L. Relation Between Polymer Architecture and Nonlinear Viscoelastic Behavior of Modified Asphalts // Current Opinion in Colloid & Interface Science. 2006. Vol. 11. Iss. 4. P. 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2006.09.001>.
7. Jiqing Zhu, Birgisson B., Kringos N. Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges // European Polymer Journal. 2014. Vol. 54. P. 18–38. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>.
8. Шеховцова С.Ю., Королев Е.В. Восстанавливающие и защитные материалы для обработки поверхности дорог // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2021. № 4. С. 62–71. https://doi.org/10.53980/24131997_2021_4_62. EDN: CKEXKU.
9. Шестаков Н.И., Хохлова Н.В., Васильев Ю.Э., Менькина У.О. Изменение состава и свойств дорожного битума при его термостабилизации // Вестник Московского государственного строительного университета. 2023. Т. 18. № 12. С. 1926–1936. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.12.1926-1936>. EDN: RFJXES.
10. Xin Jin, Naisheng Guo, Zhanping You, Lin Wang, Yankai Wen, Yiqiu Tan Rheological Properties and Micro-Characteristics of Polyurethane Composite Modified Asphalt // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 234. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117395>.
11. Yuetan Ma, Hongyu Zhou, Xi Jiang, Polaczyk P., Rui Xiao, Miaomiao Zhang et al. The Utilization of Waste Plastics in Asphalt Pavements: A Review // Cleaner Materials. 2021. Vol. 2. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100031>.
12. Song Xu, Shaoxu Cai, Runyu Huang, Kangyi Xu, Zirong Ma, Lei Fang et al. Investigation of Aging Behaviors of Asphalt Under the Coupling Conditions of Salt And Water // Fuel. 2024. Vol. 365. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131191>.
13. Zhe Lu, Zheng Feng, Zhen-gang Feng, Sicheng Liu, Si Cheng Liu, Crispino M. et al. Mechanism and Performance Evaluation of Secondary Regeneration of Asphalt // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 416. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135211>.
14. Балабанов В.Б., Молоков В.С. Оценка влияния различных стабилизирующих добавок, в том числе гидролизного лигнина, на основные физические и эксплуатационные показатели щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 202–212. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-202-212>. EDN: NRZBHY.
15. Zhevanov V.V., Bratchun V.I., Postoenko V.A. Increasing The Fatigue Life of Asphalt Concrete by Complex Modification of Their Structure // Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. 2023. Vol. 4. P. 70–75. EDN: DVNNDU.
16. Котлярский Э.В. Научно-методические основы оценки структурно-механических свойств композиционных материалов на основе органических вяжущих // Строительные материалы. 2011. № 10. С. 36–41. EDN: OOKVMN.
17. Губа В.В., Губа К.Р., Третьякова Л.Н. Изменение состава, структуры и текстуры асфальтобетона в процессе эксплуатации // Вести Автомобильно-дорожного института. 2023. № 3. С. 17–24. EDN: QLGXDH.
18. Левкович Т.И., Воробьев Е.Г., Терешина Ю.В. Особенности структуры и свойств модифицированных асфальтобетонов и битумов // Научный альманах. 2024. № 2-3. С. 30–35. EDN: IHQPCN.
19. Высоцкая М.А., Лесовик В.С., Катрич Я.М., Егоров Д.Ю. Влияние минеральных порошков на устойчивость битумного вяжущего к термическим деформациям // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2024. Т. 21. № 5. С. 770–785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>. EDN: RSHWAO.

20. Прокопец В.С., Белых И.В. Минеральный порошок и его влияние на формирование структуры асфальтобетона // Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России. Материалы 65-й науч.-техн. конф. (г. Омск, 28–30 ноября 2011 г.). Омск, 2011. С. 166–171. EDN: WKSJYL.
21. Ахмадова Х.Х., Хадисова Ж.Т., Махмудова Л.Ш. Абдулмежидова З.А., Мусаева М.А. Основные способы модификации битумов различными добавками // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2019. Т. 15. № 3. С. 42–56. <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2019.17.3.006>. EDN: PKSIKW.
22. Акулова М.В., Касаткина Н.К., Никитина И.В., Семенов А.Д. Модифицирующие добавки к битуму для асфальтобетонных смесей // Инженерные и социальные системы. Сб. науч. трудов института архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2021. С. 3–10. EDN: WOVFOU.
23. Горелышева Л.А. Теоретические аспекты систематизации добавок, улучшающих свойства битумного вяжущего и асфальтобетонной смеси // Дороги и мосты. 2019. № 2. С. 203–236. EDN: HSZYRN.
24. Опарина Д.В., Широкова Е.С. Оценка адгезионных свойств битума, модифицированного добавкой «HONEYWELL TITAN 7686» // Общество. Наука. Инновации. (НПК-2023). Сб. материалов XXIII Всеросс. (национал.) науч.-практ. конф., приуроченной к 60-летию ВятГУ (г. Киров, 12–22 июня 2023 г.). Киров, 2023. С. 199–202. EDN: LLATSB.
25. Балабанов В.Б., Джураев А.Р. Опыт применения полимера HONEYWELL TITAN 7686 для получения вяжущего с высокими физико-механическими показателями // Молодежный вестник ИрГТУ. 2022. Т. 12. № 2. С. 300–305. EDN: ZWDAGY.
26. Соломенцев А.Б., Мосюра Л.С., Анахин Н.Ю., Грошев Н.Г. Исследование физико-механических свойств асфальтовяжущего с адгезионными добавками // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 1-4. С. 124–127. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.55.159>. EDN: XRHHFZ.
27. Рябинина К.М., Проваторова Г.В. Исследование свойств асфальтобетона на модифицированном полимерами битуме // Строительные материалы и изделия. 2022. Т. 5. № 4. С. 19–29. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-4-19-29>. EDN: MEGOFM.
28. Соломенцев А.Б., Мосюра Л.С. Свойства дорожного битума с адгезионными добавками различного состава // Наукоемкие технологии и инновации. Сборник докладов Международной научно-практической конференции. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. С. 221–226. EDN: YNKXBN.
29. Полоник В.Д., Наумова Ю.А., Люсова Л.Р., Ковалева А.Н. Модификация свойств битумных вяжущих полиэтиленовыми восками // Клеи. Герметики. Технологии. 2024. № 3. С. 10–16. <https://doi.org/10.31044/1813-7008-2024-0-3-10-16>. EDN: AJZYQD.

REFERENCES

1. Samarov A.S. Influence of Aggregates On Properties and Structure Formation of Asphalt Concrete. *Vestnik nauki*. 2024;4(8):225-231. (In Russ.). EDN: WOWCZU.
2. Kopylov V.E., Burenina O.N. Minerals of The Republic of Sakha (Yakutia) For Production of Asphalt-Concretes. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"*. 2016;8(1):1-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.15862/47TVN116>. EDN: VVNSND.
3. Afanasenka A.A. Optimization of Aggregate Composition of Asphalt Concrete Mixtures to Ensure Maximum Density. *Science and Technique*. 2024;23(3):235-241. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-3-235-241>. EDN: WYWGPN.
4. Toshov J.Z., Sharifov A., Sharipov F.B. Active Mineral Additives for Modifying Bitumen and Asphalt Concrete. *Polytechnic Bulletin. Series "Engineering Research"*. 2021;4:107-113. (In Russ.). EDN: LYGKDK.
5. Kovalev D.I., Shaykhutdinova R.A. Wheel Track Rutting Problems on Highways. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022;9(1):1-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.15862/10SATS122>. EDN: TETAZJ.
6. Polacco G., Stastna J., Biondi D., Zanzotto L. Relation Between Polymer Architecture and Nonlinear Viscoelastic Behavior of Modified Asphalts // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2006. Vol. 11. Iss. 4. P. 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2006.09.001>.
7. Jiqing Zhu, Birgisson B., Kringos N. Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges // *European Polymer Journal*. 2014. Vol. 54. P. 18–38. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>.
8. Shekhovtsova S.Yu., Korolev E.V. Restorative and Protective Materials for Road Surface Treatment. *Bulletin East Siberia State University of Technology and Management*. 2021;4:62-71. (In Russ.). https://doi.org/10.53980/24131997_2021_4_62. EDN: CKEXKU.
9. Shestakov N.I., Khokhlova N.V., Vasiliev Yu.E., Menkina U.O. Changes in The Structure and Properties of Road Bitumen During Its Thermal Stabilization. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2023;18(12):1926-1936. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.12.1926-1936>. EDN: RFJXES.

10. Xin Jin, Naisheng Guo, Zhanping You, Lin Wang, Yankai Wen, Yiqiu Tan Rheological Properties and Micro-Characteristics of Polyurethane Composite Modified Asphalt. *Construction and Building Materials*. 2020;234:1-16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117395>.
11. Yuetan Ma, Hongyu Zhou, Xi Jiang, Polaczyk P., Rui Xiao, Miaomiao Zhang et al. The Utilization of Waste Plastics in Asphalt Pavements: A Review. *Cleaner Materials*. 2021;2:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100031>.
12. Song Xu, Shaoxu Cai, Runyu Huang, Kangyi Xu, Zirong Ma, Lei Fang et al. Investigation of Aging Behaviors of Asphalt Under the Coupling Conditions of Salt And Water. *Fuel*. 2024;365:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131191>.
13. Zhe Lu, Zheng Feng, Zhen-gang Feng, Sicheng Liu, Si Cheng Liu, Crispino M. et al. Mechanism and Performance Evaluation of Secondary Regeneration of Asphalt. *Construction and Building Materials*. 2024;416:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135211>.
14. Balabanov V.B., Molokov V.S. Evaluation of The Impact of Various Stabilizing Additives, Including Hydrolysis Lignin, On The Basic Physical and Operational Parameters of Rubble-Mastic Asphalt Concrete Mixtures. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):202-212. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-202-212>. EDN: NRZBHY.
15. Zhevanov V.V., Bratchun V.I., Postoenko V.A. Increasing The Fatigue Life of Asphalt Concrete by Complex Modification of Their Structure. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2023;4:70-75. (In Russ.). EDN: DVNNDU.
16. Kotlyarskii E.V. Scientific and Methodological Principles for Assessing the Structural and Mechanical Properties of Composite Materials Based On Organic Binders. *Construction Materials*. 2011;10:36-41. (In Russ.). EDN: OOKVMN.
17. Guba V.V., Guba K.R., Tretiakova L.N. Changes in The Asphalt Concrete Composition, Structure and Texture During Operation. *Bulletin of the Automobile and Highway Institute*. 2023;3:17-24. (In Russ.). EDN: QLGXDH.
18. Levkovich T.I., Worobjev E.G., Teresina Yu.W. Features of The Structure and Properties of Modified Asphalt Concrete and Bitumen. *Science Almanac*. 2024;2-3:30-35. (In Russ.). EDN: IHQPCN.
19. Vysotskaya M.A., Lesovik V.S., Katrich Ya.M., Egorov D.Yu. The Influence of Mineral Powders On the Resistance of Bitumen Binder to Thermal Deformations. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024;21(5):770-785. (In Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>. EDN: RSHWAO.
20. Prokopets V.S., Belykh I.V. Mineral Powder and Its Influence On the Formation of Asphalt Concrete Structure. In: *Orientirovannye fundamental'nye i prikladnye issledovaniya – osnova modernizatsii i innovatsionnogo razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo i dorozhno-transportnogo kompleksov Ros-sii. Materialy 65-i nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Focused Fundamental and Applied Research – The Basis for Modernization and Innovative Development of the Architectural, Construction and Road Transport Complexes of Russia. Proceedings of The 65th Scientific and Technical Conference*. 28–30 November 2011, Omsk. Omsk; 2011. p. 166–171. (In Russ.). EDN: WKSJYL.
21. Ahmadova H.H., Hadisova J.T., Mahmoudova L.H., Abdullmezhidova Z.A., Musayeva M.A. Basic Bitumen Modification Methods Various Additives. *Herald of GSTOU. Technical Sciences*. 2019;15(3):42-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2019.17.3.006>. EDN: PKSIKW.
22. Akulova M.V., Kasatkina N.K., Nikitina I.V., Semenov A.D. Modifying Additives to Bitumen for Asphalt Concrete Mixes. In: *Engineering and Social Systems. Collection of Scientific Papers of the Institute of Architecture, Construction and Transport of IVGPU*. Ivanovo: Ivanovo State Polytechnical University, 2021. p. 3–10. (In Russ.). EDN: WOVFOU.
23. Gorelysheva L.A. Theoretical Aspects of Systematization of Additives Improving Properties of Bituminous Binders and Asphalt Concrete Mixture. *Roads and Bridges*. 2019;2:203-236. (In Russ.). EDN: HSZYRN.
24. Oparina D.V., Shirokova E.S. Evaluation of The Adhesive Properties of Bitumen Modified with The Additive “HONEYWELL TITAN 7686”. In: *Obshchestvo. Nauka. Innovatsii. (NPK-2023). Sbornik materialov XXIII Vserossiiskoi (natsio-nal'noi) nauchno-prakticheskoi konferentsii, priurochennoi k 60-letiyu VyatGU = Society. Science. Innovations. (NPK-2023). Collection of Materials of The XXIII All-Russian (National) Scientific and Practical Conference Dedicated to The 60th Anniversary of Vyatka State University*. 12–22 June 2023, Kirov. Kirov; 2023. p. 199–202. (In Russ.). EDN: LLATSB.
25. Balabanov V.B., Dzhuraev A.R. Experience in Honeywell Titan 7686 Polymer Usage to Obtain Bituminous Binder with High Physical and Mechanical Properties. *Young Researchers' Journal of ISTU*. 2022;12(2):300-305. (In Russ.). EDN: ZWDAGY.
26. Solomentsev A.B., Mosyura L.S., Anahin N.Y., Groshev N.G. Study of Physical and Mechanical Properties of Asphalt Binder with Adhesive Additives. *International Research Journal*. 2017;1-4:124-127. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.55.159>. EDN: XRHHFZ.

27. Ryabinina K.M., Provatorova G.V. Investigation of The Properties of Asphalt Concrete On Polymer-Modified Bitumen. *Construction Materials and Products*. 2022;5(4):19-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-4-19-29>. EDN: MEGOFM.
28. Solomentsev A.B., Mosyura L.S. Properties of Road Bitumen with Adhesive Additives of Various Compositions. In: *High-Tech and Innovation. Collection of Reports of the International Scientific and Practical Conference*. Belgorod: Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov, 2016. p. 221–226. (In Russ.). EDN: YNKXBN.
29. Polonik V.D., Naumova Yu.A., Lyusova L.R., Kovaleva A.N. Modification of Properties of Bitumen Binders by Additives of Polyethylene Wax. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2024;3:10-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1813-7008-2024-0-3-10-16>. EDN: AJZYQD.

Информация об авторах**Тюрюханов Кирилл Юрьевич,**

к.т.н., доцент кафедры автомобильных дорог и мостов,
Пермский государственный аграрно-технологический университет им. академика Д.Н. Прянишникова, 614045, г. Пермь, Петропавловская ул., 23, Россия,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, Россия,
e-mail: turuchanov.k.u@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6417-5481>
Author ID: 969266

Иванов Сергей Александрович,

к.т.н., доцент кафедры автомобильных дорог и городского кадастра,
Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия,
✉e-mail: isa.ad@kuzstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6636-8989>
Author ID: 719226

Information about the authors**Kirill Yu. Tyuryukhanov,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Highways and Bridges, Perm National Research Polytechnic University, 23 Petropavlovskaya St., Perm 614045, Russia,
Perm State Agrarian and Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, 29 Komsomolsky Ave., Perm 614990, Russia,
e-mail: turuchanov.k.u@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6417-5481>
Author ID: 969266

Sergey A. Ivanov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Highways and Urban Cadastre, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 28 Vesennaya St., Kemerovo 650026, Russia,
✉e-mail: isa.ad@kuzstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6636-8989>
Author ID: 719226

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 31.03.2025.
Одобрена после рецензирования 28.04.2025.
Принята к публикации 30.04.2025.

Information about the article

The article was submitted 31.03.2025.
Approved after reviewing 28.04.2025.
Accepted for publication 30.04.2025.



Электронная форма технической документации, основа современных методов эксплуатации объектов недвижимости

Л.Н. Чернышов^{1✉}, А.Г. Калгушкин²

^{1,2}Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

Аннотация. Безопасность и долговечность функционирования сданных в эксплуатацию зданий, строений, сооружений зависит от качества, эффективности и своевременности выполнения работ персоналом эксплуатационных организаций. В свою очередь осуществляемая деятельность по содержанию, обслуживанию и ремонту конструктивных элементов, инженерных систем и оборудования объектов недвижимости невозможна без использования технической документации (чертежей, схем, журналов, инструкций паспортов и др.). Проведен анализ нормативно - правовых документов в сфере строительства, регулирующих организацию и осуществление деятельности проектных, строительных, экспертных, эксплуатирующих организаций и отраслевых органов исполнительной власти. Результаты исследования позволили сформулировать предложения о необходимости внесения дополнения в существующие нормативно-правовые документы в части касающейся возможности использования исполнительной и эксплуатационной документации на эксплуатационном этапе жизненного цикла объекта капитального строительства. При подготовке публикации проведен анализ совместимости форм и содержания исходной и эксплуатационной документации, передаваемой застройщиком эксплуатационной организации, а также рассмотрены возможности её синхронизации в рамках внедрения цифровых информационных моделей объектов капитального строительства. Описаны преимущества использования электронных документов на эксплуатационном этапе жизненного цикла объекта капитального строительства, в том числе трансформация электронных документов в интерактивные электронные документы, для более доступных форм организации выполнения регламентных работ персоналом эксплуатирующей организации. Кроме того, показаны перспективы дальнейшего использования интерактивных электронных документов в образовательном процессе учреждений образования.

Ключевые слова: здания, строения, сооружения; техническая, электронная и интерактивная документация; эксплуатация, цифровизация, персонал, эксплуатационная организация

Для цитирования: Чернышов Л.Н., Калгушкин А.Г. Электронная форма технической документации, основа современных методов эксплуатации объектов недвижимости // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 539–549. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-539-549>. EDN: ZIVKMR.

Original article

The electronic form of technical documentation, the basis of modern methods of operation of real estate

Leonid N. Chernyshov^{1✉}, Alexey G. Kalgushkin²

^{1,2}National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

Abstract. The safety and durability of the operation of commissioned buildings, structures, and structures depends on the quality, efficiency, and timeliness of work performed by the personnel of the operating organizations. In turn, the activities carried out on the maintenance, maintenance and repair of structural elements, engineering systems and equipment of real estate objects are impossible without the use of technical documentation (drawings, diagrams, magazines, passport instructions, etc.). The analysis of regulatory documents in the field of construction regulating the organization and implemen-

tation of the activities of design, construction, expert, operating organizations and industry executive authorities is carried out. The results of the study made it possible to formulate proposals on the need to make additions to existing regulatory documents regarding the possibility of using executive and operational documentation at the operational stage of the life cycle of a capital construction facility. During the preparation of the publication, the compatibility of the forms and content of the source and operational documentation transmitted by the developer to the operating organization was analyzed, as well as the possibilities of its synchronization within the framework of the introduction of digital information models of capital construction facilities. The advantages of using electronic documents at the operational stage of the life cycle of a capital construction facility are described, including the transformation of electronic documents into interactive electronic documents for more accessible forms of organizing routine maintenance by the personnel of the operating organization. In addition, the prospects for further use of interactive electronic documents in the educational process of educational institutions are shown.

Keywords: buildings, structures, structures; technical, electronic and interactive documentation; operation, digitalization, personnel, operational organization

For citation: Chernyshov L.N., Kalgushkin A.G. The electronic form of technical documentation, the basis of modern methods of operation of real estate. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):539-549. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-539-549>. EDN: ZIVKMR.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация – комплекс организационных и технических мероприятий, включающий управление, эксплуатационный контроль, техническое обслуживание, содержание и текущий ремонт зданий, строений, сооружений (ЗСС), гарантирующий предоставление соответствующих коммунальных услуг, на протяжении всего периода эксплуатации, а также функционирования объекта недвижимости по назначению.

Эксплуатационный этап жизненного цикла объекта капитального строительства (ОКС) начинается с момента введения объекта в эксплуатацию, в процедуру которого входит передача собственнику или уполномоченной им эксплуатирующей организации скомплектованной, в соответствии с СП 68.13330.2017 «СНиП 3.01.04–87 Приемка в эксплуатацию законченных строительством объектов. Основные положения», исполнительной и эксплуатационной документации. Требования к передаваемой документации, определены в «Положении о составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 16.02.2008 г. № 87, где в частности предусмотрен раздел «Мероприятия по обеспечению безопасной эксплуатации объектов капитального строительства», сформированный на основе норм ст. 17 федерального закона № 337 от 28.11.2011 г. «О внесении изменений в Градостроительный кодекс РФ и отдельные законодательные акты РФ» и п. 9 ст. 15 «Техниче-

ского регламента о безопасности зданий и сооружений».

Соблюдение данного требования является важнейшим элементом, способствующим обеспечению надежного и безопасного функционирования здания, строения, сооружения по его функциональному назначению в течение достаточно продолжительного периода времени (от 30 до 100 лет и более).

Таким образом, наличие и использование эксплуатирующей организацией исполнительной и эксплуатационной (технической) документации, является неременным условием качества и надежности функционирования объекта недвижимости.

Важным элементом ведения технической документации на эксплуатационном этапе жизненного цикла объекта капитального строительства является полнота и своевременность внесения в нее всех изменений, которые возникают в конструкциях, инженерном оборудовании и системах ЗСС, происходящих в процессе выполнения работ по их содержанию, обслуживанию и ремонту. Это позволит не только давать объективную оценку качеству выполняемых работ, но и избежать впоследствии ошибок, при осуществлении дальнейшей эксплуатации объекта недвижимости.

Следует отметить, что использование полного комплекта технической документации в мировом опыте эксплуатации ЗСС отмечается как основа рационального использования энергетических и финансовых ресурсов, залог обеспечения нормативных сроков службы объекта капитального строительства [1].

МЕТОДЫ

Для безопасной эксплуатации ЗСС на эксплуатационном этапе жизненного цикла следует отметить непереносимые условия, касающиеся не только использования эксплуатирующей организацией в своей деятельности двух видов технической документации – исполнительной (чертежи деталей и узлов, схемы, разрезы, сечения и др.) и эксплуатационной (журналы, паспорта, акты, ведомости, планы и пр.), но и различия, лежащие в основе их разработки и оформлении.

В первую очередь это обусловлено тем, что эксплуатация объектов недвижимости невозможна без использования в процессе выполнения работ по техническому обслуживанию, содержанию и текущему ремонту:

- чертежей деталей и узлов конструкции ЗСС, представленных в виде разрезов и сечений (рис. 1);
- схем прокладки инженерных систем;
- чертежей «привязки» устанавливаемых приборов и оборудования (рис.2), которые

разрабатываются на стадии проектирования и строительства объекта.

В соответствии с требованиями национального стандарта ГОСТ 2.601–2006 «Единая система конструкторской документации», чертежи деталей и узлов, схем, разрезов, сечений – это конструкторские документы, разработка которых стандартизирована, то есть ведется строго по требованиям, указанным в выше упомянутом национальном стандарте и других стандартах в соответствующей области деятельности.

Данные обстоятельства делают эти документы, выпускаемые в бумажном виде, актуальными для прочтения и понимания инженерно-техническим и линейным персоналом строительных и эксплуатирующих организаций вне зависимости от авторства и места их разработки. Более того, в ч. 7 ст. 53 Градостроительного кодекса РФ указано, что исполнительная документация должна храниться в течение всего срока эксплуатации здания, строения, сооружения.

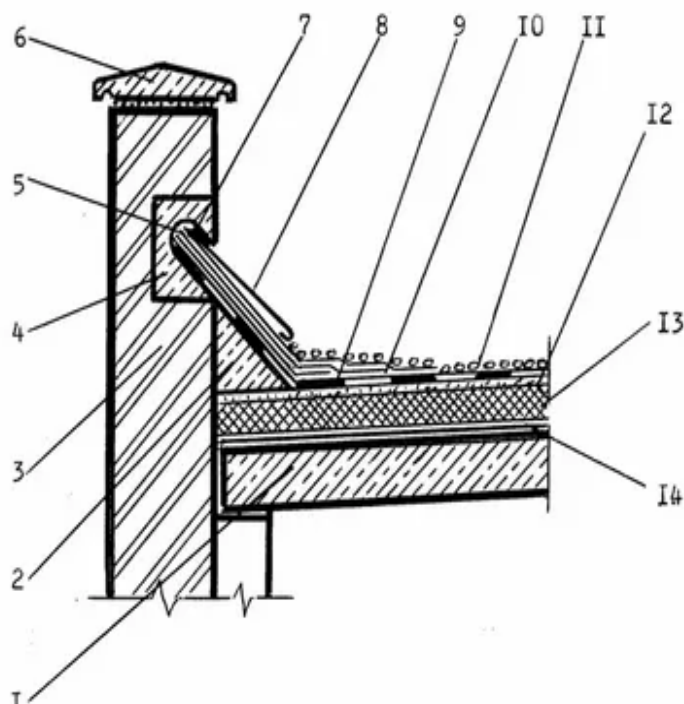


Рис. 1. Детализация элементов примыкания кровли к стене здания: 1 – плита покрытия; 2 – бортик; 3 – парапет стеновой; 4 – цементный замок; 5 – мастика герметизирующая, 6 – плита парапетная; 7 – гидроизоляция рулонная; 8 – фартук защитный оцинкованный; 9 – диффузионная прослойка; 10 – дополнительный слой гидроизоляции; 11 – защитный слой из гравия, втопленного в битумную мастику; 12 – стяжка цементная; 13 – утеплитель; 14 – пароизоляционный слой

Fig. 1. Detailing the elements of the roof abutment to the building wall: 1 – roof slab; 2 – kerb; 3 – wall parapet; 4 – cement lock; 5 – sealing mastic; 6 – parapet slab; 7 – roll waterproofing; 8 – galvanized protective apron; 9 – diffusion layer; 10 – additional waterproofing layer; 11 – protective layer of gravel embedded in bitumen mastic; 12 – cement screed; 13 – insulation; 14 – vapor barrier layer

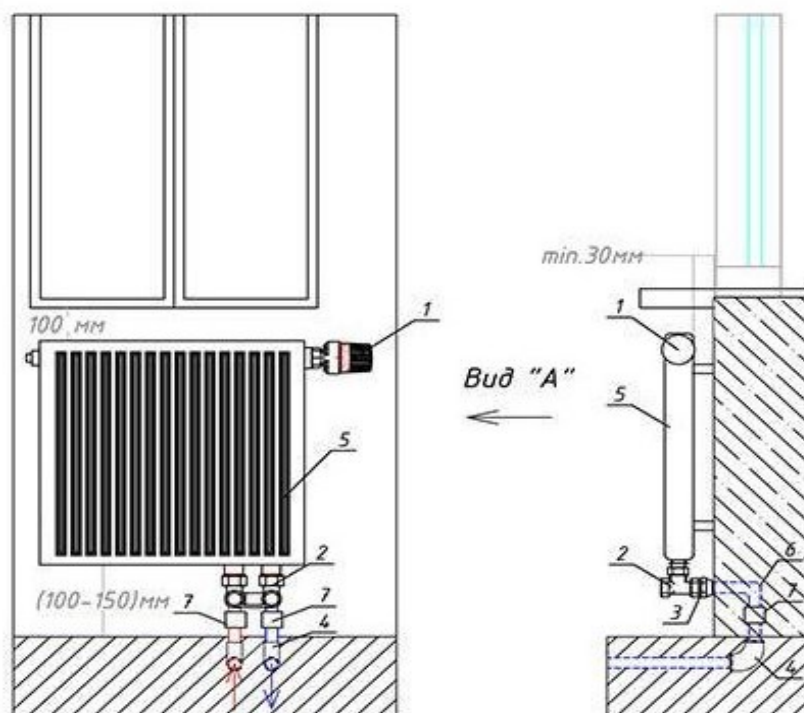


Рис. 2. Чертеж установки прибора отопления: 1 – головка термостатическая; 2 – узел нижнего подключения; 3 – переходник; 4 – отвод 90; 5 – отопительный прибор (радиатор отопления); 6 – отвод крутоизогнутый; 7 – муфта соединительная
Fig. 2. Drawing of the heating device installation: 1 – thermostatic head; 2 – lower connection unit; 3 – adapter; 4 – 90 bend; 5 – heating device (radiator); 6 – sharply curved bend; 7 – connecting sleeve

Согласно требованиям СП 255.1325800.2016. «Свод правил. Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения», эксплуатационная документация делится на документацию длительного хранения и документацию, заменяемую в связи с истечением срока ее действия. И та и другая документация носит рабочий, прикладной характер, раскрывающая процедурные вопросы организации деятельности персонала организации осуществляющей функции содержания, обслуживания и ремонта конструктивных элементов, инженерных системах и оборудовании объектов недвижимости в соответствии с требованиями заключенных договоров и технических регламентов [2].

Таким образом, эксплуатационная документация, приведенная в СП 255.1325800.2016 носит в основном информационно-статистический и учетный характер (журналы, паспорта, акты, ведомости, планы и

пр.), в то время как работы по техническому обслуживанию, содержанию и текущему ремонту конструктивных элементов и инженерных систем зданий, строений, сооружений осуществляются в соответствии с утвержденными планами, графиками, правилами и нормами технической эксплуатации зданий, строений и сооружений, с использованием исполнительных схем и рабочих чертежей, которые входят в пакет исполнительной документации в рамках процедуры ввода объекта капитального строительства в эксплуатацию [3, 4].

В тоже время формы эксплуатационных документов длительного хранения¹ и заменяемых с течением времени эксплуатации объекта недвижимости не стандартизированы. В нормативно-правовых документах, регулирующих деятельность по эксплуатации объектов недвижимости, приводятся лишь требования к содержанию этих документов. Кроме того, эксплуатационные документы не синхронизи-

¹Единственным формализованным эксплуатационным документом, является «Инструкция по эксплуатации многоквартирного дома», утвержденная приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 01.06. 2007 г. N 45., которая была разработана в соответствии постановлениями Правительства РФ, регулирующими вопросы осуществления деятельности по управлению многоквартирными домами, а также правила содержания общего имущества в многоквартирном доме.

рованы по форме и содержанию с исполнительной документацией, что затрудняет перенос и внесения сведений в исполнительную документацию, касающихся изменений в элементах и инженерных системах ЗСС, которые возникают в процессе выполнения работ по их содержанию, обслуживанию и ремонту.

Более того, соответствующие требования к порядку ведения эксплуатационной документации, по аналогии с журналами общестроительных и специальных работ (см. приказ Минстроя России от 2.12.2022 г. № 1026/пр) в строительных нормативно – методических документах, не установлены.

В свою очередь, для контроля достоверности соответствия объекта требованиям проектной документации, в том числе с учетом внесенных в неё изменений на стадии строительства, не случайно в числе «подписантов» актов (приложение 4 и 5, в составе исполнительной документации, утвержденной приказом Минстроя России № 344/пр от 16.05.2023г. значится «лицо ответственное за эксплуатацию здания сооружения».

В тоже время, в СП 68.13330.2017 упоминание о таком «лице», представляющего интересы собственника объекта недвижимости или уполномоченной им эксплуатационной организации, которая принимает на себя бремя эксплуатации ЗСС на ближайшие 30 – 50 лет, отсутствует.

В настоящее время, исходя из анализа утвержденных и реализуемых в стране Национальных проектов, все большее внимание уделяется вопросам комфорта и безопасности строящихся и эксплуатируемых зданий и сооружений, создаются инновационные инструменты развития территорий. При этом, не секрет, что основой безопасности объектов недвижимости, является мониторинг и качественный анализ рисков, возникающих в процессе износа основных элементов и инженерных систем ЗСС, а также полнота и достоверность исходной и накопленной информации о их состоянии. Сегодня именно цифровые технологии позволяют собирать и использовать большой объем данных о состоянии элементов зданий сооружений, инженерных системах и оборудовании, в том числе вторично, многократно и в разрезе большего спектра задач, которые они выполняют для создания безопасных, доступных и комфортных условий в

объектах недвижимости с длительным периодом пребывания человека и формирования эффективной системы управления городским хозяйством [4]. Особое значение это обстоятельство приобретает в условиях реализации национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации», благодаря которой было разработано и утверждено распоряжением Правительства РФ от 27.12.2021 г. № 3883-р «Стратегическое направление в области цифровой трансформации строительной отрасли, городского и жилищно-коммунального хозяйства РФ до 2030г.». В этом многостраничном документе представлен комплексный подход к цифровой трансформации системы управления деятельностью в области строительства и эксплуатации ОКС, охватывающий все этапы его жизненного цикла, от проектирования до утилизации.

Цели и задачи цифровой трансформации отраслей строительства и жилищно-коммунального хозяйства (далее – ЖКХ), изложенные в этом документе, касаются, с одной стороны, адаптации системы городского управления к постоянным изменениям запросов общества (потребителей, бизнеса и др.), чтобы эти запросы прогнозировать и опережать, а с другой для того, чтобы обеспечить многоплановую, комплексную работу с ОКС, на основе преемственности, взаимопонимания и тесного взаимодействия специалистов и организаций различных направлений деятельности: проектировщиков; производителей строительных материалов, изделий и оборудования; строителей; финансовых, эксплуатирующих и ресурсоснабжающих организаций. [5, 6]. В соответствии с ГОСТ Р 57311-2016 «Моделирование информационное в строительстве. Требования к эксплуатационной документации объекта завершенного строительства» установлен состав цифровой информационной модели, требования к организации процесса управления информацией, перечень эксплуатационной документации, которая должна входить в состав этой цифровой модели. Учитывая это можно определить, что внедрение и применение ТИМ (BIM)-технологий как в строительстве, так и при организации мероприятий по эффективной эксплуатации не может осуществляться без ведения технической документации в электронном формате², в которой фиксируются основ-

²В соответствии с ГОСТ Р 70108-2022 «Документация исполнительная. Формирование и ведение в электронном виде», электронный документ, это документированная информация, представленная в электронной форме, то есть в виде, пригодном для восприятия человеком с использованием электронных вычислительных машин, а также для передачи по информационно-телекоммуникационным сетям или обработки в информационных системах.

ные результаты деятельности эксплуатантов на всех этапах жизненного цикла здания, строения, сооружения.

Формирование и ведение исполнительной документации на этапе строительства объекта недвижимости, в том числе с применением технологий информационного моделирования, на данный момент достаточно подробно представлен Градостроительным кодексом РФ, а также в отраслевых сводах правил, СНИПах, ГОСТах и приказах Минстроя России.

Грамотное использование технической документации и корректное отражение изменений, возникающих в процессе эксплуатации объекта недвижимости позволит принимать правильные инженерные решения при его эксплуатации, в том числе в случае необходимости производства работ на ранее отремонтированных элементах и системах ЗСС.

Кроме того, в случае нарушения «штатной» работы конструкций и инженерных систем ЗСС в отдаленной перспективе, изменения отраженные в технической документации по результатам проведения регламентных работ на эксплуатационном этапе жизненного цикла, позволяют объективно подойти к определению причин отклонения в их работе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматривая процесс эксплуатации объекта недвижимости, как совокупность действий персонала эксплуатационной организации, руководствующегося исполнительной и эксплуатационной документацией при выполнении работ, следует отметить, что при отсутствии нормативно установленных форм эксплуатационной документации, в которых первоначально фиксируются изменения возникающие в конструктивных элементах, инженерных системах и оборудовании ЗСС в процессе эксплуатации, перенос этой информации в исполнительную документацию (чертежи деталей и узлов, схемы, разрезы, сечения и др.) сегодня ограничен или существенно осложнен.

В тоже время, цифровая информационная модель ОКС позволяет обеспечить соблюдение требований синхронизации этой документации ввиду того, что перечень необходимых документов подлежащих передаче от застройщика эксплуатирующей организации будет «защит» в программно – методическом комплексе цифровой информационной модели объекта капитального строительства [7].

Следует отметить, что если на первых этапах информационное моделирование в строительстве осуществлялось на базе систем автоматического проектирования и стро-

ительства (САПР), данных электронных библиотек и смет на строительство и решало локальные задачи, например: оптимизацию затрат на строительство, то цифровая информационная модель ЗСС (цифровой двойник), это уже многофункциональная платформа, позволяющая на основе инструментального мониторинга собрать «Большие данные» («BIG DATA») о реальном текущем состоянии объекта недвижимости, в процессе его строительства и эксплуатации.

Таким образом, собранные цифровые данные позволяют перейти от «прогнозных (предиктивных) функций информационной модели к проактивным, когда машинный интеллект и дополненная реальность делают это стремительно (более оперативно) для каждого элемента ОКС и предлагают обоснованное решение проблемы с учётом всей полноты накопленных сведений, обеспечивая эффективное управление на всех этапах жизненного цикла [8, 9].

Внедрение технологии информационного моделирования, а также требования нормативных документов в строительстве (ГОСТ Р 21.101-2020) касающиеся необходимости дублирования на персональном компьютере и хранения на магнитных носителях документов длительного хранения, ввиду возможной утраты бумажных экземпляров технической документации, открывает возможности для появления интерактивной электронной технической документации (далее - ИЭТД), представляющей собой электронные документы, содержащие сведения о конструктивных элементах, инженерных системах и оборудовании объектов недвижимости, представленных в графическом и текстовом формате, которые «преподносят» сведения об объекте и его элементах в более доступной, наглядной форме и обеспечивает пользователя справочными материалами, рассказывая об элементах и системах ЗСС, принципах их работы и регламентных эксплуатации (рис.3).

Интерактивная электронная инструкция по эксплуатации здания, строения, сооружения должна быть простой и наглядной при использовании настолько, чтобы работник (или студент), обладающий необходимыми знаниями и навыками в области строительства и технической эксплуатации, мог найти необходимый участок производства работ, понять, из каких элементов и материалов состоит элемент инженерной коммуникации или конструкции ЗСС, понять их устройство и назначение, выполнить необходимые мероприятия и сделать отметку о проведенных работах в интерактив-

ной модели здания, строения сооружения. Поэтому в ИЭИЭ должны быть представлены объемные модели, с четкой детализацией узла или конструктивного элемента здания, видео инструкция или иллюстрированная технологическая карта, описывающая последовательность работ по техническому обслуживанию и ремонту инженерно-технического оборудования, инженерных систем или конструктивных элементов объекта (ЗСС).

Трехмерная интерактивная модель элемента должна давать эксплуатанту полное представление о месте положения узла в здании, способам доступа к узлу и производства работ с ним, для того чтобы работник эксплуатирующей организации мог выполнить

осмотр объекта обслуживания или ремонта как в реальных условиях, так и перед началом производства работ [10]. Технологические подвижные модели формируются методом чередования двух - или трехмерных наглядных изображений и представляют собой чередование чертежей или эскизов от исходных изображений до достижения результата для наглядной демонстрации, например, сложной процедуры ремонта узла, сочетающего в себе разборку, сборку, а также замену элементов конструкции здания, строения, сооружения.

При необходимости такая модель должна обеспечивать возможность смены положения объекта для демонстрации скрытых или труднодоступных компонентов (рис. 3).

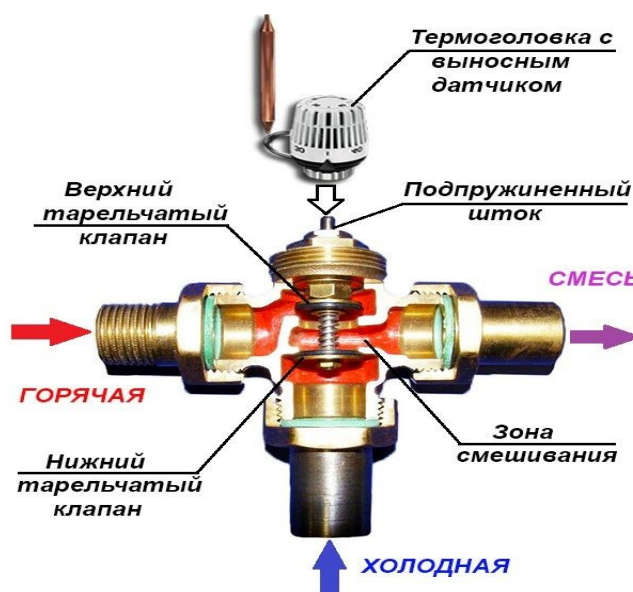


Рис. 3 Анимационная модель регулирующего устройства
Fig. 3 Animation model of the regulating device

В видео- (ролике, клипе), представляется реальное киноизображение, на котором представлена последовательность выполнения операций по обслуживанию или работу элементов (оборудования) ЗСС (рис. 4).

Такая интерактивная электронная документация, представляемая на современных средствах коммуникаций в доступной и наглядной форме в совокупности со справочной информацией, позволяет не только персоналу эксплуатационной организации, но и студентам профильным учреждениям образования в интерактивном формате:

- осуществлять моделирование процессов технического обслуживания и текущего ремонта конструктивных элементов, инженерно-технического оборудования и инженерных систем ЗСС;

- давать возможность представления последовательности действий персонала при выполнении работ по эксплуатации в формате видеотрансляции и анимационном формате;

- определять технические решения необходимые персоналу при выполнении работ эксплуатации, прогнозировать риски и их влияние на технологические процессы;

- обеспечивать возможность синхронного с выполнением работ изменений в изменяемую эксплуатационную документацию и документацию длительного хранения (при необходимости);

- обеспечивать осуществление мероприятий по поиску и устранению дефектов на элементах конструкции, инженерно-техническом оборудовании и инженерных системах ЗСС, предупреждению возникновения аварийных ситуаций и технических сбоев.



Рис. 4. Видео-клип монтажа сантехнического оборудования
Fig. 4. Video clip of plumbing installation

При этом глубину анализа при необходимости можно будет расширить, добавив дополнительные данные или отметить их недостаточность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что эксплуатационные документы не синхронизированы по форме и содержанию с исполнительной документацией, что затрудняет «перенос» и внесения сведений в исполнительную документацию, об изменениях, которые возникают в процессе выполнения работ по их содержанию, обслуживанию и ремонту. Это приводит к некорректному отражению изменений в элементах и инженерных системах ЗСС, возникающих в процессе эксплуатации объекта недвижимости, что не позволяет принимать правильные инженерные решения при его эксплуатации, в том числе в случае необходимости производства работ на ранее отремонтированных элементах и инженерных системах. В тоже время, возможность синхронизации форм и содержания исполнительной и эксплуатационной документации в цифро-

вой информационной модели позволят установить единый подход к составу технической документации на стадии эксплуатации ЗСС, и будет способствовать формированию критериев оценки технического состояний объекта недвижимости.

Это позволит не только прогнозировать изменение технического состояния конструктивных элементов и инженерных систем объекта недвижимости, но и автоматизировать процессы принятия организационно – технических решения персоналом эксплуатационных организаций, обеспечивающие надежность и безопасность их функционирования на эксплуатационном этапе его жизненного цикла. Исходя из этого возникает необходимость дополнения уровня проработки цифровых информационных моделей - «Эксплуатационная модель», СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели», в части касающейся исполнительной и эксплуатационной документации. Кроме того, использование в процессе строительства и

эксплуатации ЗСС электронной документации обеспечивает возможность разработки и внедрения интерактивной электронной технической документации, неоспоримым достоинством которой является возможность виртуального отображения последовательности действий эксплуатирующего персонала при технической эксплуатации и ремонте инженерно-технического оборудования, инженерных систем, элементов конструкций ЗСС в виде трёхмерных моделей, анимационных роликов - технологических карт, видеоинструкций, что позволит минимизировать ошибки при их обслуживании и ремонте, а также в режиме

реального времени производить отметки о произведенных работах. Подобная «прозрачность» и обоснованность выбора различных форм электронных документов предоставляет возможность эксплуатационным организациям шире использовать современные технологий по организации и выполнению работ по содержанию и ремонту ЗСС, а визуализация и прогноз технического состояния объекта недвижимости становится доступным не только эксплуатирующей организации, но и собственнику объекта недвижимости и органам власти и контрольно - надзорным организациям [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goretti H.A., Kaming P. A Review and Bibliometric Analysis of Utilizing Building Information Modeling (BIM) On Effective Operation and Maintenance (O&M) // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 429. P. 1–12. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342901002>.
2. Чернышов Л.Н., Ивчик Т.А., Калгушкин А.Г. Особенности функционирования многоквартирных зданий на эксплуатационном этапе жизненного цикла // *Экономика строительства*. 2024. № 9. С. 343–347. EDN: APJGKC.
3. Черепанов Н.В., Буслаев С.П. Проблемы создания электронного архива конструкторской документации на основе бумажного архива // *Инновации и инвестиции*. 2020. № 10. С. 163–165. EDN: ECJPZD.
4. Рашев В.С., Астафьева Н.С., Рогожкин Л.С., Григорьев В.Ю. Анализ внедрения технологии информационного моделирования в Российских строительных компаниях по проектированию и строительству инженерных систем // *Вестник Евразийской науки*. 2020. Т. 12. № 3. С. 1–11. EDN: LWIUW.
5. Jibrin I.M., Shehu M.A., Abubakar S.I., Akpobasa B.O., Abdullah F.S. Application of BIM Implementation Process in the Operation and Maintenance of Information Management System in Building Facilities // *Environmental Technology and Science Journal*. 2023. Vol. 14. Iss. 2. P. 1–9. <https://doi.org/10.4314/etsj.v14i2.6>.
6. Коротеев Д.Д., Ким А.А., Васютин А.О. Перспективы применения цифровых двойников в строительной отрасли // *Вестник Евразийской науки*. 2024. Т. 16. № 2. С. 50–54. EDN: ACIYHP.
7. Ammar A., Nassereldine H., Abdul Baky N., Abou Kansour A., Tannoury J., Urban H. et al. Digital Twins in the Construction Industry: A Perspective of Practitioners and Building Authority // *Frontiers in Built Environment*. 2022. Vol. 8. P. 1–23. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.834671>.
8. Барабанова Т.А., Балалов В.В., Блинова О.С. Применение технологии «цифровых двойников» при эксплуатации зданий и сооружений // *Строительство и архитектура*. 2022. Т. 10. № 2. С. 81–85. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2022-10-2-81-85>. EDN: DNCUHG.
9. Шемонаева А.А., Зеленина А.А. Исследование программного обеспечения 3D-технологий в решении научно-технических задач в архитектуре // 3D-технологии в решении научно-практических задач. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции (г. Красноярск, 29 сентября 2022 г.). Красноярск, 2022. С. 112–115. EDN: INIUEK.
10. Чернышов Л.Н. Организационно-технические и методические предпосылки профессиональной трансформации в ЖКХ // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2022. № 1. С. 106–114. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.69.60.011>. EDN: GCBLSZ.
11. Куприков Н.М., Куприков М.Ю., Будкин Ю.В., Проблемы методологии информационно-технологического сопровождения технического обслуживания и ремонта // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 7. С. 296–302. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-7-296-303>. EDN: QGAAAV.

REFERENCES

1. Goretti H.A., Kaming P. A Review and Bibliometric Analysis of Utilizing Building Information Modeling (BIM) On Effective Operation and Maintenance (O&M). *E3S Web of Conferences*. 2023;429:1-12. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342901002>.
2. Chernyshov L.N., Ivchik T.A., Kalgushkin A.G. Specific of Functioning Of the Apartment Buildings at the Operational Life Cycle Stage. *Construction Economics*. 2024;9:343-347. (In Russ.). EDN: APJGKC.

3. Tcherepanov N.V., Buslaev S.P. Problems of Creation of Electronic Archive of the Design Documentation on the Basis of Paper Archive. *Innovation & Investment*. 2020;10:163-165. (In Russ.). EDN: ECJPZD.
4. Rashev V.S., Astafeva N.S., Rogozhkin L.S., Grigorev V.Iu. Analysis of the Implementation of Information Modeling Technology in Russian Construction Companies for the Design and Construction of Engineering Systems. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020;12(3):1-11. (In Russ.). EDN: LWIIUW.
5. Jibrin I.M., Shehu M.A., Abubakar S.I., Akpobasa B.O., Abdullah F.S. Application of BIM Implementation Process in the Operation and Maintenance of Information Management System in Building Facilities. *Environmental Technology and Science Journal*. 2023;14(2):1-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.4314/etsj.v14i2.6>.
6. Koroteev D.D., Kim A.A., Vasiutin A.O. Prospects for the Application of Digital Twins in the Construction Industry. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(2):50-54. (In Russ.). EDN: ACIYHP.
7. Ammar A., Nassereddine H., Abdul Baky N., Abou Kansour A., Tannoury J., Urban H. et al. Digital Twins in the Construction Industry: A Perspective of Practitioners and Building Authority. *Frontiers in Built Environment*. 2022;8:1-23. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.834671>.
8. Barabanva T.A., Balalov V.V., Blinova O.S. The Use of Digital Twins Technology in the Operation of Buildings and Structures. *Construction and Architecture*. 2022;10(2):81-85. (In Russ.). <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2022-10-2-81-85>. EDN: DNCUHG.
9. Shemonaeva A.A., Zelenina A.A. Research of Software of 3D Technologies in Solving Scientific and Technical Problems in Architecture. In: *3D-tekhnologii v reshenii nauchno-prakticheskikh zadach. Sbornik statei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = 3D Technologies in Solving Scientific and Practical Problems. Collection of Articles from the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 29 September 2022, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2022. P. 112–115. (In Russ.). EDN: INIUKE.
10. Chernyshov L.N. Organizational, Technical and Methodological Prerequisites for Professional Transformation in Housing and Communal Services. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2022;1:106-114. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.69.60.011>. EDN: GCBLSZ.
11. Kuprikov N.M., Kuprikov M.Yu., Budkin Yu.V. Improvement of Information and Technological Support of Maintenance and Repair. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2022;7:296-302. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-7-296-303>. EDN: QGAAAV.

Информация об авторах

Чернышов Леонид Николаевич,
д.э.н., профессор, профессор кафедры
жилищно-коммунального комплекса,
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет,
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,
Россия,
✉e-mail: leo.chern@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0007-1758-9498>
Author ID: 473278

Калгушкин Алексей Григорьевич,
аспирант,
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,
Россия,
e-mail: aleksey@kalgushkin.ru
<https://orcid.org/0009-0008-1211-6007>
Author ID: 1283947

Information about the authors

Leonid N. Chernyshov,
Dr. Sci. (Econ.), Professor, Professor
of the Department of Housing and Public Utilities,
National Research Moscow State University
of Civil Engineering,
26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow 129337,
Russia,
✉e-mail: leo.chern@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0007-1758-9498>
Author ID: 473278

Alexey G. Kalgushkin,
Postgraduate Student,
National Research Moscow State University
of Civil Engineering,
26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow 129337,
Russia,
e-mail: aleksey@kalgushkin.ru
<https://orcid.org/0009-0008-1211-6007>
Author ID: 1283947

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 25.06.2025.
Одобрена после рецензирования 04.07.2025.
Принята к публикации 07.07.2025.

Information about the article

The article was submitted 25.06.2025.
Approved after reviewing 04.07.2025.
Accepted for publication 07.07.2025.



Системы водоотведения на особо охраняемых территориях, проблемы и пути решения

В.Р. Чупин^{1✉}, В.Н. Кульков², Р.Н. Ярыгин³, Р.В. Чупин⁴, О.Л. Лавыгина⁵

^{1,2,3,4,5}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Основой для жизнедеятельности современного города являются системы водоотведения хозяйственно-бытовых сточных вод, которые представляют собой сложную техническую систему, состоящую из множества сооружений по приему, сбору, транспортировке и очистке сточных вод, поступающих от жилых зданий, объектов социального и культурного назначения. От надежности работы каждого из перечисленных сооружений зависят санитарное состояние территории, комфортность проживания и способность города развиваться. Традиционно системы водоотведения имеют разветвленную структуру, что эффективно с позиции их эксплуатации. Однако вследствие отсутствия резервных линий и устройств, при засорении и закупорке самотечных коллекторов, выше их по течению происходит заполнение сточными водами свободного пространства в трубопроводах и колодцах. При этом в пониженной местности сточные воды, как правило, изливаются из смотровых колодцев на почву и попадают в водоемы, что негативно сказывается на экологии городской среды и сохранении уникальной флоры и фауны водных объектов, особенно таких, как в оз. Байкал. Однако на законодательном уровне в особо охраняемых территориях запрещен сброс неочищенных сточных вод на поверхность земли. В статье предлагается методика резервирования хозяйственно-бытовых сетей водоотведения и на примере г. Байкальска показывается ее эффективность. Статья может быть полезна для проектировщиков и лиц, принимающих решения о строительстве систем водоотведения на особо охраняемых территориях.

Ключевые слова: системы водоотведения хозяйственно-бытовых сточных вод, надежность и способы резервирования. Проектирование и эксплуатация систем водоотведения в центральной экологической зоне оз. Байкал

Для цитирования: Чупин В.Р., Кульков В.Н., Ярыгин Р.Н., Чупин Р.В., Лавыгина О.Л. Системы водоотведения на особо охраняемых территориях, проблемы и пути решения // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 550–559. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-550-559>. EDN: RNZESA.

Original article

Wastewater disposal systems in specially protected areas, problems and solutions

Viktor R. Chupin^{1✉}, Viktor N. Kulkov², Roman N. Yarygin³,
Roman V. Chupin⁴, Olga L. Lavygina⁵

^{1,2,3,4,5}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The basis for the life of a modern city are domestic wastewater disposal systems, which are a complex technical system consisting of a variety of facilities for receiving, collecting, transporting and treating wastewater coming from residential buildings, social and cultural facilities. The sanitary condition of the territory, the comfort of living and the ability of the city to develop depend on the reliability of each of the listed structures. Traditionally, wastewater disposal systems have an extensive structure, which is effective from the point of view of their operation. However, due to the lack of backup lines and devices, when gravity collectors become clogged and blocked upstream, sewage fills the free space in pipelines and wells. At the same time, in low-lying areas, wastewater is usually poured from observation wells onto the soil and enters reservoirs, which negatively affects the ecology of the urban environment and the

preservation of the unique flora and fauna of water bodies, especially those in lakes. Baikal. However, at the legislative level, the discharge of untreated wastewater to the earth's surface is prohibited in specially protected areas. The article proposes a methodology for reserving household sanitation networks and demonstrates its effectiveness using the example of the city of Baikalsk. The article may be useful for designers and decision makers on the construction of wastewater disposal systems in specially protected areas.

Keywords: domestic wastewater disposal systems, reliability and redundancy methods. Design and operation of wastewater disposal systems in the central ecological zone of Lake Baikal

For citation: Chupin V.R., Kulkov V.N., Yarygin R.N., Chupin R.V., Lavygina O.L. Wastewater disposal systems in specially protected areas, problems and solutions. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):550-559. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-550-559>. EDN: RNZESA.

ВВЕДЕНИЕ

К особо охраняемым территориям относятся заповедники, национальные парки и заказники. К таким важным для всего человечества водоемом и окружающей его территории относится оз. Байкал, которое охраняется Федеральным законом №94-ФЗ «Об охране оз. Байкал». В этом документе строго регламентируется хозяйственная деятельность в границах Байкальской природной территории и запрещается сброс неочищенных сточных вод как на поверхность земли, так и в водные объекты, в том числе не связанные с оз. Байкал.

Традиционно системы водоотведения имеют разветвленную структуру, что эффективно с позиции их эксплуатации, организации транспортировки сточных вод в безнапорном режиме за счет сил гравитации и наличия множества смотровых колодцев. Однако, по причине отсутствия резервных линий и устройств, при закупорке любого самотечного участка сети, сточные воды поднимаются в смотровых колодцах и выходят на поверхность земли и попадают в водные объекты, что негативно сказывается на экологии окружающей среды и сохранении уникальной флоры и фауны оз. Байкал.

Известными способами резервирования сетей являются устройства аварийно-регулирующих резервуаров, разгрузочных, кольцевых и дублирующих коллекторов. Самотечные трубопроводы имеют свободную емкость, которая может также использоваться как хранилище аварийных объемов сточных вод на время ликвидации аварийных ситуаций. К сожалению, перечисленные мероприятия практически не используются при проектировании и эксплуатации систем водоотведения по причине отсутствия методических рекомендаций, технологических и экономических обоснований, цифровых подходов к моделированию и анализу последствий от принимаемых

решений по тому или иному способу резервирования.

В СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения» в подпункте 19 сказано: «Для бесперебойного действия системы водоотведения требуется предусматривать обеспечение следующих мероприятий: устройство аварийных (буферных) емкостей с последующей откачкой из них в нормальном режиме», «Для снижения величины пикового расхода сточных вод и для аккумулирования расхода сточных вод во время аварий на напорных трубопроводах допускается устройство регулирующих или аварийно-регулирующих резервуаров».

Следует отметить, что история развития нормативной базы проектирования систем водоотведения показала, что с каждой новой редакцией СП ужесточались требования к возможным выходам неочищенных сточных вод на поверхность территории населенных мест, и в настоящее время не допускается сброс неочищенных сточных вод на поверхность земли как при плановых отключениях, так и при любой аварийной ситуации.

Также предлагается производить резервирование сетей путями параллельной прокладки дополнительного трубопровода, строительства разгрузочных коллекторов, работающих по схеме кольцевых сетей, использования аккумулирующей емкости самотечных коллекторов и временного резервирования в виде аварийных емкостей. Но на данный момент в сводах правил отсутствуют рекомендации по организации того, или иного способа резервирования.

МЕТОДЫ

Были исследованы различные способы резервирования, разработаны методы моделирования перемещения сточных вод по основным и резервным трубопроводам в напорных и безнапорных режимах, с учетом возможного

выхода неочищенных стоков из колодцев на поверхность земли и затопления территории, разработаны методы схемно-структурной оптимизации новых и реконструируемых систем водоотведения, обоснованы области применения различных способов резервирования и показаны их экономическая и технологическая целесообразность применения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки способов резервирования принят количественный показатель надежности систем водоотведения:

$$\gamma = 1 - \frac{Q_{\text{сбр}}}{Q}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{сбр}}$ – расход сточных вод, в м³/год, который попадает на поверхность земли без очистки (аварийное отключение участков сети, сверхнормативное поступление сточных вод в систему и др.), Q – расход сточной жидкости, который бы транспортировался системой водоотведения на КОС за год в безаварийном режиме. Для систем водоотведения древовидной структуры профессор С.Ю. Игнатчик предложила следующую формулу [1–4]:

$$Q_{\text{сбр}} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i^{\text{сбр}} \cdot y_i}{\prod_{i=1}^n (1 + y_i)}, \quad y_i = \lambda_i / \mu_i. \quad (2)$$

где $q_i^{\text{сбр}}$ – объем сточных вод, м³/год, который будет попадать на поверхность земли в

результате аварии на участке, i , λ_i , μ_i – интенсивности отказов и восстановлений данного участка, приведенные к году, n – количество участков сети. Формула (2) представляет собой сумму аварийных расходов по каждому участку сети на время нахождения этих участков в нерабочем состоянии за год. Для разветвленной сети расходы $q_i^{\text{сбр}}$ будут соответствовать значениям их в рабочем состоянии, $q_i^{\text{сбр}} = q_i$. Формула (2) справедлива и для резервированных участков сети путем их параллельной прокладки. При этом эквивалентная интенсивность отказов из различных параллельно соединенных элементов, один из которых находится в работе, второй в резерве (холодное резервирование), определяется по формуле [5, 6]:

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = - \frac{\ln[1 - (1 - e^{-\lambda_1 \cdot t}) \cdot (1 - e^{-\lambda_2 \cdot t})]}{t}. \quad (3)$$

На побережье оз. Байкал проживает около 100 тыс. человек, примерно в 80 населенных пунктах. Наиболее крупные из них: г. Северобайкальск (21 тыс. чел), г. Слюдянка (18 тыс. чел), г. Байкальск (10,5 тыс. чел), г. Бабушкин (5,5 тыс. чел), п. Выдрино (4,4 тыс. чел), п. Нижний Ангарск (3,7 тыс. чел), п. Листвянка (2 тыс. чел) и др. На рис. 1 представлена схема основных коллекторов системы водоотведения г. Байкальска.

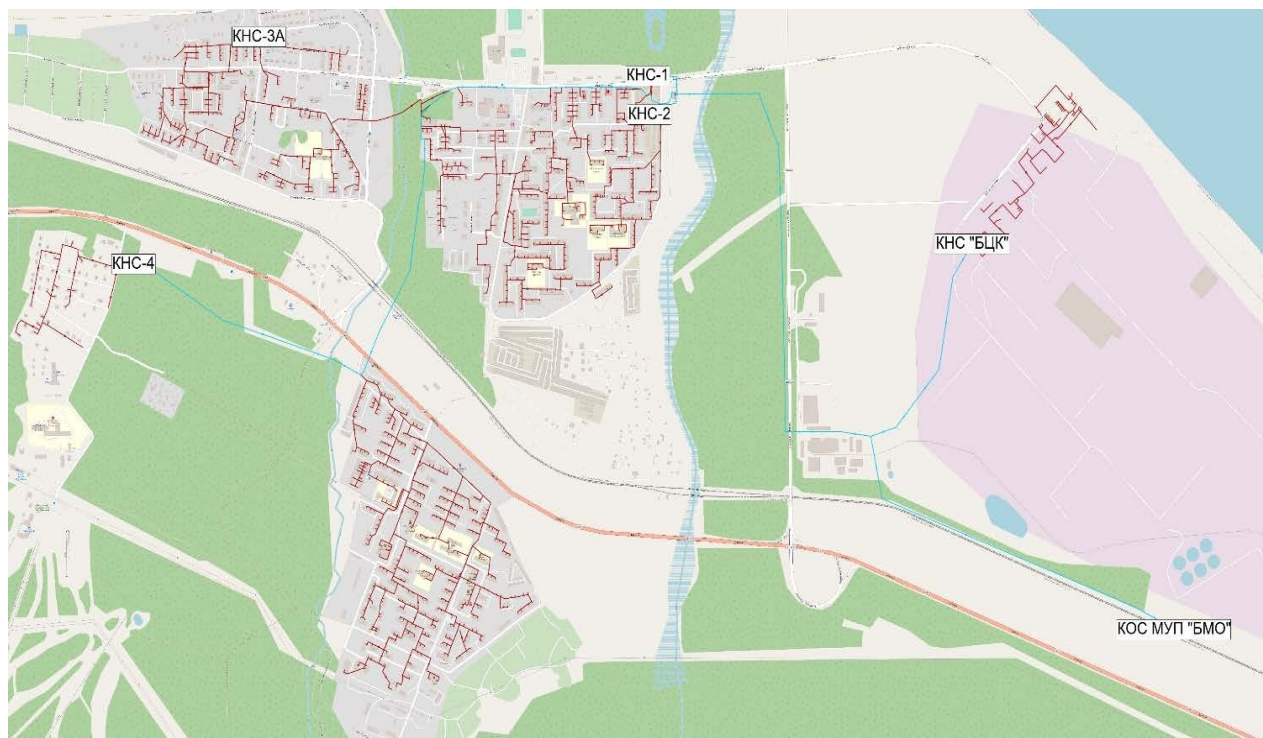


Рис. 1. Схема магистральных коллекторов хозяйственно-бытовой системы водоотведения г. Байкальска

Fig. 1. The scheme of the main collectors of the household drainage system of the city of Baikal'sk

Сеть водоотведения организована для каждого района и имеет 4 КНС для сбора и транспортировки сточных вод на КОС, рельеф местности сложный и перепад отметок составляет 120 м, город находится на склоне, обращенном к берегу оз. Байкал.

Система водоотведения г. Байкальска запроектована и функционирует по разветвленной схеме уже больше 50 лет (нормативный срок службы 40 лет), общая протяженность сетей 50 км, трубы в основном чугунные, износ приблизился к 80 %, интенсивность отказов составляет 0,05 ед. на км в год. КНС-1, КНС-2 и КНС-3 имеют по одному напорному трубопроводу длиной 1800, 300 и 700м. При

выходе из строя любого участка сети неочищенные сточные воды попадают на поверхность земли и сливаются в оз. Байкал. Такие аварийные ситуации наблюдаются 1–3 раза в год.

Требуется незамедлительная перекладка труб на новые (желательно из полиэтилена) и резервирование сетей с целью недопущения попадания сточных вод на поверхность земли и в оз. Байкал.

Рассмотрим существующую систему водоотведения района Южный г. Байкальска Иркутской области (рис. 2) и произведем оценку надежности ее работы. Результаты расчета представлены в табл. 1.



Рис. 2. Расчетная схема системы водоотведения района Южный г. Байкальск
Fig. 2. Calculation scheme of the drainage system of the Yuzhny district of Baikalsk

Трубы чугунные, интенсивность отказов для которых вычисляется по формуле [7,8]:

$$\lambda_i = 0,22 \cdot d_i^{-1,15} \quad (4)$$

С учетом формул (1), (2) проведена оценка надежности функционирования системы водоотведения района Юбилейный и результаты расчетов представлены в табл. 1.

$$P = 1 - \frac{\Delta Q}{Q} = 1 - \frac{4071,2}{654056,6} = 0,9938.$$

Таким образом, за один год на поверхность земли и в оз. Байкал попадает 4,1 тыс. м³ неочищенных сточных вод. Эти сточные воды наносят экологический ущерб флоре и фауне оз. Байкал, который можно вычислить, согласно Приказу № 87 Минприроды и экологии РФ от 13.04.2009 г. «Об утверждении методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства» ущерб водному объекту», по следующей формуле:

$$Y = K_{вр} \cdot K_{в} \cdot K_{ин} \cdot \sum_{i=1}^n (M_i \cdot H_i \cdot K_{из}), \quad (5)$$

где Y – размер ущерба, тыс. руб.; $K_{вр}$ – коэффициент, учитывающий природно-

климатические факторы, для оз. Байкал он равен 1,25; $K_{в}$ – коэффициент, учитывающий экологические факторы, для оз. Байкал он равен 2,8; $K_{ин}$ – коэффициент, учитывающий инфляционную составляющую экономического развития по отношению к 2007 г., для 2025 г. он равен – 4,1; H_i – таксы для исчисления размера вреда от сброса i-го загрязняющего вещества, определяется по таблице 3 методики расчета, тыс. руб. за тонну; $K_{из}$ – коэффициент, учитывающий интенсивность негативного воздействия вредных загрязняющих, и согласно методики, назначается в зависимости от кратности превышения фактической концентрации над ее допустимыми значениями и имеет значения от 1 до 5; M_i – масса сброшенного i-го вредного загрязняющего вещества, в тоннах:

$$M_i = Q \cdot (C_{\phi i} - C_{di}) \cdot T \cdot 10^{-6}, \quad (6)$$

где Q – расход сточной жидкости, поступающий в водоем без очистки, м³/ч; $C_{\phi i}$, C_{di} – концентрация i-го вредного загрязняющего вещества в мг/л за время T, (в часах) и его допустимая концентрация в водном объекте, в мг/л.

Таблица 1. Расчет показателей надежности системы водоотведения района Юбилейный

Table 1. Calculation of indicators of reliability of the drainage system of the Yubileyny district

№ участка	Расход, л/с	D, мм	L, м	λ_i , 1/км в год	μ_i , 1 в год	$1 + \lambda_i / \mu_i$	$1 / \prod_{i=1}^n (1 + y_i)$	$Q_{сбр}$, T=1 год
10-9	5.67	200	238	0,333	175,8	1,0019	0,984	345,3
9-6	5.67	200	167	0,234	175,8	1,0013	0,984	236,2
6-2	8.09	250	189	0,205	139	1,0015	0,984	388,9
11-8	4.93	200	266	0,372	175,8	1,0021	0,984	331,8
8-3	6.52	300	307	0,270	115,6	1,0023	0,984	480,6
3-2	8.42	300	188	0,165	115,6	1,0014	0,984	377,8
2-1	16.57	300	130	0,114	115,6	1,0010	0,984	531
1-КОС	20.74	300	240	0,211	115,6	1,0018	0,984	1196,4
7-3	1.9	250	164	0,178	139	1,0013	0,984	79,2
5-1	2.95	200	140	0,196	175,8	1,0011	0,984	104
Σ						$\prod_{i=1}^n (1 + y_i) = 1.01581$		4071,2

Допустимая концентрация вредных загрязняющих веществ установлена Приказом Минприроды России от 21.02.2020 № 83 (ред. от 04.07.2022) «Об утверждении нормативов предельно допустимых воздействий на уникальную экологическую систему озера Байкал и перечня вредных веществ, в том числе веществ,

относящихся к категориям особо опасных, высоко опасных, опасных и умеренно опасных для уникальной экологической системы озера Байкал» (Зарегистрировано в Минюсте России 23.04.2020 № 58181).

В табл. 2 представлены расчеты экологического ущерба.

Таблица 2. Расчет ущерба от сброса 4,1 тыс. м³/год хозяйственно-бытовых сточных вод в оз. Байкал

Table 2. Calculation of damage caused by the discharge of 4.1 thousand cubic meters per year of domestic wastewater into the lake. Baikal

№ п/п	Наименование вещества	Концентрация, мг/л	ПДК мг/л	Кратность превышения	Такса, Тys. руб.	Масса вредных загрязнений (M_i), тонны	$K_{из}$	$K_{вр} \cdot K_{в} \cdot K_{ин}$	Размер вреда, тыс. руб.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Взвешенные вещества	110	0,3	367	30	0,497	5	71,505	1067,08
2	БПК полн.	180	3	60	170	0,726	5	71,505	8831,2
3	ХПК	250	5,52	45,3	10	1,002	2	28,602	286,5
4	Жиры	40	1	40	280	0,074	2	28,602	1279,9
5	Азот аммонийный	18	0,01	1800	4350	0,074	5	71,505	22861,7
6	Нефтепродукты	1,0	0,01	100	4350	0,004	5	71,505	1276
7	СПАВ (анионные)	2,5	0,005	500	4800	0,01	5	71,505	3520
8	Фосфаты	2,0	0,01	200	4350	0,008	5	71,505	2552
9	хлориды	45	0,47	96	280	0,184	5	71,505	3696
10	сульфаты	40	5,53	7,2	10	0,141	1	14,301	20,2
11	Сухой остаток	300	8,3	36,2	10	1,19	2	28,602	340,3
12	железо	2.2	0,00053	4151	240100	0,009	5	71,505	161398,9
	ИТОГО								198582,9

Таким образом, согласно табл. 2, ущерб от попадания неочищенных сточных вод в оз. Байкал в размере 4,1 тыс. м³ в год составляет 198,6 млн руб. в год.

На основе методики и методов схемно-структурной оптимизации и резервирования хозяйственно-бытовых сетей водоотведения, изложенных в работах [9, 10], были определены оптимальные способы резервирования сети водоотведения. Сущность методики и методов оптимизации и резервирования заключается в следующем. Строится избыточная схема (рис. 2). На избыточной схеме для каждого участка формируются возможные варианты резервирования (параллельная прокладка дополнительного напорного и безнапорного трубопровода, устройство аварийно-регулирующего резервуара, использование аккумулирующей способности самотечных коллекторов, кольцевание напорными и безнапорными трубопроводами). Далее, избыточная сеть достраивается до транспортной сети (абоненты замыкаются на узел входа потоков, возможные существующие или новые

узлы сброса потоков сточной жидкости или КОС, замыкаются на узел входа потоков). Решается задача поиска максимального потока минимальной стоимости и определяются наилучшие способы резервирования каждого из участков сети водоотведения.

На рис. 3 показана такая резервированная схема водоотведения микрорайона Южный, в которой участки 3-2, 2-1, 1-КОС имеют параллельные самотечные коллекторы, работающие в холодном резерве (только в случае возникновения аварийной ситуации) и кольцевые участки 1-4, 5-4, 6-5, 9-4, 7-6, 8-7, 11-10, работающие в холодном резерве. Для полученной таким образом резервированной схемы водоотведения согласно формулам (1)–(3) производится оценка надежности ее функционирования.

Для определения аварийных расходов сточной жидкости используется методика расчета распределения потоков сточной жидкости в циклическом графе, в котором каждый смотровой колодец замыкается на узел с атмосферным давлением [11–14].



Рис. 3. Резервированная схема системы водоотведения района Южный г. Байкальск
Fig. 3. Redundant scheme of the drainage system of the Yuzhny district of Baikal'sk

Результаты расчетов представлены в табл. 3, из которой видно, что надежность увеличилась до пяти девяток после запятой, а расход сточной жидкости, попадающей на поверхность земли, сократился до величины 131,6 м³ в год.

$$P = 1 - \frac{\Delta Q}{Q} = 1 - \frac{131,6}{654056,6} = 0,999985.$$

В итоге, потребовалось устройство поли-
этиленовых труб, диаметром 200 мм, протя-
женностью 19 530,3 м, диаметром 315 мм, про-
тяженностью 865 м. Единовременные капита-
ловложения составили 28,2 млн руб.

При этом величина годового ущерба сократилась с 198,6 до 6,4 млн руб., т.е. на 192,1 млн руб.

Таким образом, вкладывая 28,2 млн рублей на резервирования сетей, сокращаем годовой ущерб в 192 млн руб. В г. Байкальск три таких района: Южный, Гагарина, Строителей. Эти районы, по величине нагрузки и протяженности сетей одинаковые. В целом по городу, как показали проведенные расчеты при актуализации схемы водоснабжения и водоотведения, на резервирование сетей требуется примерно 100 млн руб. Годовой ущерб сокращается на 600 млн руб.

Таблица 3. Расчет показателей надежности системы водоотведения с холодным резервированием участков сети параллельной прокладкой и кольцеванием
Table 3. Calculation of indicators of reliability of the drainage system with cold redundancy of network sections parallel routing and banding

№ участка	Расход, л/с	D, мм	L, м	λ_i , 1/км в год	μ_i , 1 в год	$1 + \lambda_i / \mu_i$	$1/\prod_{i=1}^n (1 + y_i)$	$Q_{сбр}(T = 1 \text{ год}), \text{м}^3/\text{год}$
1-КОС	11,5	300	240	0,004	115,6	1,000034	0,9994	123,3
2-1	7	300	130	0,002	115,6	1,000017	0,9994	3,8
3-2	5,5	300	188	0,003	115,6	1,000026	0,9994	4,5
4-КОС	0	200	270	0,0071	175,8	1,00004	0,9994	0
5-1	0	200	140	0,0036	175,8	1,000021	0,9994	0
5-4	0	200	141	0,0036	175,8	1,000021	0,9994	0
6-2	0	250	189	0,004	139,0	1,000029	0,9994	0
6-5	0	200	198	0,0052	175,8	1,00003	0,9994	0
7-3	0	250	164	0,0039	139,0	1,00003	0,9994	0
7-6	0	200	191	0,005	175,8	1,00003	0,9994	0
8-3	0	300	307	0,004	115,6	1,000028	0,9994	0
8-7	0	200	152	0,0048	175,8	1,000028	0,9994	0
9-9	0	200	484	0,013	175,8	1,000073	0,9994	0
9-6	0	200	167	0,005	175,8	1,00003	0,9994	0
10-9	0	200	238	0,0053	175,8	1,000031	0,9994	0
11-8	0	200	266	0,0054	175,8	1,000031	0,9994	0
11-10	0	200	226	0,0053	175,8	1,000031	0,9994	0
						$\prod_{i=1}^n (1 + y_i) = 1.00051$		$\sum 131,6$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы водоотведения, устраиваемые на особо охраняемой территории должны проектироваться и эксплуатироваться с учетом резервирования участков сени и сооружений.

Для обоснования параметров резервирования систем водоотведения предлагается метод комплексной оптимизации структуры, параметров и способов резервирования систем

водоотведения. При разработке перспективной схемы системы водоотведения г. Байкальск были использованы предлагаемые в работе методики и программный комплекс Трасе-ВК, что позволило оперативно обосновать за счет методов структурного и временного резервирования надежную схему отведения сточных вод на КОС за 100 млн рублей и предотвратить годовой ущерб на 600 млн руб.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А. Использование оценки надежности стареющих канализационных сетей при их реконструкции // Водоснабжение и санитарная техника. 2004. № 6. С. 21–24. EDN: HSDIZD.
2. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А. Надежность систем водоотведения. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2010. 165 с. EDN: QNOXUD.
3. Игнатчик С.Ю. Обеспечение надежности и энергосбережения при расчете сооружений для транспортирования сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 8. С. 56–63. EDN: MTXLUT.
4. Игнатчик С.Ю. Расчет надежности, безопасности и инвестиционной эффективности сети водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 12. С. 57–67. EDN: ONKXVX.
5. Чупин В.Р., Бобер В.А. Структурное резервирование централизованных систем водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2025. № 6. С. 26–35. <https://doi.org/10.35776/VST.2025.06.04>. EDN: BTENDR.
6. Чупин В.Р., Мелехов Е.С., Бобер В.А. Развитие методов оценки и повышения надежности централизованных систем водоотведения // Известия вузов. Строительство. 2025. № 6. С. 86–105. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-798-6-86-105>. EDN: CWRVYKX.
7. Примин О.Г. Обеспечение надежности и экологической безопасности напорных канализационных трубопроводов // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 11. С. 59–64. EDN: RESFXR.

8. Примин О.Г. Надежность систем водоснабжения и водоотведения. М.: Изд-во МИСИ–МГСУ, 2021. 68 с.
9. Чупин В.Р., Мороз М.В., Бобер В.А. Обоснование диаметров трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения на основе минимизации затрат их жизненного цикла // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 4. С. 52–58. <https://doi.org/10.35776/VST.2022.04.07>. EDN: CIOYJH.
10. Бобер В.А., Чупин В.Р., Скибо Д.В., Дударев В.И. Повышение надежности работы системы водоотведения за счет аккумулирующей способности самотечных коллекторов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 213–226. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-213-226>. EDN: PCWTRI.
11. Чупин В.Р., Ярыгин Р.Н., Бобер В.А. Повышение надежности систем водоотведения за счет использования аккумулирующей способности самотечных коллекторов // Известия вузов. Строительство. 2024. № 4. С. 137–152. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-784-4-137-152>. EDN: FWKFKFA.
12. Чупин В.Р., Бобер В.А. Оптимизация структуры и параметров напорно-безнапорных трубопроводных систем // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2023. № 12. С. 65–69. [https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-12\(605\)-65-69](https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-12(605)-65-69). EDN: KELZRE.

REFERENCES

1. Alekseev M.I., Ermolin Yu.A. The Use of Reliability Evaluation of the Aging Sewerage Networks for Their Reconstruction. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2004;6:21-24. (In Russ.). EDN: HSDIZD.
2. Alekseev M.I., Ermolin Yu.A. *Reliability of Water Drainage Systems*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2010. 165 p. (In Russ.). EDN: QNOXUD.
3. Ignatchik S.Yu. Ensuring Reliability and Energy Saving in the Calculation of Wastewater Transportation Facilities. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2010;8:56-63. (In Russ.). EDN: MTXLUT.
4. Ignatchik S.Yu. Estimation of Reliability, Safety and Investment Efficiency of a Wastewater Disposal System. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2011;12:57-67. (In Russ.). EDN: ONKXVX.
5. Chupin R.V., Bober V.A. Structural Redundancy of Public Wastewater Disposal Systems. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2025;6:26-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.35776/VST.2025.06.04>. EDN: BTENDR.
6. Chupin R.V., Melekhov E.S., Bober V.A. Development of Methods for Assessing and Improving the Reliability of Centralized Wastewater Disposal Systems. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2025;6:86-105. (In Russ.). <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-798-6-86-105>. EDN: CWRVYKX.
7. Primin O.G. Ensuring Reliable and Environmentally Safe Operation of Pressure Sewers. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2013;11:59-64. (In Russ.). EDN: RESFXR.
8. Primin O.G. *Reliability of Water Supply and Sanitation Systems*. Moscow: Publishing House of MISI-MGSU, 2021. 68 p. (In Russ.).
9. Chupin R.V., Moroz M.V., Bober V.A. Substantiation of the Diameters of Pipelines of Water Supply and Wastewater Disposal Systems Based On Minimizing the Costs of Their Life Cycle. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2022;4:52-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.35776/VST.2022.04.07>. EDN: CIOYJH.
10. Bober V.A., Chupin R.V., Skibo D.V., Dudarev V.I. Improving Reliability of a Sewer System Through Accumulating Capacity of Gravity-Flow Sewers. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(2):213-226. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-213-226>. EDN: PCWTRI.
11. Chupin R.V., Yarygin R.N., Bober V.A. Increasing the Reliability of Drainage Systems Through the Use of the Accumulating Capacity of Gravity Collectors. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024;4:137-152. (In Russ.). <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-784-4-137-152>. EDN: FWKFKFA.
12. Chupin V.R., Bober V.A. Optimization of Structure and Parameters of Pressure-Free Flow Pipeline Systems. *Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex*. 2023;12:65-69. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-12\(605\)-65-69](https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-12(605)-65-69). EDN: KELZRE.

Информация об авторах

Чупин Виктор Романович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой городского строительства и хозяйства, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия, ✉e-mail: chupinvr@istu.edu <https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>
Author ID: 475565

Information about the authors

Victor R. Chupin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Urban Construction and Economy, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia, ✉e-mail: chupinvr@istu.edu <https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>
Author ID: 475565

Кульков Виктор Николаевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры инженерных коммуникаций
и систем жизнеобеспечения,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: kulkof.viktor@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3838-0777>
Author ID: 730720

Victor N. Kulkov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Engineering
Communications and Life Support Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: kulkof.viktor@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3838-0777>
Author ID: 730720

Ярыгин Роман Николаевич

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: yarygin.r@hydrig.ru

Roman N. Yarygin,

Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: yarygin.r@hydrig.ru

Чупин Роман Викторович,

д.т.н., профессор кафедры городского
строительства и хозяйства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: ch-r-v@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6163-909x>
Author ID: 504512

Roman V. Chupin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
of Urban Construction and Economy,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: ch-r-v@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6163-909x>
Author ID: 504512

Лавыгина Ольга Леонидовна,

к.т.н., доцент, доцент кафедры
городского строительства и хозяйства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
*e-mail: olgakot81@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9558-5018>
Author ID: 689382

Olga L. Lavygina,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Urban Construction and Economy,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
*e-mail: olgakot81@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9558-5018>
Author ID: 689382

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and
approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 05.05.2025.
Одобрена после рецензирования 26.05.2025.
Принята к публикации 27.05.2025.

Information about the article

The article was submitted 05.05.2025.
Approved after reviewing 26.05.2025.
Accepted for publication 27.05.2025.

**Сохранение, формирование и создание новой архитектурной идентичности в исторических сельских поселениях****Н.М. Глебова¹✉, М. Кламер²**¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия²Венский технический университет, Вена, Австрия

Аннотация. Сельские поселения с историческим наследием, расположенные вблизи мегаполисов, становятся привлекательными для городских жителей. Процесс рурализации, обратный урбанизации, способствует появлению новых функций. Деградирующая архитектурная среда требует ревитализации и интеграции современных объектов внутри единой художественно-эстетической концепции, в согласии с ландшафтом, сохранением аутентичности и идентичности, и с достижением градостроительного ансамбля. Анализ обновленных поселений позволяет выявить принципы проектирования и интеграции новшеств в исторический контекст. Представлены результаты многолетних полевых наблюдений и исследований сельских территорий различных стран, теоретического осмысления процессов дезурбанизации и трансформации современной деревни с акцентом на сохранение и укрепление архитектурной идентичности. В рамках реальных заказов от администрации сельских поселений Байкальского региона студенты Иркутского национального исследовательского технического университета разрабатывают проекты с целью выявления специфики архитектурной среды и интерпретации традиционных форм, создавая современные объекты, обладающие местной архитектурной идентичностью. В результате исследования были выявлены две ключевые составляющие успешного диалога между современным и историческим: систематизация типологии традиционного жилья, формирующего однородную градостроительную ткань, его современная интерпретация усиливают местную идентичность, акцент на уникальные исторические здания и создание новых архитектурных доминант служат ориентирами и символами места. Предложены некоторые методы проектирования современных архитектурных объектов на основе местных исторических зданий.

Ключевые слова: архитектурная идентичность, историческое сельское поселение, однородная градостроительная ткань, архитектурная доминанта, композиционный центр поселения, ревитализация

Для цитирования: Глебова Н.М., Кламер М. Сохранение, формирование и создание новой архитектурной идентичности в исторических сельских поселениях // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 560-574. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-560-574>. EDN: CKSTEC.

Original article**Preservation, formation and creation of a new architectural identity in historical rural settlements****Natalia M. Glebova¹✉, Michael Klammer²**¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia²Vienna Technical University, Vienna, Austria

Abstract. Rural settlements with historical heritage located near megacities are becoming attractive to urban residents. The process of ruralization, the reverse of urbanization, contributes to the emergence of new functions. The deteriorating architectural environment requires the revitalization and integration of modern objects within a single artistic and aesthetic concept, in accordance with the landscape, the

preservation of authenticity and identity, and the achievement of an urban ensemble. The analysis of the renovated settlements makes it possible to identify the principles of design and integration of innovations into the historical context. The results of many years of field observations and studies of rural areas in various countries, theoretical understanding of the processes of deurbanization and transformation of the modern village with an emphasis on the preservation and strengthening of architectural identity are presented. As part of actual orders from the administration of rural settlements in the Baikal region, students of Irkutsk National Research Technical University are developing projects to identify the specifics of the architectural environment and interpret traditional forms, creating modern objects with a local architectural identity. As a result of the research, two key components of a successful dialogue between modern and historical were identified: the systematization of the typology of traditional housing, which forms a homogeneous, homogeneous urban fabric, its modern interpretation enhances local identity, the emphasis on unique historical buildings and the creation of new architectural dominants serve as landmarks and symbols of the place. Some methods of designing modern architectural objects based on local historical buildings are proposed.

Keywords: architectural identity, historical rural settlement, homogeneous urban fabric, architectural dominant, compositional center of the settlement, revitalization

For citation: Glebova N.M., Klammer M. Preservation, formation and creation of a new architectural identity in historical rural settlements. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):560-574. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-560-574>. EDN: CKSTEC.

ВВЕДЕНИЕ

Живые развивающиеся сельские поселения с историческим прошлым, расположенные вблизи мегаполисов, ввиду информационных возможностей, развитой инфраструктуры и дорожно-транспортной сети, становятся интересны в качестве жилья для работающих в городе. У деревенских жителей с началом пост-индустриальной эпохи и в связи с техническим прогрессом появляется свободное время на досуг. Теперь, кроме основной занятости сельским хозяйством или каким-то другим специфичным для конкретного поселения родом деятельности (рыбалка, охота, деревопереработка, добыча соли и др.), появляются новые формы активности. Жизнь городских и деревенских жителей все больше посвящена отдыху: дача, дом для летнего проживания, сельский туризм, горнолыжный, конькобежный, велосипедный спорт, походы по пересеченной местности, альпинизм, плавание в открытых водоемах и пляжи, культура СПА, гастрономия и знакомство с историей и культурой родного края и других стран. Все это было незнакомо людям в доиндустриальное время. Голландский архитектор и урбанист, профессор Рем Колхас в 2019 г. в музее Гуггенхайма на Манхэттене организовал выставку на тему «Сельский ландшафт: будущее». Ему помогали около 180 человек: студенты и профессора из университетов США, Голландии, Китая, Кении и Японии. Выставка указывает на новые акценты, которым раньше не уделяли, по его мнению, должного внимания. Весь XX в. повсеместно заявлялось, что наше будущее в

городе и именно его благоустройству должен служить современный архитектор. Выставка «Сельский ландшафт: будущее» полностью была посвящена деревне и опасностям, которые ей угрожают. Подробнейшее исследование Рема Колхаса о трансформации деревни указывает на многие проблемы, в том числе на ее стихийное развитие без участия архитекторов и градостроителей [1]. Сельские, отдаленные и дикие территории, которые называются сельской местностью, или 98 % поверхности Земли, не занятые городами, составляют линию фронта, где разыгрываются сегодня самые мощные силы – климат и экологическое опустошение, миграция, технологии, рост и убыль населения. Эти места меняются до неузнаваемости. На этих территориях происходят различные эксперименты, такие как испытательный полигон около г. Фукусимы с роботами, которые будут обслуживать инфраструктуру и сельское хозяйство Японии, тепличный город в Нидерландах, который может быть источником космологии сегодняшней сельской местности, китайские деревни, превращенные в многофункциональные фабрики и магазины электронной коммерции [2]. К ним также можно отнести изменения природного характера – быстро тающую вечную мерзлоту Центральной Сибири, и демографического – беженцев, заселяющие умирающие деревни в немецкой глубинке. Тема экологического загрязнения, в том числе визуального, в виде стихийно возникающих новых построек вне регламентированных ограничений в традиционных исторических архитектурных ландшафтах с 2010 г.

затрагивается на регулярных международных научно-практических конференциях в Иркутском национальном техническом университете (ИРНИТУ) под названием «Градостроительное развитие поселений на побережье озера Байкал» [3]. Кроме того, в рамках государственной программы Российской Федерации «Комплексное развитие сельских территорий», с 2019 г. в курсовом и дипломном проектировании обсуждаются вопросы, выпускаются проекты и доклады студентов по таким темам, как сельский туризм, туризм на берегах Байкала, возрождение деревень и борьба с их деградацией и уничтожением за счет развития культуры и архитектуры, создание этнических парков и новых производств и др [4]. Представляются доклады и проекты зарубежных коллег из Монголии, Германии, Австрии и Китая [5]. Высказываются различные мнения, касающиеся вопросов сохранения и преумножения местной архитектурной идентичности. Их можно разделить на три основополагающих направления градостроительного развития исторических поселений:

1. Большая часть природных ландшафтов без исторической застройки должна быть неприкосновенна как заповедная зона или ограничена законодательно в новом строительстве.

2. В рамках разработанных регламентов, существующие поселения должны сохранять и приумножать исторически сложившуюся местную архитектурную идентичность.

3. Внутри существующих поселений с течением времени и с появлением новых технологий и функций должна появляться новая инфраструктура, а с ней современные формы архитектурной идентичности, тем самым запуская импульс развития. Целенаправленная работа с сохранением и реставрацией наследия в мире ведется уже более 100 лет.

Одним из первых широко известных музеев под открытым небом является Skansen, основанный в 1891 г. на о. Юргорден в г. Стокгольме (Швеция). Но как должны выглядеть новые объекты в историческом поселении, чтобы создавать с ними единый ансамбль, не нарушая традиционное, а дополняя и приумножая новыми архитектурными объектами и символами? Они должны отвечать современным требованиям и напоминать местную традиционную архитектуру, что можно назвать формированием местной идентичности.

Английский архитектор Роберт Адам, подытоживший на Всемирном архитектурном конгрессе в своей статье темы идентичности и идентификации, объединяет термины идентификация людей с местами их проживания и идентичность места.

Однако, свидетельствует о их разном значении: идентификация себя с местом обеспечивает человеку ощущение дома, а идентичность места – *Genius Loci* – создает символическое отличие от других мест. И то и другое сводится к определению идентификационных свойств (или кодов) архитектурной среды, характерных признаков, определенных метрических параметров и их комбинаций, большей частью сложившихся в ходе истории и строительных традиций, по которым можно узнать те или иные места и отличить их от других. Такими кодами, или символами идентичности, являются природные формы ландшафта со своими географическими параметрами в комбинации с объектами архитектурной среды. Это могут быть как архитектурные детали, так и целые архитектурные кластеры, которые образуют однородную градостроительную ткань, в рамках которой должно быть достигнуто многообразие, т. е. жилые дома не должны быть абсолютно одинаковыми, что происходит порой в современных поселках. Но «...идентификация – это не что-нибудь застывшее, это, скорее, то, что изменяется во времени» [6]. Появляются новые функции и технологии, меняется общество, следовательно, и архитектурная среда. История и современность, наслаиваясь друг на друга, создают новые формы и комбинации, при этом напоминая местное и традиционное [7]. Таким образом, жилая застройка воспринимается местными жителями как свой дом, где они идентифицируют себя с местами их проживания, а архитектурные доминанты, часто общественные здания, уникальные, и также имеющие свои местные символические признаки, становятся узнаваемыми элементами, ориентирами и значимыми акцентами поселения (рис. 1).

МЕТОДЫ

В рамках понятия архитектурная идентичность рассмотрим эти два основополагающих характерных архитектурных морфотипа деревни:

1. Жилая одно- или двухэтажная типовая рядовая, усадебная (традиционно сложившаяся) застройка с хозяйственными постройками.

2. Крупные общественные здания и комплексы зданий с общественным пространством.

Первый морфотип исторического поселения

Жилая одно- или двухэтажная типовая рядовая, усадебная (традиционно сложившаяся) застройка с хозяйственными постройками складывается в жилые кластеры и создает однородную градостроительную ткань.

Деревни с такой исторической архитектурной средой, сохранившейся совершенно случайно ввиду бедности и тотальной занятости крестьян сельским хозяйством, а также из-за

ряда других факторов, повлиявших на их сохранность, стали настоящими музеями, привлекающая интересующихся историей и самобытной культурой туристов.



Рис. 1. Поселок Тельма (Усольский район, Иркутская область) и его архитектурная доминанта Казанская церковь на фоне гомогенной жилой застройки
Fig. 1. The village of Telma (Usolsky district, Irkutsk region) and its architectural dominant, the Kazan Church, against the backdrop of homogeneous residential development

Эта жилая застройка заполняет пространственно-планировочную систему поселения в соответствии с ландшафтной структурой и состоит из гармонично сочетающихся между собой отдельных домов, которые собираются в композицию – усадебный комплекс из жилых и подсобных зданий (рис. 2) [8]. Эта своеобразная народная архитектура образовывалась на протяжении веков в ходе исторических экспериментов с конструкциями и материалами, которые соответствовали местными географическими и культурными особенностями, и в итоге стала традиционной для конкретной местности. Поэтому заметны серьезные отличия в разных поселениях (рис. 3). В каком-то одном поселении схожие материалы, размеры, формы, масштаб и пропорции отдельных построек позволяют им целостно объединяться друг с другом в единую гомогенную структуру. Следует отметить, что дома неодинаковые, есть сотни вариаций построек. В качестве иллюстраций можно обратить внимание на описания усадеб в Австрии из книги Виктора

Герберта Пёттлера – фольклориста, профессора университета и основателя Штюбинга – музея под открытым небом в Штирии, Австрия [11].

Такой морфотип есть в любых исторических поселениях по всему миру – мусульманские махалли, китайские хутуны, швейцарские и французские горные поселения с характерными шале, итальянские поселения-комунны на крутых горных склонах с лимонными теплицами, портовые средиземноморские комунны. Стоит отметить, что средиземноморские комунны можно отнести к современным и престижным курортам, но изначально построены они были по образу и подобию типичных рыбацких итальянских деревень.

Такой морфотип также встречается в голландских рыбацких и мукомольных провинциях, плавучих вьетнамских, тайских, камбоджийских деревнях и сибирских деревнях со всеми деревянными постройками, имитирующих каменные классические сооружения (рис. 4).

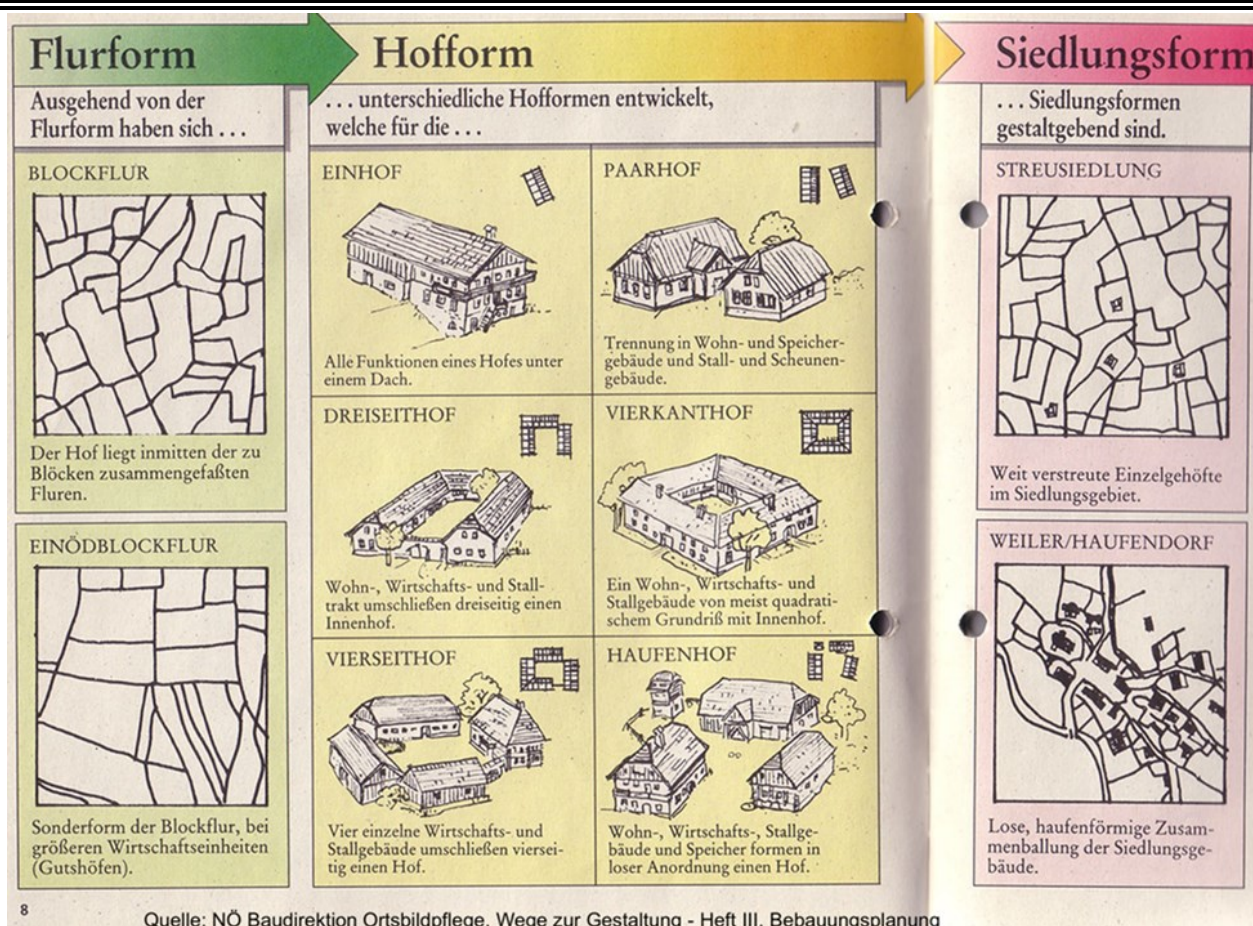


Рис. 2. Некоторые типы исторических жилых усадеб, нарезки земельных участков и конфигураций поселений в Австрии [8, 9]
Fig. 2. Some types of historical residential estates, plot layouts and settlement configurations in Austria [8, 9]



Рис. 3. Различия между типовой жилой сельской застройкой разных мест:
a – типичные жилые усадьбы XIX – XX в., д. Бугульдейка (Ольхонский район, Иркутская область);
b – типичные жилые дома голландской рыбацкой и мукомольной провинции Заансе Сханс XVII – XX в. (Нидерланды)
Fig. 3. Differences between typical rural residential buildings in different places:
a – typical residential estates of the XIX – XX century, Buguldeika village (Olkhon district, Irkutsk region);
b – typical residential buildings of the Dutch fishing and milling province of Zaanse Schans XVII – XX century (Netherlands)



Рис. 4. Гомогенная градостроительная ткань жилой застройки разных исторических поселений: а – мусульманская махалля; б – г. Хальштатт (Австрия); с – средневековые теплицы для лимонных рощ над жилыми домами у о. Гарда (Италия)
Fig. 4. Homogeneous urban fabric of residential buildings in different historical settlements: а – Muslim mahalla; б – Hallstatt (Austria); с – medieval greenhouses for lemon groves above residential buildings near Lake Garda (Italy)

Все они имеют сложившиеся, в соответствии с географическими, культурными и административно-экономическими особенностями, традиционные характерные признаки архитектурной среды:

- композиция жилой усадьбы;
- пропорции и масштаб жилых и хозяйственных построек;
- архитектура фасадов;
- конфигурация крыш;
- материалы и колористический код;
- архитектурные детали.

Эти признаки определяют их схожесть между собой и отличие от поселений других мест. Это делает их узнаваемыми и подчеркивает принадлежность к определенному месту. Понимание и типология этих признаков позволит создать современные архитектурные объекты по последним строительным технологиям из новых материалов, в соответствии с современными критериями и требованиями к комфортности, с новыми жилыми функциями, что позволит гармонично интегрировать их в историческую среду в общем градостроительном ансамбле. Важно не просто законсервировать и повторять или уподобиться архитектуре прошлого – необходимо уметь интерпретировать и стилизовать. Сейчас многие поселения – престижные места отдыха: горнолыжные курорты, морские ривьеры, туристические бухты. Акцент на отдых связан со сменой индустриальной эпохи постиндустриальной. С середины XX в. в США, в центральной Европе, а затем и по всему миру началось переоборудование заводских

производственных зданий в разнофункциональные – так появился стиль лофт в архитектуре. Барнхаус – продолжение этого явления, целая философия творческой интерпретации сельских жилых и нежилых построек усадьбы и переоборудование их в современные архитектурные объекты [12]. Например, на основе структуры теплиц итальянские архитекторы создают современные здания из стекла, дерева и бетона, методика проектирования которых описана в отчете Зигенского университета в Германии [13]. Альпийские шале превращаются в комфортабельные гостиницы с большим количеством этажей, нежели изначально, а бывшие бани, при замене отдельных стен на высокотехнологичное стекло с панорамным видом, становятся салонами класса люкс, а бывшие амбары с высокими крышами переоборудываются в шикарные рестораны. Очень интересный пример реновации исторического кластера – проект Bubble Mania. Это футуристичное дополнение к историческим постройкам, пекинским хутунам, в виде хромированных «пузырей». Проект экспонировался на Венецианской биеннале и уже реализован.

Интересны современные постройки в исторических деревнях на о. Вайсензее. Вместе они создают единый гармоничный ансамбль за счет использования похожих материалов и цветосочетаний, подобных форм и уклонов крыш, пропорций домов, соотношений плоскости стен к оконным проемам (рис. 5). На территории России также уже немало таких примеров [14].



Рис. 5. Жилые и хозяйственные усадебные постройки XVIII – XIX в. в непосредственной близости с современными домами. Фото Глебовой Н.М., 2024 г.

Fig. 5. Residential and farm buildings of the XVIII – XIX centuries in close proximity to modern houses. Photo by N.M. Glebova, 2024

В проектировании новых объектов важно учитывать специфические местные особенности, критерии и признаки архитектурной местной идентичности.

Необходимо популяризировать эту тему среди населения, чтобы продолжить народную архитектуру в современном строительстве и в реконструкции. В качестве иллюстраций можно изучить регулярные издания в Австрии, где публикуются успешные примеры реновации исторических зданий [12]. Кроме того, важную задачу развития поселений и формирование

их идентичностей выполняет менеджмент и маркетинг. В сотрудничестве с архитекторами и дизайнерами разрабатывается брендинг территорий – процесс формирования положительного образа отдельного субъекта, который опирается на социокультурное, экономическое, эстетическое и политическое развитие.

За этим определением кроется простая идея. Нужно уловить самую суть места, выявить его специфику и затем рассказать об этом языком брендинга, дизайна и архитектуры (рис. 6).



a

b

Рис. 6. Поселок Хужир (Ольхонский район, Иркутская область): – жилая застройка середины XX в. вместе с домами 90-х гг. постройки; b – символические бурятские столбы сэргэ
Fig.6. The village of Khuzhir (Olkhon district, Irkutsk region): – residential buildings in the middle of the XX century together with houses built in the 90s; b – symbolic Buryat pillars of the serge

Автор предполагает, что разноцветные крыши и заборы, выполненные собственниками при отсутствии разрешенного архитектурного административного регламента в эпоху перестройки, могли подсознательно ассоциироваться с местными традициями повязывать цветные ленты.

Второй морфотип исторического поселения

Крупные общественные здания и комплексы зданий с общественным пространством. Очень важную роль для любого поселения играют уникальные здания, которые порой становятся символами населенного пункта. Они являются градостроительными и архитектурными доминантами, часто вертикальными, выдающимися по высоте и масштабу, ориентирами местности. Исторически так сложилось, что в большинстве случаев это сакральные сооружения – церкви [15]. Хотя ими могут быть и производственные (индустриальные) объекты архитектуры (небольшие ГЭС или старые предприятия), и другие нежилые крупные

здания. В советский период, в деревнях, место разрушенных церквей занимали сельские клубы и дома культуры, которые становились также композиционными и общественными центрами поселений. Сейчас же на их места вновь возвращаются церкви.

Историческое культовое здание несет в себе много смыслов, память и дух места, значимые культурные коды и харизму поселения, со временем превращаясь в символ места. Не только историческая, но и современная церковь может стать интересной доминантой и символом нового времени поселения. Как, например, церковь Мартина Лютера, спроектированная архитектурным бюро Соор Himmelb(l)au, в г. Хайнбург-ан-дер-Донау в Австрии. Интересно, как архитекторы создали необычный современный объект, опираясь на исторические прототипы. Формообразование купола церкви строится на геометрическом анализе старинной церковной пристройки для захоронения костей из погребений, называемой карной (рис. 7).



Рис. 7. Церковь Мартина Лютера (2008–2011 гг.) рядом с карной XIII в. в г. Хайнбург-ан-дер-Донау (Австрия)

Fig. 7. Martin Luther Church (2008–2011) next to the 13th century Karner in the town of Hainburg an der Danue (Austria)

Или, например, современный концертный зал им. Ференца Листа, построенный в г. Райдинг, в федеральной земле Бургенланд, Австрия. Он расположен рядом с домом, где родился пианист. Зал стал центром притяжения населения и интересным объектом для любителей музыки со всего мира. Геометрический анализ старинного дома, пропорционирование и построение в формообразовании современного здания концертного зала, применение подобных материалов и грамотное цветовое решение объединяют старые традиционные постройки и современную архитектуру в единый ансамбль, создавая из современного архитектурного объекта новый символ идентичности исторического поселения и новую доминанту.

Производственная (индустриальная) архитектура является очень ценным архитектурным наследием наряду с культовыми сооружениями. Ее переосмысление в новом современном прочтении и с наполнением требуемыми функциями становится центрами туристической привлекательности. Например, туристический комплекс «Порт-Ольхон» на о. Ольхон. Весь участок заброшенного рыбзавода из свалки превратился в музей, место отдыха и развлекательно-выставочное пространство. Теперь здесь расположены отели, банный комплекс, ресторан сибирской кухни и причал для судов и яхт. Все это благодаря слаженной работе хозяина участка и архитекторов. Композиционной доминантой этого комплекса является шатер (пространство для конференций), контрастирующий по стилю, форме, цветовому решению со всей остальной застройкой. В качестве эксперимента студентами, обучающимися на специальности дизайн архитектурной среды, были предложены варианты современного ориентира, например, в качестве маяка.

Мельницы – еще один пример бывших индустриальных сооружений, реконструкция и восстановление которых послужили мощным импульсом к развитию поселений и усилению местной архитектурной идентичности в провинции Нидерландов, в районе р. Зан.

Во время Золотого века здесь был центр важного мукомольного региона, который сыграл одну из ведущих ролей во время первой промышленной революции. С начала XVII в. тысячи ветряных мельниц пилили древесину из Скандинавии, Прибалтики и Германии – для судостроения и производства бумаги. Здесь учился кораблестроению российский царь Петр I. После 1850 г. энергия ветра стала постепенно вытесняться энергией пара и старое производство, а с ним и поселения, ветшали. Ассоциация De Zaanse Molen, основанная в 1925 г. заандамским учителем, художником и

энтузиастом мельниц Франсом Марсом, стояла за реконструкцию мельниц. Художник хотел сохранить старые ветряные мельницы в качестве памятников, которые имеют определяющий характер для региона. В результате в Заансе-Сханс в период с 1961 по 1974 г. были перевезены и отреставрированы старые здания из региона, переоборудованные в рестораны или гостиницы, с сохранением их оригинальной структуры и добавлением современных удобств. Некоторые были восстановлены и выполняют ту же функцию, что и много веков назад. Теперь эти населенные пункты являются аттрактивом для миллионов туристов, продолжая оставаться живыми и развивающимися (Заандам, Эдам-Волендам, Киндердейк, агломерация Рандстад).

Зернохранилища, мельницы и элеваторы на территории России также могли бы стать архитектурными (градостроительными) доминантами, маркерами местности, символами архитектурной идентичности поселений, основным занятием жителей которых являлось выращивание хлеба. Наполненные новыми интересными функциями и модернизированные, они могли бы удивлять многих туристов, вызывая любопытство и интерес к местной истории и культуре, а также дать новый импульс развития селам. «Водяные и ветряные мельницы, являясь уникальными памятниками деревянного зодчества, играют важную роль в русской материальной культуре и истории архитектуры. Однако большинство мельниц находится на отдаленных территориях страны, которые часто игнорируются органами власти, туристами и даже специалистами. Очень жаль, что им не придают такого значения как древним каменным храмам, крепостям и шедеврам великих архитекторов, которые получили всемирное признание» (рис. 8) [16]. Хлебопашество в Сибири, развивающееся с XVI–XVII вв., когда русские переселенцы начали осваивать новые земли, было сложным из-за сурового климата, часто зависело от традиций и знаний местных жителей, от методов, используемых переселенцами. Мельницы и зернохранилища в Сибири другие, нежели в Голландии или где-нибудь еще. Они могут варьироваться от простых деревянных конструкций до более сложных каменных строений. Многие из них имеют характерный стиль, отражающий местные традиции и материалы. Историческая архитектура мельниц и зернохранилищ ценна не только как примеры инженерного искусства, но и как элементы культурного наследия. Они служат свидетельством сельскохозяйственной практики, экономики и образа жизни людей в разные исторические эпохи.



a

b

Рис. 8. Историческая индустриальная архитектура как доминанта поселения:
a – мельницы в Заансе Сханс (Нидерланды); b – заброшенное зернохранилище
в с. Спас-Заулок в (Клинский район, Московская область)

Fig. 8. Historical industrial architecture as a dominant feature of the settlement:
a – Mills in Zaanse Schans (Netherlands); b – Abandoned grain storage in Spas-Zaulok village
(Klinsky district, Moscow region)

Крупные старые кирпичные здания зернохранилищ Германии, например, в г. Гамбурге, были преобразованы в культурные центры и жилые пространства – комплекс Speicherstadt, который стал объектом всемирного наследия ЮНЕСКО, и сейчас включает в себя множество музеев и коммерческих объектов. В некоторых частях Великобритании старые мельницы были переоборудованы в жилые угодья или гостиницы, при этом архитекторы сохранили характерные черты, такие как крылья и механизмы мельницы.

В крупных городах США, таких как Чикаго и Милуоки, старые зернохранилища были перестроены в жилые комплексы или офисные здания, с сохранением элементов индустриального дизайна [17–19].

Некоторые мельницы и зернохранилища в России сейчас находятся под охраной как объекты культурного наследия. Ими интересуются как исследователи, так и туристы. Это важно для сохранения памяти о региональной культуре хлебопашества в Сибири, которое имеет глубокие исторические корни, и для дальнейшего формирования архитектурной идентичности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для возрождения умирающих русских сибирских деревень необходимо запустить новый импульс развития. Это достигается путем удовлетворения потребностей потенциальных жителей. Не последнюю роль здесь играет идентичность места, в состав которой входит и архитектурная идентичность. Она достигается

путем сохранения и приумножения местных исторических культурных кодов. Но только лишь сохранения архитектурного наследия в первоначальном виде недостаточно, т.к. явление идентичности всегда сопряжено с понятиями время и эпоха.

Необходима современная модернизация и интерпретация исторических объектов, создание новых символов архитектурной идентичности – отражений современной эпохи, в которых будет угадываться местные традиционные архитектурные признаки.

В результате данного исследования были выявлены две ключевые составляющие успешного диалога между современным и историческим:

1. Систематизация типологии традиционного жилья, формирующего гомогенную градостроительную ткань, и его современная интерпретация усиливают местную идентичность через узнаваемые традиционные элементы.

2. Акценты в виде уникальных исторических зданий, создание новых архитектурных и композиционных доминант служат ориентирами и символами места, дополнительно усиливая местную идентичность.

Традиционное сельское жилье – первый морфотип поселения – жилые усадьбы, образующие целые жилые кластеры, дома внутри них похожи, но и разнообразны.

Уникальные здания, как правило, общественные – второй морфотип – культовые или производственные здания и комплексы, более масштабные по сравнению с жильем.

Вариации стилизации и современной интерпретации исторически сложившихся традиционных архитектурных форм очень многообразны и являются творческим продуктом архитектора, что показывает практическая архитектурная деятельность, в частности работа со студентами (рис. 9).

Существуют определенные методы, перечисленные в таблице (рис. 10), применяя которые в реконструкции и проектировании новых объектов, можно достичь цели сохранения и дальнейшего формирования местной идентичности.

При этом важно понимать идентификационные критерии типичных местных построек, такие как:

- пропорции и масштаб;
- материалы и колористический код;

– традиционные формы и углы наклона крыш;

– архитектура фасадов;

– архитектурные детали.

Что касается уникальных сооружений, са크ральных, производственных и других общественных зданий, являющихся символами и характерными сооружениями конкретного места и эпохи, а также градостроительными доминантами и акцентами поселений, важно опираться также на существующие исторические здания и на перечисленные критерии. При создании зданий с совершенно новыми функциями, которых не было в прошлом, можно искать новые формы, символы, материалы и технологии, контрастные по отношению к фоновой однородной застройке, но в соответствии с методами, представленными в таблице.



Рис. 9. Эскизные проекты студентов-архитекторов Иркутского национального исследовательского технического университета на тему «Анализ, сохранение и формирование новой архитектурной идентичности деревень» под руководством Глебовой Н.М., 2024

Fig. 9. Projects of Irkutsk National Research Technical University architecture students on the topic "Analysis, preservation and formation of a new architectural identity of villages" under the supervision of N.M. Glebova, 2024









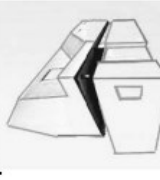

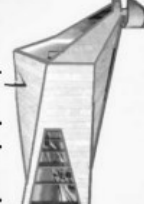





Метод	Описание	Примеры	Метод	Описание	Примеры
1. Копия 	Ремонт. Сохранение конструкций и материалов или воссоздание первоначального вида постройки с дополнением функций и благоустройства. Возможен вариант изменения первоначального цветового решения объекта		5. Рост 	Изменение первоначального традиционного размера, масштаба, с сохранением некоторых узнаваемых традиционных пропорций. Рост может быть как в высоту, так и в длину, ширину, и пропорционально во всех направлениях	
2. Гомогенизация 	Минимизация, отказ от деталей, обобщение и слияние отдельных стен и крыши в одном цвете и материале		6. Комбинаторика 	Композирование. Разрезка. Достройка к традиционному объему современных или объемов в разных масштабах, поворотах, компоновках, количествах, размерах. При этом какие-то традиционные формы, материалы, пропорции сохраняются и угадываются	
3. Трансформация крыши 	Используется второй метод, но появляются нетрадиционные дополнения: переломы крыши с сохранением традиционных пропорций и углов наклона		7. Полная трансформация 	Полная трансформация с сохранением отдельных узнаваемых традиционных элементов, пропорций, материалов, форм	
4. Замена элементов 	В традиционной форме и пропорциях замена глухих стен или крыши стеклянными, замена цвета или материала каким-то нетипичным, экстравагантным. Замена традиционных окон другими, новых форм, размеров, замена композиции окон на фасаде		8. Комбинация методов 	Все перечисленные методы могут применяться как в отдельности, так и в любой комбинации друг с другом. При этом узнаваемость сельского, типичного для конкретного места, строения или группы строений (усадьба, улица) должна хотя бы немного сохраняться	

Рис. 10. Методы для проектирования современных объектов на основе местных исторических. Составлена на основе отечественного и зарубежного опыта. Автор Глебова Н.М., 2025
 Fig. 10. Methods for designing modern objects based on local historical ones. Compiled on the basis of domestic and foreign experience. Author N.M. Glebova, 2025

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Историческая архитектура представляет собой ценное наследие, которое не только иллюстрирует традиции поселения, но и служит важным элементом идентичности и истории региона. Сохранение этих объектов важно для будущих поколений и может способствовать развитию самих поселений, туризма и просвещению о местной культуре и истории [17–20]. Необходимо учитывать и удовлетворять новые потребности современного населения, отражая их в архитектурной среде, интегрируя современные архитектурные объекты в историческую застройку с достижением градостроительного ансамбля.

Это решается путем анализа двух характерных морфотипов застройки, их архитектурных особенностей, сложившихся исторически ввиду географических, культурологических и

экономических факторов, на основе которых необходимо создавать новые объекты.

Использование исторических зданий как основы для создания современных архитектурных объектов – интересная современная тенденция в архитектуре и градостроительстве. Она не только помогает сохранить культурное наследие, но и предоставляет новые возможности для использования старых зданий в современном контексте, а также для интерпретации и полной трансформации старых зданий, но с сохранением узнаваемых элементов.

Созданные уникальные объекты и пространства, вполне футуристичные, но при этом напоминающие что-то традиционное, укрепляют ощущение дома у местных жителей, вызывают интерес у молодого поколения, способствуя росту населения и развитию местных сообществ, и привлечению туристов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Koolhaas R. Countryside. A Report. Guggenheim: TASCHEN, 2020. 352 p.
2. Белоголовский В. Рем Колхас: взгляд в поля // Archi.ru. 2020. Режим доступа: <https://archi.ru/world/85648/arkhitektori-derevnya> (дата обращения: 22.05.2025).
3. Ляпин А.А., Гуляева К.О. Народное деревянное зодчество ольхонского побережья озера Байкал // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 1. С. 154–165. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-1-154-165>. EDN: HAUODI.
4. Макаревич М.Л., Ермолаева Е.В., Сцибаровская Е.О. Проблема возрождения забытых деревень на территории Российской Федерации // Национальные приоритеты России. 2023. № 3. С. 42–49. EDN: HQPDBJ.
5. Yu Pan, Xiaoyu Wang, Ryan Ch. Chinese Seniors Holidaying, Elderly Care, Rural Tourism and Rural Poverty Alleviation Programmes // Journal of Hospitality and Tourism Management. 2021. Vol. 46. P.134–143. <https://doi.org/10.1016/j.jhtm.2020.09.010>. EDN: RYJWNU.
6. Глебова Н.М. Формирование архитектурной идентичности городской среды Иркутска. Монография. Иркутск: Изд-во Иркутского национального технического университета, 2021. 86 с.
7. Глебова Н.М. Историзм, ревайвализм и эклектика как предвестники модернизма в сакральной архитектуре Вены // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 1. С. 119–132. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-119-132>. EDN: BDSADD.
8. Linzer H. Raumplanungsstudium mit Praxisnähe // Forster J., Hohenkamp L., Semlitsch E. Örtliche Raumplanung TU Wien: 50 Jahre IFOER. Wien: Forschungsbereich Örtliche Raumplanung, Institut für Raumplanung, Technische Universität Wien, 2024. S. 46–47. <https://doi.org/10.34726/8184>.
9. Linzer H. Auswirkungen des Nahversorgungsgrades auf die Ortskernstärkung // SIR-Mitteilungen Und Berichte. 2019. Vol. 37. P. 53–58.
10. Spielhofer H. Alten Bauernhäusern leben! Sanierungs und Umbaubeispiele. Graz: Leopold Stocker Verlag, 1980. 185 s.
11. Pottler V.H. Erlebte Baukultur (Architektur Bauernhaus Österreich Freilichtmuseum). Österreich: Selbstverlag Österr Freilichtmuseum, 1988. 356 s.
12. Mikl-Leitner J., Pernkopf S. GESTALTE(N). Das Magazin für Bauen, Architektur und Gestaltung. St. Pölten: Niederösterreich GESTALTE(N), 2025. 53 s.
13. Wirtz S., Schütt S., Daniel J., Glaesner A. Rückschau Wintersemester 2016/2017 // BAUkonstruktion News. 2017. S. 1–28.
14. Черноусова Ю.В., Федоров А.Н. Проект музейно-этнографического комплекса как инструмент развития сельских территорий (на примере села Усалки Тюменской области) // Архитектура, строительство, транспорт. 2022. № 1. С. 6–24. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2022-1-6-24>. EDN: YVOAQA.
15. Глебова Н.М., Кламер М. Современный храм в структуре города как символ культурной идентичности и общественное пространство // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 2. С. 256–275. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-2-256-275>. EDN: DHDYVG.

16. Яндовская А.В. Деревянные мельницы как объекты архитектурного достояния России: история, распространение, типология и реставрация // Вестник национального исследовательского института культурного наследия. 2024. № 1. С. 126–153.
17. Бочкарева Н.А., Калошина Л.Л. Анализ современного опыта реставрации, реконструкции и приспособления зерновых элеваторов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 78–90. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2022-7-7-78-90>. EDN: FRPDMM.
18. Uyumaz F.E., Soyluk A. Adaptive Reuse of Silo Buildings as Residential Buildings // Gazi University Journal of Science Part B: Art Humanities Design and Planning. 2023. Vol. 11. Iss. 2. P. 321–336.
19. Цепилова О.П. Анализ опыта повторной адаптации промышленной архитектуры // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 12. С. 74–90. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-12-74-90>. EDN: DLGOMM.
20. Тяшин Л., Панков С.В. Особенности реализации стратегии развития туризма для борьбы с бедностью в Китае // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2022. Т. 8. № 2. С. 122–133. EDN: HUPIUM.

REFERENCES

1. Koolhaas R. *Countryside. A Report*. Guggenheim: TASCHEN, 2020. 352 p.
2. Belogolovskii V. Rem Koolhaas: A Look into the Fields. *Archi.ru*. 2020. Available from: <https://archi.ru/world/85648/arkhitektor-i-derevnya> [Accessed 22 May 2025]. (In Russ.).
3. Lyapin A.A., Gulyaeva K.O. Folk Wooden Architecture of the Olkhon Coast Of Lake Baikal. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(1):154-165. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-1-154-165>. EDN: HAUODI.
4. Makarevich M.L., Ermolaeva E.V., Stsibarovskaya E.O. The Problem of Revival of Forgotten Villages within the Russian Federation. *Natsional'nye prioritety Rossii*. 2023;3:42-49. (In Russ.). EDN: HQPDBJ.
5. Yu Pan, Xiaoyu Wang, Ryan Ch. Chinese Seniors Holidaying, Elderly Care, Rural Tourism and Rural Poverty Alleviation Programmes. *Journal of Hospitality and Tourism Management*. 2021;46:134-143. <https://doi.org/10.1016/j.jhtm.2020.09.010>. EDN: RYJWNU.
6. Glebova N.M. *Formation of the Architectural Identity of the Urban Environment of Irkutsk. Monograph*. Irkutsk: Publishing House of the Irkutsk National Technical University, 2021. 86 p. (In Russ.).
7. Glebova N.M. Historicism, Revivalism, and Eclecticism as Precursors to Modernism in Sacred Viennese Architecture. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(1):119-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-119-132>. EDN: BDSADD.
8. Linzer H. Raumplanungsstudium mit Praxisnähe. In: Forster J., Hohenkamp L., Semlitsch E. *Örtliche Raumplanung TU Wien: 50 Jahre IFOER*. Wien: Forschungsbereich Örtliche Raumplanung, Institut für Raumplanung, Technische Universität Wien, 2024. P. 46-47. <https://doi.org/10.34726/8184>.
9. Linzer H. Auswirkungen des Nahversorgungsgrades auf die Ortskernstärkung. *SIR-Mitteilungen Und Berichte*. 2019;37:53–58.
10. Spielhofer H. *Alten Bauernhäusern leben! Sanierungs und Umbaubeispiele*. Graz: Leopold Stocker Verlag, 1980. 185 p.
11. Pottler V.H. *Erlebte Baukultur (Architektur Bauernhaus Österreich Freilichtmuseum)*. Österreich: Selbstverlag Österr Freilichtmuseum, 1988. 356 s.
12. Miki-Leitner J., Pernkopf S. *GESTALTE(N). Das Magazin für Bauen, Architektur und Gestaltung*. St. Pölten: Niederösterreich GESTALTE(N), 2025. 53 s.
13. Wirtz S., Schütt S., Daniel J., Glaesner A. *Rückschau Wintersemester 2016/2017*. BAUkonstruktion News. 2017:1-28.
14. Chernousova Ju.V., Fedorov A.N. The Project of Museum and Ethnographic Complex as a Tool for the Development of Rural Areas (Using the Example of the Village Usalka, Tyumen Region). *Architecture, Construction, Transport*. 2022;1:6-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2022-1-6-24>. EDN: YVOAQA.
15. Glebova N.M., Klamer M. Modern Temple in Urban Structure as a Symbol of Cultural Identity and Public Space. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(2):256-275. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-2-256-275>. EDN: DHDYVG.
16. Yandovskaya A.V. Wooden Mills as Objects of Architectural Heritage of Russia: History, Distribution, Typology and Restoration. *Bulletin of the National Research Institute for Cultural Heritage*. 2024;1:126-153. (In Russ.).
17. Bochkareva N.A., Kaloshina L.L. Analysis of Modern Experience of Restoration, Reconstruction and Adaptation of Grain Silos. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named after V.G. Shukhov*. 2022;7:78-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2022-7-7-78-90>. EDN: FRPDMM.

18. Uyumaz F.E., Soyluk A. Adaptive Reuse of Silo Buildings as Residential Buildings. *Gazi University Journal of Science Part B: Art Humanities Design and Planning*. 2023;11(2):321-336.
19. Tsepilova O.P. Analysis of the Experience of Re-Adaptation of Industrial Architecture. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named after. V.G. Shukhov*. 2020;12:74-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-12-74-90>. EDN: DLGOMM.
20. Tyashin Li., Pankov S.V. Features Of the Implementation of the Tourism Development Strategy to Fight Poverty in China. *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*. 2022;8(2):122-133. (In Russ.). EDN: HUPIUM.

Информация об авторах

Глебова Наталья Моисеевна,
доцент ВАК, профессор кафедры
архитектурного проектирования,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉e-mail: nita12@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8762-9711>
Author ID: 875760

Кламер Михаэль,
д.т.н., профессор департамента планирования
транспортных систем и пространственного
планирования,
Технический университет Вены,
1040, г. Вена, ул. Карлсгассе, 11, Австрия,
e-mail: michael.klamer@tuwien.ac.at

Information about the authors

Natalia M. Glebova,
Associate Professor of the Higher Attestation
Commission, Professor of the Department
of Architectural Design,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉e-mail: nita12@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8762-9711>
Author ID: 875760

Michael Klamer,
Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
of the Transportation Systems Planning
and Spatial Planning,
Technical University of Vienna,
11 Karlsgasse St., 1040, Vienna, Austria,
e-mail: michael.klamer@tuwien.ac.at

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 28.04.2025.
Одобрена после рецензирования 15.05.2025.
Принята к публикации 19.05.2025.

Information about the article

The article was submitted 28.04.2025.
Approved after reviewing 15.05.2025.
Accepted for publication 19.05.2025.

**Ландшафтная ревитализация природных территорий в структуре города****Э.И. Клайма¹, М.В. Золотарева²**^{1,2}Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Целью представленного исследования является разработка концепции ландшафтной ревитализации природных территорий, направленная на восстановление их экологического баланса, повышение биоразнообразия и создание устойчивой рекреационной инфраструктуры. Концептуальная модель выполняется применительно к ландшафтной ревитализации территории Суздальских озер в г. Санкт-Петербурге. Основными задачами в контексте поставленной цели являются: проведение экспертной оценки природно-экологической ситуации на рассматриваемой территории в соответствии с нормативной базой развития и сохранения экосистем, проведение комплексного градостроительного и ландшафтного анализа территории с целью выявления факторов, влияющих на экологическую устойчивость территории, определение принципов и приемов реализации концепции ландшафтной ревитализации природных территорий. Исследование было проведено на основе оценки ландшафтно-экологического состояния территории, экспертного анализа неблагоприятных факторов, натурного исследования, графо-аналитического метода систематизации материалов. В результате исследования были сформулированы принципы и приемы реализации концепции ландшафтной ревитализации природных территорий и разработано концептуальное предложение по функциональному зонированию территории Суздальских озер. На основе интеграции принципов устойчивого развития, биодизайна и ландшафтного планирования даны подходы для создания гармоничного пространства, которое не только восстанавливает природные экосистемы, но и становится важным элементом городской среды. Теоретическая модель основана на исследовательской теме: ландшафтная ревитализация природной территории, применимой к конкретной территории Суздальских озер. В представленной модели экология и антропогенное воздействие на территорию находятся в сбалансированном взаимодействии.

Ключевые слова: ландшафтной ревитализации, устойчивое развитие, ландшафтного планирование, функциональному зонированию, природно-рекреационные территории

Для цитирования: Клайма Э.И., Золотарева М.В. Ландшафтная ревитализация природных территорий в структуре города // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 575–585. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-575-585>. EDN: GEDOQE.

Original article**Landscape revitalization of natural territories in the city structure****Eliana I. Klayma¹, Milena V. Zolotareva²**^{1,2}Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The purpose of the presented research is to develop a concept of landscape revitalization of natural territories aimed at restoring their ecological balance, increasing biodiversity and creating a sustainable recreational infrastructure. The conceptual model is performed in relation to the landscape revitalization of the territory of the Suzdal lakes in Saint Petersburg. The main objectives in the context of the goal are: to conduct an expert assessment of the natural and ecological situation in the territory under consideration in accordance with the regulatory framework for the development and conservation of ecosystems, to conduct a comprehensive urban planning and landscape analysis of the territory in or-

der to identify factors affecting the environmental sustainability of the territory, to determine the principles and methods of implementing the concept of landscape revitalization natural territories. The study was conducted on the basis of an assessment of the landscape and ecological condition of the territory, an expert analysis of adverse factors, a field study, and a graphoanalytical method for systematizing materials. As a result of the research, the principles and techniques for implementing the concept of landscape revitalization of natural territories were formulated and a conceptual proposal for the functional zoning of the territory of the Suzdal Lakes was developed. Based on the integration of the principles of sustainable development, biodesign and landscape planning, approaches are given to create a harmonious space that not only restores natural ecosystems, but also becomes an important element of the urban environment. The theoretical model is based on a research topic: landscape revitalization of a natural area applicable to a specific area of the Suzdal Lakes. In the presented model, ecology and anthropogenic impact on the territory are in a balanced interaction.

Keywords: landscape revitalization, sustainable development, landscape planning, functional zoning, and natural and recreational areas

For citation: Klayma E.I., Zolotareva M.V. Landscape revitalization of natural territories in the city structure. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):575-585. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-575-585>. EDN: GEDOQE.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие природно-рекреационных территорий в условиях урбанизации является важной задачей современного градостроительства и экологии. В последние десятилетия увеличивается потребность в создании эффективных природно-рекреационных каркасов, которые обеспечивают гармоничное сосуществование природы и человека, способствуют сохранению природных экосистем и повышению качества жизни городской среды. Особое значение приобретает создание каркасной структуры для рекреационного использования природных ресурсов, что включает в себя грамотное планирование территории с учетом экосистемных, культурных и социальных факторов [1].

Целью данной работы является разработка концептуальной модели территориального развития, включающей в себя создание зон рекреационного использования, сохранение природных экосистем и повышение доступности территории для широкого круга пользователей [2]. Концептуальная модель выполняется применительно к ландшафтной ревитализации территории Суздальских озер с учетом экологических, природных и социально-экономических факторов и с последующим внедрением их в проектные решения.

Суздальские озера, расположенные на территории г. Санкт-Петербурга, представляют собой уникальный природный комплекс, объединяющий водные экосистемы, лесные и водно-болотные угодья. Однако, несмотря на их экологическую ценность и потенциал для рекреационного использования, данная территория сталкивается с рядом проблем, свя-

занных с экологической деградацией, потерей биоразнообразия и повышением антропогенной нагрузки. Эффективное использование и охрана природных комплексов данной территории возможно лишь при условии разработки подходов к ландшафтной ревитализации.

МЕТОДЫ

Методы исследования включают изучение, систематизацию и анализ данных, полученных из библиографических источников и электронных ресурсов, натурное исследование и фотофиксацию исследуемой территории, изучение отечественного и зарубежного опыта ландшафтной ревитализации природных территорий в составе городских образований, графоаналитический метод систематизации материалов, оценку ландшафтно-экологического состояния рассматриваемой территории, экспертный анализ неблагоприятных факторов, влияющих на экологическую устойчивость территории Суздальских озер.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сохранение природных экосистем и гармоничное развитие территории, включающих водоемы и прибрежные зоны, представляет собой одну из ключевых задач устойчивой ландшафтно-пространственной организации и охраны окружающей среды. На многих территориях, включая прибрежные зоны водоемов, наблюдается неблагоприятная тенденция деградации природных территорий, неудовлетворительной эксплуатации природных ресурсов. Это ведет к множеству экологических, социальных и экономических проблем, которые отрицательно сказываются как на рекреационных качествах, так и на состоянии экосистем [3].

Во время выявления подходов к ландшафтной ревитализации территории, были учтены и проанализированы проблемы, с которыми сталкиваются ландшафтные территории в черте города [4]. Это непосредственно относится и к территории Суздальских озер.

Незаконная застройка по береговым линиям и в зоне охраны – одна из самых острых проблем, с которой сталкиваются водоемы в различных регионах. Зонирование береговых линий часто не соблюдается, что приводит к застройке в зонах, подлежащих особой охране. Это нарушает естественные экосистемы, снижает их способность к самовосстановлению, а также ухудшает условия для локальной флоры и фауны. При интенсивной застройке и эксплуатации прибрежных территорий происходит потеря природных экосистем, таких как водно-болотные угодья, прибрежные леса и травянистые зоны. Утрата этих экосистем влечет за собой ухудшение качества воды, снижение уровня кислорода в водоемах и потерю биологической разнообразия. Загрязнение водоемов, вызванное сбросом сточных вод, мусора, сельскохозяйственных химикатов, а также загрязнением от строительных объектов и застройки, является одной из главных экологических проблем для водоемов.

Проблема отсутствия инфраструктуры на природных рекреационных территориях заключается в том, что многие прибрежные территории и охраняемые природные зоны остаются плохо оборудованными для удобного и безопасного отдыха. Это включает в себя отсутствие пешеходных и велосипедных дорожек, зон для отдыха и культурных мероприятий, а также санитарных и водных объектов. Недостаток такой инфраструктуры приводит к тому, что экосистемы остаются незащищенными от антропогенного воздействия, а сами территории не используются по назначению для устойчивого отдыха и туризма.

Эрозия береговых линий – данный фактор приводит к утрате земельных участков, ухудшению качества воды, а также к нарушению устойчивости экосистем. Прибрежные зоны, которые играют важную роль в защите водоемов от загрязнений и поддержании биологического равновесия, становятся уязвимыми [5]. Это особенно актуально для водоемов, таких как Суздальские озера, где сохранение береговых линий необходимо для предотвращения загрязнения и обеспечения устойчивости экосистем.

Нарушение экологического баланса – следствие всего комплекса негативных факторов: загрязнение, застройка, потеря экоси-

стем и эрозия. Эти изменения ведут к исчезновению отдельных видов флоры и фауны, что нарушает функционирование природных цепочек [6].

Например, изменения в водном балансе могут привести к исчезновению видов рыб, что, в свою очередь, нарушает пищевые цепочки. Экорегуляция, которая раньше происходила естественным образом, теряется, а экосистемы становятся более уязвимыми к внешним воздействиям, таким как засухи или паводки [7].

Анализ проблем и перспектив развития Суздальских озер позволили провести SWOT анализ территории (таблица).

Анализ удачных примеров ревитализации ландшафтно-природных комплексов позволил выявить принципы подходов, реализуемые в этих проектах [8]:

1. Эко-ориентированные подходы в организации территории и ее благоустройстве. В этом случае внимание сосредоточено на обеспечении экологической устойчивости и минимальном воздействии на природу, что особенно важно для водоемов, подверженных загрязнению и эрозии. В таких проектах, как Klockelund Beach Park и Farsta Strandpark (оба проекта из Швеции), использовались местные растения, а также применялись природные материалы для благоустройства территорий, что помогло минимизировать антропогенное воздействие на экосистему.

2. Комплексный подход к защите экосистем. В основе многих проектов приоритетным стало не только создание зон для отдыха, но и активное восстановление экосистем – очистка водоемов и укрепление береговых линий. Это позволяет не только улучшить качество воды, но и создать устойчивые природные зоны, что способствует развитию экологического туризма.

3. Роль водоемов, интегрированных в городскую среду. Еще одним важным выводом является понимание того, как водоемы и прибрежные зоны становятся не только природными объектами, но и неотъемлемой частью городской и пригородной инфраструктуры. Примеры показывают, что водоемы, если они интегрированы в систему городского планирования, могут служить важными экологическими и социальными ресурсами.

Например, создание набережных с активными зонами для отдыха в таких местах как парк Пехорка (г. Балашиха) и парк культуры и отдыха Ивановские пруды (г. Красногорск), позволило значительно улучшить не только качество воды, но и сделать доступными природные территории для горожан.

SWOT-анализ территории Суздальских озер в Санкт-Петербурге
SWOT analysis of the territory of the Suzdal Lakes in Saint Petersburg

Сильные стороны	Слабые стороны
<ul style="list-style-type: none"> – наличие водно-зеленого каркаса. Территория играет большую роль в формировании как водно-зеленого каркаса района, так и города в целом – разнообразие экосистем. Экосистемы территории вокруг Суздальских озер включают водные бассейны, заросли кустарников, береговую растительность и лесные массивы. Это создает уникальную среду для различных видов животных и растений – водные объекты. Озера предоставляют широкий спектр возможностей для активного отдыха, таких как купание, рыбалка, пикники, водные виды спорта и прогулки вдоль берега. Это делает территорию привлекательной как для местных жителей, так и для туристов. – наличие рекреационных зон. Существуют зоны общего пользования, такие как небольшие парки, пляжи и болотные угодья 	<ul style="list-style-type: none"> – экологическая ситуация. Из-за интенсивного использования и антропогенного воздействия на окружающую среду могут возникать проблемы с загрязнением воды, выппада деревьев и утратой биоразнообразия – ограниченный доступ. При анализе градостроительной ситуации было выявлено, что некоторые участки вокруг озер могут быть закрыты для публичного доступа или использоваться под коммерческие цели, что ограничивает возможность обеспечения организации непрерывного ландшафта – недостаточно развита инфраструктура. Существует недостаток развитой инфраструктуры в некоторых зонах, что создает неудобства для посетителей, такие как нехватка парковочных мест, отсутствие удобных маршрутов для прогулок и нехватка общественного транспорта
Возможности	Угрозы
<ul style="list-style-type: none"> – территория обладает несомненной экологической ценностью. Комплекс озер и окружающие их болотистые местности, а также прибрежные зоны могут поддерживать биоразнообразие, сохранять водные экосистемы и предоставлять уникальные условия для обитания редких видов растений и животных – рекреационные возможности. Территория Суздальских озер обладает высоким потенциалом для развития зон экологического покая, зон рекреации для отдыха жителей района – развитие экологического туризма и экопарка. Создание экопарков и образовательных маршрутов вдоль озер позволит привлечь внимание к сохранению природы, проведению экологических мероприятий и ознакомлению с местными экосистемами – повышение качества городской среды, развитие экологического туризма, развитие инфраструктуры для активного отдыха и рекреации способствует улучшению физического и психологического здоровья горожан и снижению уровня стресса 	<ul style="list-style-type: none"> – антропогенное воздействие и загрязнение. Рост застройки, промышленное развитие и несанкционированная деятельность могут привести к загрязнению воды, почвы и воздуха, а также к утрате биоразнообразия и истощению природных ресурсов – утрата природных участков и биотопов. Эксплуатация земель, вырубка деревьев, изменение природной среды и забор земельных участков под коммерческие цели могут привести к утрате естественных биотопов и снижению жизненных условий для местных видов животных и растений – несоблюдение экологических стандартов и правил. Недостаточное внимание к экологическим аспектам при планировании и реализации строительных проектов, а также неправильное использование природных ресурсов может привести к нарушению экологического баланса и ухудшению состояния окружающей среды

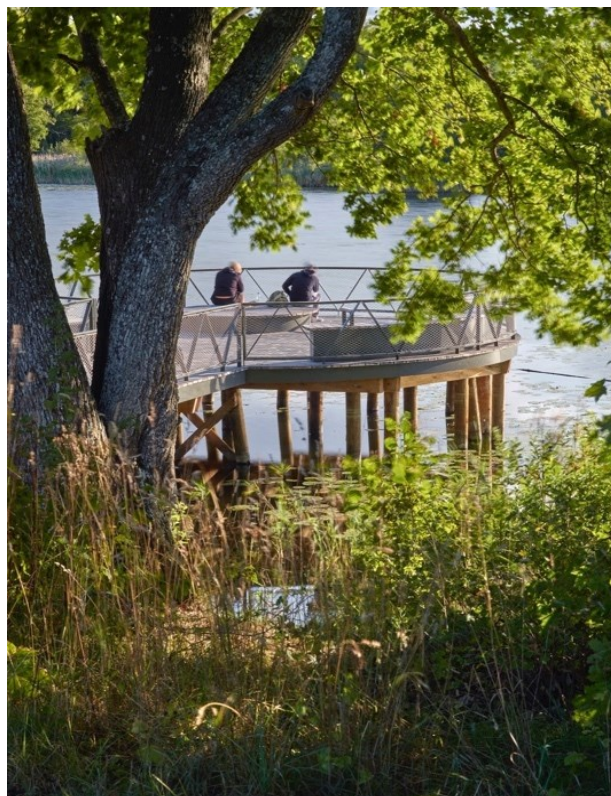
Первое, на что стоит обратить внимание при анализе удачных проектов ревитализации ландшафтно-природных комплексов – это универсальность подходов, направленных на интеграцию природных экосистем с современными рекреационными функциями [9]. Например, проекты благоустройства таких территорий, как набережные рек, прибрежные зоны озер и парки, подчеркивают важность

устойчивости экосистем и охраны природных ресурсов при создании пространств для отдыха.

Это актуально и для разработки природно-рекреационного каркаса Суздальских озер, где требуется найти баланс между сохранением экосистем и развитием рекреационной инфраструктуры для местных жителей и туристов.



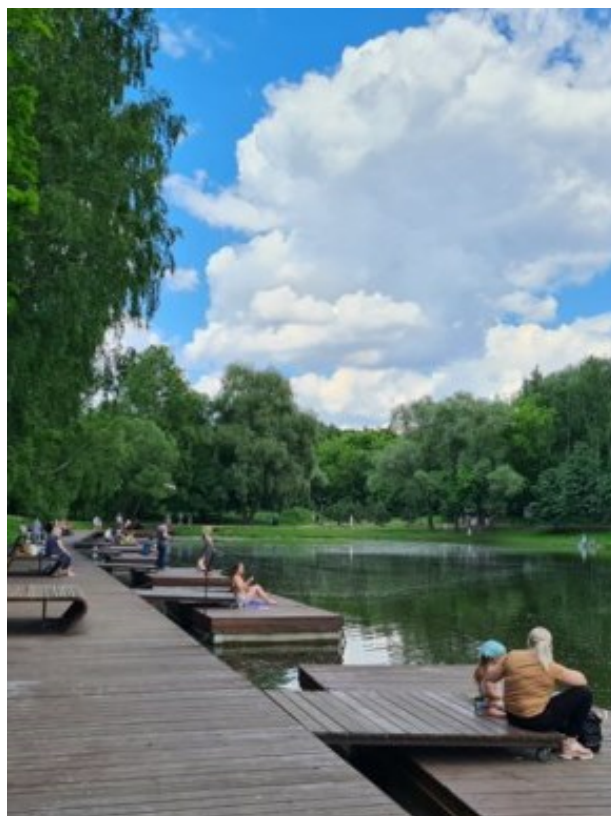
**Рис. 1. Klockelund Beach Park, Швеция.
Fig. 1. Klockelund Beach Park, Sweden**



**Рис. 2. Farsta Strandpark, Швеция.
Fig. 2. Klockelund Beach Park, Sweden**



**Рис. 3. Парк Пехорка, г. Балашиха
Fig. 3. Park Pekhorka, Balashikha**



**Рис. 4. Парк культуры и отдыха
Ивановские пруды, г. Красногорск
Fig. 4. Ivanovsky Ponds Park and Recreation
Area, Krasnogorsk**

Теоретическая модель проекта основана на исследовательской теме: ландшафтная ревитализация ландшафтной территории, применимой к конкретной территории Суздальских озер [10]. В предложенной модели экологические составляющие и антропогенное воздействие находятся в сбалансированном взаимодействии. В основе лежит система природных технологий, такие как биоплато, фиторемедиация, плавучие острова и другие методы, которые восстанавливают нарушенные экологические процессы.

Ландшафтная ревитализация как инструмент экологической регенерации направлен на процессы восстановления, оживления и устойчивого развития деградированных или нарушенных природных ландшафтов, на улучшение экологического состояния территорий, повышение биоразнообразия, восстановление экосистем и создание комфортной среды для жизни человека [11]. Для увеличения устойчивости территории и ее ревитализации необходимо комплексно подходить к вопросам устойчивого использования природных ресурсов, а также создать условия для сохранения и развития экологической инфраструктуры [12].

Для разработки подходов были выявлены основные принципы ландшафтной ревитализации:

- сохранение и восстановление биоразнообразия: важным элементом устойчивости является сохранение экосистемных услуг, поэтому необходимо создавать природные территории, экологические коридоры и зоны восстановления биоразнообразия, доступ человека к которым будет ограничен или вовсе отсутствовать.

- восстановление нарушенных экосистем: для понимания количества и видов утраченных экосистем необходимо провести детальный анализ существующих и некогда существовавших растительных сообществ на территории [13]. Целью является воссоздание нарушенных зон и поддержание их в дальнейшем.

- создание природных рекреационных зон: важно осуществлять планирование природно-рекреационных объектов с минимальным воздействием на экосистемы (например, эко-тропы, экологические маршруты, зоны для отдыха с элементами экологического просвещения) [14].

- эко-образование и просвещение: разработка программ, маршрутов для обучения и информирования населения и туристов о важности значения природных экосистем в

городе, методах их сохранения и использовании природных ресурсов без ущерба для природы.

- поддержка устойчивого туризма: стимулирование использования экологически чистых транспортных средств (велосипедные и пешеходные маршруты), минимизация воздействия на природу, организация сбора и утилизации отходов [15].

- экологические коридоры: связь природных и рекреационных зон с помощью экологических коридоров, которые позволяют поддерживать миграцию животных и растений.

- экологически безопасные технологии и материалы: использование экологически чистых строительных материалов, экологический подход к очищению водоема без грубых вмешательств.

На основе вышеизложенных принципов было разработано восемь конкретных подходов ландшафтной ревитализации. Каждый из них направлен на восстановление экосистемы, создание устойчивой среды и восстановление деградирующего ландшафта на территории Суздальских озер [16].

Фенологический подход в ландшафтном проектировании представляет собой стратегию формирования пространства, основанную на закономерностях сезонных изменений в природе. Этот метод предполагает подбор растений с учетом их декоративных качеств в разные периоды вегетации, создавая непрерывно меняющуюся среду. Суть подхода заключается в создании фенологического календаря территории, где каждый сезон имеет свою визуальную доминанту и эмоциональную атмосферу. Весной акцент делается на раннецветущих растениях, летом – на продолжительности цветения и ароматах, осенью – на изменении окраски листвы и плодоношении, зимой – на графике ветвей и вечнозеленых акцентах. Важным аспектом является не только визуальная составляющая, но и привлечение фауны – подбор видов, обеспечивающих кормовую базу для птиц и насекомых в разные сезоны [17].

Ключевой особенностью эко-адаптивного подхода является ориентация на местные экологические условия. Например, при выборе растений предпочтение отдается аборигенным видам, уже приспособленным к климату Северо-Запада и особенностям почвенного покрова. Такие растения не только требуют минимального ухода, но и формируют устойчивые фитоценозы, способные противостоять инвазивным видам [18]. К этому подходу относится использование экосистемных услуг. Так

как воды Суздальских озер имеют значительную степень загрязненности, для ее очистки требуются зоны фиторемедиации с определенными видами растений, способствующих очистке водоемов.

Функционально-планировочный подход помогает понять, что при проектировании важно определить четкую пространственную структуру, где каждая зона выполняет особую роль, сохраняя при этом экологическую целостность территории [19]. Транспортно-пешеходная сеть проектируется по принципу минимального вмешательства. Основные маршруты прокладываются по существующим тропам, чтобы сохранить почвенный покров, а их покрытие выбирается исходя из пропускной способности [20].

Сенсорно-иммерсивный подход помогает через активацию всех органов чувств создать у человека ощущение полного погружения в пространство [21]. В основе такого подхода лежит осознание того, что современный человек, живущий в шумном городе, со временем перестает прислушиваться к шелесту листьев, различать оттенки запахов, чувствовать текстуру природных материалов. Сенсорно-иммерсивное пространство становится своеобразной реабилитационной средой, которая возвращает нам эти утраченные способности.

Биоинженерный подход – так как основной проблемой территории является ее малая устойчивость к антропогенным нагрузкам, такой подход поможет замедлить и предотвратить процесс деградации с помощью биоинженерных технологий [22].

В проекте применяются несколько видов данного подхода: биоплато, плавающие острова, дождевой сад и др. Вместо традиционного благоустройства с жесткими набережными и искусственными покрытиями, предложены адаптивные решения, позволяющие озерам самостоятельно очищаться, а их берегам – восстанавливаться [23]. Например, биоплато, работающие как естественные фильтры, снижают антропогенную нагрузку, а плавучие острова используют растения, которые очищают воду, и создают новые места обитания для птиц.

Биоценотический подход – природные сообщества играют ключевую роль в поддержании экологического баланса и повышении устойчивости территории к изменениям внешней среды [24]. Особое внимание стоит уделить водно-болотным угодьям, которые занимают весомую часть на территории. Данные экосистемы обладают исключительными свойствами, которые играют важную роль в поддержании экологической устойчивости

территорий [25]. Основной принцип данного подхода основан не на видах растений, а на их взаимосвязях.

Историко-культурный подход раскрывает память места, интегрируя в проект элементы, которые связывают озера с прошлым г. Санкт-Петербурга. Маршруты с описанием истории появления Суздальских озер. На территории существует множество зданий и сооружений, входящих в состав объектов культурного наследия и имеющих огромную ценность. Этот способ поможет сформировать эмоциональную связь между жителями и территорией, превратив ее в место с историей. Социально ориентированный подход к ревитализации Суздальских озер фокусируется на создании комфортной и инклюзивной среды, которая учитывает потребности различных групп населения и способствует укреплению местного сообщества [26]. Этот подход предполагает, что территория должна стать не просто местом отдыха, а настоящим общественным пространством, где люди разных возрастов, интересов и возможностей смогут чувствовать себя уютно, взаимодействовать друг с другом и участвовать в жизни Суздальских озер. Подход фокусируется на потребностях разных групп пользователей территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе изучения и анализа отечественного и зарубежного опыта по теме исследования выявлены основные принципы организации устойчивой природно-ландшафтной организации территории в системе городских образований, которые легли в основы концепции реконструкции и ревитализации.

В ходе исследования был проведен комплексный анализ природно-рекреационного каркаса района на примере территории Суздальских озер в Санкт-Петербурге, с фокусом на экологические аспекты, воздействие человеческой деятельности и потенциал для устойчивого развития рекреационных пространств. Определено видовое разнообразие зеленых насаждений на исследуемой территории, включая их распределение и влияние на экосистему. В результате проведения комплексного градостроительного и ландшафтного анализа территории выявлены неблагоприятные факторы, влияющие на ее экологическую устойчивость (незаконная застройка прилегающих к озерам территорий, утрата природных экосистем, загрязнение водного объекта, эрозия береговых линии, нарушение экологического баланса и др.). Основные экологические проблемы, выявленные на территории Суздальских озер, связаны с деградацией береговой зоны, эрозией почвы, загряз-

нением водоемов, а также нарушением природного баланса экосистемы в результате частной застройки и интенсивного использования территории. На основе принципов построения концепции ландшафтной ревитализации природных территорий были сформулированы подходы в реализации устойчивого развития территории, применения биодизайна и ландшафтного планирования, направленные на создание гармоничного пространства,

которое не только восстанавливает природные экосистемы, но и становится важным элементом городской среды. Это позволило сформулировать рекомендации для эффективного использования природных ресурсов, с учетом сохранения биологического разнообразия и обеспечения комфортных условий для рекреационного использования, и разработку подходов ландшафтной ревитализации с учетом выявленных данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Папенков К.В., Никоноров С.М., Ситкина К.С. Устойчивое развитие городов. М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2019. 288 с. EDN: GASCBS.
2. Алимов А.Ф., Алтухов Ю.П., Амиханов А.М., Бобылев С.Н., Боголюбов С.А., Большаков В.Н. и др. Национальная стратегия сохранения биоразнообразия России. М.: Проект ГЭФ «Сохранение биоразнообразия», 2001. 76 с. EDN: VXGFGN.
3. Шляков Б.А. Анализ санитарно-гигиенических показателей воды из среднего Суздальского и Нижнего большого Суздальского озер за май и июнь 2019 года // X Международный конкурс научно-исследовательских и творческих работ учащихся «Старт в науке». 2019. С. 1–14. Режим доступа: <https://school-science.ru/10/1/45581?ysclid=mayc3dzrtw346156528> (дата обращения: 17.05.2025.).
4. Исаченко А.Г. Ландшафты СССР. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1985. 320 с.
5. Прокофьева Е.Ю., Васильев Н.В. Современные тенденции реабилитации антропогенных территорий // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 4. С. 87–93. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2019-4-87-93>. EDN: PHDFZR.
6. Васильев Н.В. Инновационные технологии в реабилитации антропогенных территорий // Инновации и инвестиции. 2022. № 8. С. 82–85. EDN: EBOUON.
7. Золотарева М.В., Клайма Э.И. Анализ проблематики и выявление принципов развития территории Суздальских озер в Санкт-Петербурге // XIV региональный творческий форум с междунар. участием «Архитектурные сезоны в СПбГАСУ». Сб. материалов II Национальной (Всеросс.) науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 22–26 апреля 2024 г.). СПб, 2024. С. 62–63. EDN: RPTWPR.
8. Jim C.Y. Sustainable Urban Greening Strategies for Compact Cities in Developing and Developed Economies // Urban Ecosystems. 2013. Vol. 16. P. 741–761. <https://doi.org/10.1007/s11252-012-0268-x>.
9. Субботин О.С. Ландшафтный урбанизм и организация пространственной среды: эволюция и новые реальности // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15. № 1. С. 116–125. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2025.01.16>. EDN: LOGPWS.
10. Кравченко О.В. Еко-ревитализационная модель гармонизации нарушенной городской среды // Наука, техника и образование. 2014. № 4. С. 122–126. EDN: TAMIJB.
11. Павлова В.А. Река в городе. Ревитализация прибрежных территорий // Архитектура и строительство России. 2020. № 3. С. 98–103. EDN: DNFFRB.
12. Азарова О.В. Теория ландшафтной архитектуры и методология проектирования. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2016. 73 с.
13. Золотова М.С. Создание архитектурно-ландшафтной среды и благоустройство водоохранной прибрежной полосы // Молодой ученый. 2015. № 11. С. 331–335. EDN: RWZWDJ.
14. Петрова В.В., Писканова Е.А., Степанова Ж.Ю. Особенности формирования комфортной городской среды // Человек, общество и культура в XXI веке. Сб. науч. трудов по материалам Междунар. науч.-практ. конф. (г. Белгород, 31 октября 2017 г.). Белгород, 2017. С. 76–79. EDN: ZSXZSZ.
15. Гриднев Д.З., Волынская А.А. Функционирование природных территорий в городе и режимы их использования // Наука и современность. 2010. № 5-1. С. 49–53. EDN: RTHDDF.
16. Клайма Э.И., Золотарева М.В. Основные подходы к организации функционального и ландшафтного зонирования территории Суздальских озер // Сб. материалов XV регионального творческого форума с междунар. участием «Архитектурные сезоны в СПбГАСУ». Сб. материалов III Национальной (Всеросс.) науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 21–25 апреля 2025 г.). СПб, 2025. С. 28–29. EDN: BZXXSP.
17. Алябина Г.А., Басова С.Л., Беляков В.П., Бударин В.Ф., Бутылин В.П., Былина Т.С. и др. Водные объекты Санкт-Петербурга. СПб.: Символ, 2002. 348 с. EDN: YOXVQS.
18. Волокитина Е.В., Байдуков Д.А., Тихомиров Н.А. Очистка и восстановление водных объектов города // Окружающая среда Санкт-Петербурга. 2017. Режим доступа: <https://ecopeterburg.ru/2017/12/06/> (дата обращения: 17.05.2025).

19. Ahern J. From Fail-Safe to Safe-To-Fail: Sustainability and Resilience in the New Urban World // *Landscape and Urban Planning*. 2011. Vol. 100. Iss. 4. P. 341–343. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.021>.
20. Ноздрачева П. Акватории и их роль в формировании новой городской среды // *Архитектура. Строительство. Дизайн*. 2003. № 6. С. 34–38.
21. Бауэр Н.В. Инновационные подходы в культуре формирования ландшафтов городской среды // *Теория и практика общественного развития*. 2015. № 11. С. 221–223. EDN: UCOVGL.
22. Ачковский И.А., Золотарева М.В. Инновационные методы оснащения современных парковых пространств // *Сборник научных трудов студентов магистратуры кафедры дизайна архитектурной среды*. Сборник статей. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. С. 13–17. EDN: ESTJBA.
23. Мальчикова А.Г. Ландшафтно-экологический аспект городского паркового строительства // *Studnet*. 2022. Т. 5. № 5. С. 147–148. EDN: OXKVHL.
24. Мурзин А.Д. Экологический парк как инструмент обеспечения устойчивости городского пространства // *Экономика и экология территориальных образований*. 2019. Т. 3. № 4. С. 60–66. <https://doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-4-60-66>. EDN: FFHRCM.
25. Федотов Е.С. Социальная роль благоустройства городской среды мегаполиса // *Социальная политика и социология*. 2013. № 2-1. С. 272–284. EDN: RXCHUF.
26. Шульга А.В. Золотарева М.В. Общественные пространства в контексте современных социально-культурных тенденций // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2024. № 10. С. 90–99. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-10-90-99>. EDN: XWVSRB.

REFERENCES

1. Papenov K.V., Nikonorov S.M., Sitkina K.S. *Sustainable Urban Development*. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2019. 288 p. (In Russ.). EDN: GASCBS.
2. Alimov A.F., Altukhov Yu.P., Amirkhanov A.M., Bobylev S.N., Bogolyubov S.A., Bolshakov V.N. et al. *National Strategy for the Conservation of Biodiversity in Russia*. Moscow: GEF Project “Conservation of Biodiversity”, 2001. 76 p. (In Russ.). EDN: VXGFGN.
3. Shlyakov B.A. Analysis of Sanitary and Hygienic Indicators of Water from the Middle Suzdal and Lower Big Suzdal Lakes for May and June 2019. *X International Competition of Scientific Research and Creative Works of Students “Start in Science”*. 2019:1-14. Available from: <https://school-science.ru/10/1/45581?ysclid=mayc3dzrtw346156528> [Accessed 17 May 2025]. (In Russ.).
4. Isachenko A.G. *Landscapes of the USSR*. Leningrad: Leningrad University Publishing House, 1985. 320 p. (In Russ.).
5. Prokofyeva E.Yu., Vasiliev N.V. Modern Trends of Rehabilitation of Anthropogenic Territories. *Arkhitectura i stroitelstvo*. 2019;4:87-93. (In Russ.). <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2019-4-87-93>. EDN: PHDFZR.
6. Vasilyev N.V. Innovative Technologies in the Rehabilitation of Anthropogenic Territories. *Innovation & Investment*. 2022;8:82-85. (In Russ.). EDN: EBOUON.
7. Solotareva M.V., Klaima E.I. Analysis of the Problems and Identification of the Principles of Development of the Territory of the Suzdal Lakes in St. Petersburg. In: *XIV regionalnyi tvorcheskii forum s mezhdunarodnym uchastiem «Arkhitekturnye sezony v SPBGASU». Sbornik materialov II Natsional'noi (vserossiiskoi) nauchno-prakticheskoi konferentsii = XIV Regional Creative Forum with International Participation “Architectural Seasons in SPBGASU”. Collection of Materials of the II National (All-Russian) Scientific and Practical Conference*. 22–26 April 2024, Saint Petersburg. Saint Petersburg; 2024. P. 62–63. (In Russ.). EDN: RPTWPR.
8. Jim C.Y. Sustainable Urban Greening Strategies for Compact Cities in Developing and Developed Economies. *Urban Ecosystems*. 2013;16:741-761. <https://doi.org/10.1007/s11252-012-0268-x>.
9. Subbotin O.S. Landscape Urbanism and Spatial Environment Organization: Evolution and New Realities. *Urban Construction and Architecture*. 2025;15(1):116-125. (In Russ.). <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2025.01.16>. EDN: LOGPWS.
10. Kravchenko O.V. Eco-Revitalization Model of Harmonization of Damaged Urban Environment. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*. 2014;4:122-126. (In Russ.). EDN: TAMIJB.
11. Pavlova V.A. River Inside The City. Revitalization of Waterfront Areas. *Architecture and Construction of Russia*. 2020;3:98-103. (In Russ.). EDN: DNFFRB.
12. Azarova O.V. *Theory of Landscape Architecture and Design Methodology*. Saratov: Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, 2016. 73 p. (In Russ.).
13. Zolotova M.S. Creation of an Architectural and Landscape Environment and Improvement of the Coastal Water Protection Strip. *Molodoi uchenyi*. 2015;11:331-335. (In Russ.). EDN: RWZWDJ.
14. Petrova V.V., Piskanova E.A., Stepanova Zh.Yu. Features of the Formation of a Comfortable Urban Environment. In: *Chelovek, obshchestvo i kultura v XXI veke. Sbornik nauchnykh trudov po materialam*

- Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Man, Society and Culture in the XXI Century. Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the International Scientific and Practical Conference.* 31 October 2017, Belgorod. Belgorod; 2017. P. 76–79. (In Russ.). EDN: ZSXZSZ.
15. Gridnev D.Z., Volynskaya A.A. Functioning Of Natural Areas in the City and Modes of Their Use. *Nauka i sovremennost.* 2010;5-1:49-53. (In Russ.). EDN: RTHDDF.
16. Klaima E.I., Solotareva M.V. The Main Approaches to Organizing Functional and Landscape Zoning Of the Suzdal Lakes. In: *Sbornik materialov XV regionalnogo tvorcheskogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem «Arkhitekturnye sezony v SPBGASU». Sbornik materialov III Natsionalnoi (Vserossiiskoi) nauchno-prakticheskoi konferentsii = Collection of Materials of The XV Regional Creative Forum with International Participation "Architectural Seasons in Spbgasu". Collection of Materials of the III National (All-Russian) Scientific and Practical Conference.* 21–25 April 2025, Saint Petersburg. Saint Petersburg; 2025. P. 28–29. (In Russ.). EDN: BZXXSP.
17. Alyabina G.A., Basova S.L., Belyakov V.P., Budarin V.F., Butylin V.P., Bylina T.S. et al. *Water Bodies of Saint Petersburg.* Saint Petersburg: Simvol, 2002. 348 p. (In Russ.). EDN: YOXVQS.
18. Volokitina E.V., Baidukov D.A., Tikhomirov N.A. Cleaning and Restoration of Water Bodies of the City. *Okruzhayushchaya sreda Sankt-Peterburga.* 2017. Available from: <https://ecopeterburg.ru/2017/12/06/> [Accessed 17 May 2025]. (In Russ.).
19. Ahern J. From Fail-Safe to Safe-To-Fail: Sustainability and Resilience in the New Urban World. *Landscape and Urban Planning.* 2011;100(4):341-343. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.021>.
20. Nozdracheva P. Water Areas and Their Role in the Formation of a New Urban Environment. *Arkhitektura. Stroitelstvo. Dizain.* 2003;6:34-38. (In Russ.).
21. Bauer N.V. Innovative Approaches to the Culture of the Urban Environment Landscape Formation. *Theory and Practice of Social Development.* 2015;11:221-223. (In Russ.). EDN: UCOVGL.
22. Achkovskiy I.A., Zolotareva M.V. Innovative Methods of Equipping Modern Park Areas. In: *Collection of Scientific Papers by Master's Students of the Department of Architectural Environment Design. Collection of Articles.* Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2023. P. 13–17. (In Russ.). EDN: ESTJBA.
23. Malchikova A.G. Landscape and Ecological Aspect of Urban Park Construction. *Studnet.* 2022;5(5):147-148. (In Russ.). EDN: OXKVHL.
24. Murzin A.D. Ecological Park as a Tool for Sustainability of Urban Space. *Economy and Ecology of Territorial Formations.* 2019;3(4):60-66. (In Russ.). <https://doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-4-60-66>. EDN: FFHRCM.
25. Fedotov E.S. The Social Role of Urban Development in a Metropolis. *Social Policy and Sociology.* 2013;2-1:272-284. (In Russ.). EDN: RXCHUF.
26. Shulga A.V., Zolotareva M.V. Public Spaces In the Context of Modern Socio-Cultural Trends. *Bulletin Of Belgorod State Technological University Named After. V.G. Shukhov.* 2024;10:90-99. (In Russ.). <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-10-90-99>. EDN: XWVSRB.

Информация об авторах

Клайма Элиана Ильясовна,
ландшафтный архитектор,
Архитектурная группа ООО «Северный стиль»,
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
190005, г. Санкт-Петербург,
ул. 2-ая Красноармейская, 4, Россия,
e-mail: elianaklayma50@gmail.com

Золотарева Милена Владимировна,
кандидат архитектуры, доцент,
доцент кафедры истории и теории архитектуры,
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
190005, г. Санкт-Петербург,
ул. 2-ая Красноармейская, 4,
Россия,
✉e-mail: goldmile@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5549-7769>
Author ID: 496339

Information about the authors

Eliana I. Klayma,
Landscape Architect,
Architectural Group LLC "Northern style",
Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering,
4 2nd Krasnoarmeyskaya St., Saint Petersburg
190005, Russia,
e-mail: elianaklayma50@gmail.com

Milena V. Zolotareva,
Candidate of Architecture, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of History
and Theory of Architecture,
Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering,
4 2nd Krasnoarmeyskaya St., Saint Petersburg
190005, Russia,
✉e-mail: goldmile@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5549-7769>
Author ID: 496339

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 31.03.2025.
Одобрена после рецензирования 24.04.2025.
Принята к публикации 28.04.2025.

Information about the article

The article was submitted 31.03.2025.
Approved after reviewing 24.04.2025.
Accepted for publication 28.04.2025.

**Применение искусственного интеллекта и машинного обучения для BIM****П.А. Пичугов¹, С.Г. Шабиев²**^{1,2}Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Контроль качества является неотъемлемым компонентом процессов информационного моделирования зданий в архитектурном проектировании. На каждом этапе жизненного цикла объекта требуется систематический сбор и мониторинг ключевых показателей. Технология BIM, основанная на интенсивном использовании данных, предполагает применение сложных вычислительных методов, таких как обработка изображений и анализ больших массивов информации. В этом контексте искусственный интеллект и машинное обучение доказали свою эффективность в автоматизации задач и извлечении ценных инсайтов как в России, так и за рубежом. Эти технологии также позволяют прогнозировать необходимость технического обслуживания и контроля качества с высокой точностью, определяя оптимальные временные и пространственные параметры. В данной статье проводится анализ современных подходов к интеграции искусственного интеллекта и машинного обучения в архитектурном проектировании, а также обсуждаются перспективы и вызовы, связанные с внедрением этих технологий в архитектурное проектирование, строительство и ландшафтный дизайн. Цель исследования — сформировать комплексное представление о текущих потребностях архитектуры и отрасли строительства и влиянии искусственного интеллекта и машинного обучения на их развитие, а также определить направления для дальнейших научных изысканий. Особое внимание уделяется оперативным системам, способным решать сложные задачи и обучаться на основе данных, что обеспечивает высокую точность в выявлении закономерностей и прогнозировании жизненного цикла объектов, особенно при обработке значительных объемов информации.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, информационное моделирование зданий, цифровой двойник, «умное» здание, индустрия 5.0

Для цитирования: Пичугов П.А., Шабиев С.Г. Применение искусственного интеллекта и машинного обучения для BIM // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 586–599. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-586-599>. EDN: SCUGCI.

Original article**Application of artificial intelligence and machine learning for BIM****Pavel A. Pichugov¹, Salavat G. Shabiev²**^{1,2}South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Quality control is an integral component of building information modeling processes in architectural design. At each stage of the facility's life cycle, systematic collection and monitoring of key indicators is required. BIM technology, based on the intensive use of data, involves the use of complex computational methods such as image processing and analysis of large amounts of information. In this context, artificial intelligence and machine learning have proven effective in automating tasks and extracting valuable insights both in Russia and abroad. These technologies also make it possible to predict the need for maintenance and quality control with high accuracy, determining optimal time and spatial parameters. This article analyzes modern approaches to the integration of artificial intelligence and machine learning in architectural design, and discusses the prospects and challenges associated with the implementation of these technologies in architectural design, construction and landscape design. The purpose of the study is to form a comprehensive understanding of the current needs of architecture

and the construction industry and the impact of artificial intelligence and machine learning on their development, as well as to identify areas for further scientific research. Special attention is paid to operational systems capable of solving complex tasks and learning from data, which ensures high accuracy in identifying patterns and predicting the life cycle of objects, especially when processing significant amounts of information.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, building information modeling, digital twin, smart building, Industry 5.0

For citation: Pichugov P.A., Shabiev S.G. Application of artificial intelligence and machine learning for BIM. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(3):586-599. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-586-599>. EDN: SCUGCI.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы внедрение инновационных технологий в управление зданиями и ландшафтными проектами стало катализатором значительных преобразований в строительной отрасли. Среди ключевых инструментов, определяющих этот прогресс, выделяются информационное моделирование зданий (BIM) и искусственный интеллект (ИИ). Эти технологии, опираясь на обработку больших объемов данных, способствуют повышению точности и эффективности процессов проектирования, строительства и эксплуатации объектов на глобальном уровне. Исторически концепция BIM зародилась в 1960-х гг., в то время как основы ИИ были заложены еще в 1950-х. Сегодня обе технологии достигли высокого уровня и активно применяются в реализации масштабных проектов [1].

МЕТОДЫ

Методы машинного обучения (ML), включая алгоритмы глубокого обучения, играют основную роль в обработке сложных данных, что делает их незаменимыми в строительной индустрии. Внедрение таких технологий перестало быть опциональным и стало необходимостью, как и в других секторах экономики. Развитие ИИ открывает новые возможности для повышения эффективности строительных процессов через интеллектуальные решения. Одной из ключевых задач данной статьи является анализ перспектив интеграции BIM и цифровых двойников с достижениями в области ИИ. Особое внимание уделяется тому, как эти технологии могут трансформировать процессы проектирования, строительства и эксплуатации зданий.

Цель данного обзора – исследовать влияние современных инструментов, таких как BIM и ИИ, на ландшафтный дизайн и строительство. Для этого необходимо рассмотреть историю и эволюцию этих концепций, а также их практическое применение в различных проектах. Во введении представлены теоре-

тические основы обеих технологий, включая принципы функционирования ИИ, его типы и наиболее востребованные подходы в строительной и ландшафтной сферах. Это позволяет глубже понять синергию между технологиями и их потенциал для повышения качества и эффективности проектов.

Взаимодействие ИИ и BIM оказывает существенное влияние на отрасль, способствуя переходу от традиционных моделей контрактов к интегрированным подходам. В таких моделях специалисты из различных областей совместно работают над взаимодополняющими BIM-моделями, которые динамически обновляются в процессе реализации проекта.

Современные технологии, такие как дополненная реальность, облачные вычисления, генеративный дизайн и виртуальное проектирование, а также актуальные тренды в строительстве, играют важную роль в эволюции BIM. Дальнейшее изучение интеграции BIM с передовыми технологиями способно радикально изменить подходы к проектированию, строительству и управлению объектами, что может привести к более рациональному использованию ресурсов и улучшению качества жизни в урбанизированных и природных средах. Исследование таких интеграций открывает путь к созданию устойчивых и адаптивных решений в архитектуре и строительстве, что делает данную тему перспективной для будущих научных и практических изысканий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные принципы информационного моделирования зданий

Ключевым элементом концепции BIM является управление информацией, а именно обмен структурированными данными. В рамках этой концепции дополнительные негеометрические данные, такие как технические характеристики материалов, гарантийные сроки, показатели огнестойкости и устойчивости к коррозии, становятся неотъемлемой частью модели. В качестве примера можно привести

проект строительства жилого комплекса в Сингапуре, где BIM использовался для интеграции данных о свойствах бетона и стали. Это позволило оптимизировать выбор материалов и снизить затраты на строительство.

BIM представляет собой инновационную технологию, которая создает виртуальное пространство, точно воспроизводящее строительный проект. Эта цифровая модель формируется с применением передовых методов компьютерного моделирования, таких как Autodesk Revit и ArchiCAD. По завершении процесса проектирования информационная модель включает в себя не только детальную геометрию с характеристиками, но и обширный объем данных, необходимых для планирования, закупки материалов, производства и строительства. Примером успешного применения BIM может служить проект аэропорта в г. Ставангере (Норвегия), где использование обширной информационной модели позволило скоординировать работу подрядчиков и сократить сроки строительства на 20 %.

BIM-модель может быть использована для последующей эксплуатации и технического обслуживания объекта после завершения строительства. Например, в лондонском небоскребе The Shard BIM-модель интегрирована с системой управления зданием, что позволяет отслеживать энергопотребление и планировать ремонтные работы.

Одной из наиболее перспективных технологий, способных трансформировать BIM, является ML. Она включает разработку алгоритмов, которые обучаются на данных и делают прогнозы без явного программирования. Например, в проекте строительства моста в Нидерландах ML использовался для анализа данных о нагрузках и прогнозирования износа материалов, что позволило оптимизировать конструкцию и снизить затраты на обслуживание. В г. Сомервилль, штат Массачусетс, представлен успешный пример применения ИИ для оптимизации управления энергопотреблением. В рамках проекта IBM AI for Cities используются передовые технологии искусственного интеллекта для анализа данных из разнообразных источников, включая показатели энергопотребления муниципальных зданий и метеорологические данные.

Например, ИИ-алгоритмы анализируют данные о материалах и их свойствах. Так, в работе по обнаружению материалов с помощью машинного обучения с использованием неудачных экспериментов [2, 21] и улучшению прогнозирования свойств и оптимизации процессов производства строительных материалов с помощью машинного обучения [3, 19, 20]

показаны перспективные подходы, основанные на машинном обучении. Следовательно, экологичные строительные материалы могут еще больше снизить затраты на техническое обслуживание, замену в течение всего срока службы здания и обеспечить энергосбережение. В период, когда волатильность цен на энергоносители значительно возрастает, новые материалы могут снизить эксплуатационные расходы и затраты на коммунальные услуги, повысить эффективность систем отопления и охлаждения и минимизировать отходы.

Так, основными проблемами является сбор и анализ больших объемов данных [22]. Поэтому возможности интеграции искусственного интеллекта и машинного обучения помогают анализировать большие объемы данных, выявлять закономерности и предсказывать проблемы до их возникновения. В работе [4] приведено множество примеров обработки и анализа больших объемов данных.

Нейронные сети и искусственный интеллект

ИИ представляет собой одну из наиболее прогрессивных технологий, активно трансформирующих различные отрасли, включая строительство и архитектурное проектирование. В контексте информационного моделирования зданий ИИ открывает новые горизонты для оптимизации процессов проектирования, управления и эксплуатации объектов. Например, в работе [5] предлагаемая методология представляет собой синергетическое объединение алгоритмов оптимизации роя частиц (PSO) с информационным моделированием зданий в рамках визуального программирования с использованием платформы Dyalo. Данная интеграция предоставляет возможность разработки оптимизированных двумерных макетов, которые затем трансформируются в детализированные трехмерные модели BIM. Сочетание этих технологий не только способствует проведению содержательных дискуссий и принятию обоснованных решений на ранних этапах проектирования, но и позволяет эффективно использовать преимущества BIM в таких областях, как обнаружение коллизий, расчет объемов и визуализация проектных решений. Внедрение концепции цифровых двойников (DT) расширяет функциональные возможности системы, обеспечивая мониторинг в реальном времени и непрерывную оптимизацию процессов, что позволяет динамически адаптировать объект к актуальным условиям и изменяющимся требованиям.

Алгоритм PSO был тщательно разработан для обработки входных данных и для со-

здания оптимизированных 2D-макетов, объединяющих наилучшие глобальные позиции для каждой комнаты будущего проекта с указанием соответствующих систем координат x и y . Программные компоненты, необходимые для выполнения этих важных функций, представлены следующим образом:

- редактор PyChart, в основном используемый для разработки алгоритма оптимизации на языке программирования Python;
- Autodesk Revit, который служит основным программным обеспечением BIM;
- Dynamo, расширение для визуального программирования, легко интегрируемое в Revit и расширяющее его возможности.

Исследование [6], посвященное использованию данных электронных медицинских карт для прогнозирования потоков пациентов и оптимизации планировки помещений, свидетельствует о тесной взаимосвязи между проектированием медицинских учреждений на основе данных и эффективным планированием помещений. Следует отметить, что исследование было посвящено прогнозирующему моделированию на основе ИИ, но основное внимание уделяется взаимодействию и инте-

грации различных источников данных, а также более широкой концепции совместимости данных. В этом контексте данные играют важную роль в качестве основного источника входных данных для алгоритма PSO. Их использование для различных сценариев и интеграционных процессов подтверждает слаженную интеграцию технологии BIM, что еще больше показывает важность их совместимости в этом контексте. Этот подход направлен на демонстрацию потенциала беспрепятственного обмена данными и их интеграции при проектировании общественных учреждений, что способствует всестороннему пониманию нюансов и взаимосвязей в управлении и проектировании. Использование ИИ в режиме реального времени позволяет расширить возможности BIM, добавляя временные параметры и затраты. Эти технологии ускоряют обработку данных, что способствует более точной визуализации BIM и упрощает работу с инструментами. Например, платформа Autodesk BIM 360 использует ИИ для анализа данных о строительных процессах, что позволяет выявлять потенциальные риски и предлагать решения в режиме реального времени (рис. 1).

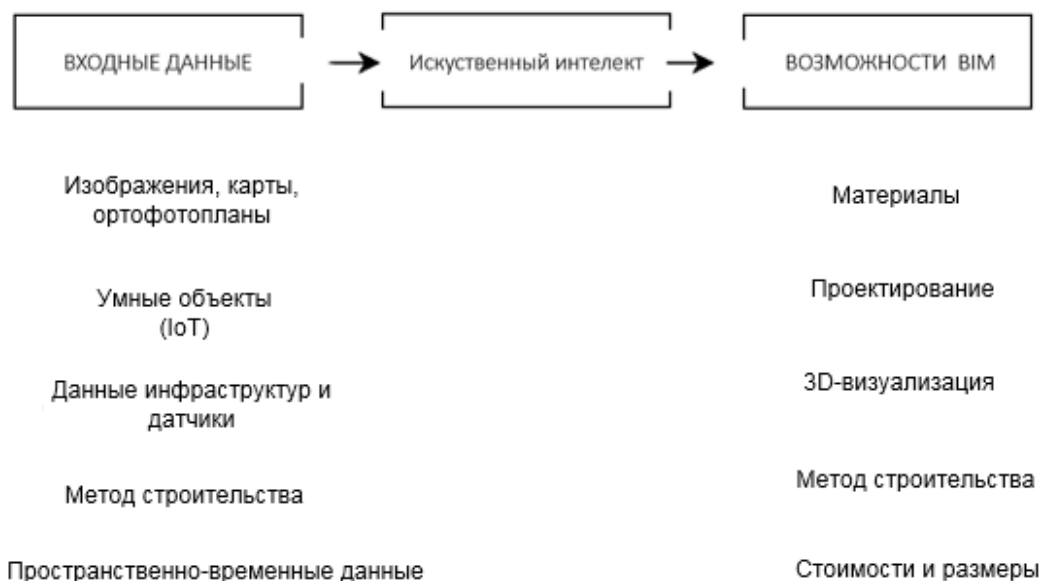


Рис. 1. Схема интеграции и расширения возможностей BIM
Fig. 1. Scheme of integration and expansion of BIM capabilities

ИИ открывает широкие перспективы для управления строительными проектами, предоставляя инновационные инструменты и возможности. Одним из ключевых направлений применения ИИ в строительстве является использование геопространственных данных, информации в реальном времени и исторических данных, что позволяет создавать точные

прогнозы и упрощать управление объектами [7]. С помощью экспертных систем, основанных на искусственном интеллекте, становится возможным проектирование инфраструктуры с учетом ландшафтных особенностей в рамках BIM, что способствует эффективному планированию и составлению графиков. ИИ способен имитировать действия человека-

эксперта, применяя аналогичное представление знаний и методы машинного обучения. Это позволяет воспроизводить когнитивные процессы человека при обработке больших объемов информации.

Данные о затратах, полученные с помощью ИИ, могут быть использованы для обоснования решений в области эксплуатации и технического обслуживания. Все приведенные примеры наглядно демонстрируют то, как искусственный интеллект способствует принятию решений, прогнозированию и планированию. Сотрудничество между различными спе-

циалистами – архитекторами, инженерами, строителями и владельцами индустрии архитектуры, проектирования, строительства и эксплуатации (АЕСО) – становится более эффективным благодаря интеграции данных в технологии информационного моделирования зданий и их использованию на строительных площадках.

Интеграция данных в BIM предоставляет АЕСО доступ к актуальной информации, что способствует более обоснованному принятию решений и улучшению координации между участниками проекта (рис. 2).

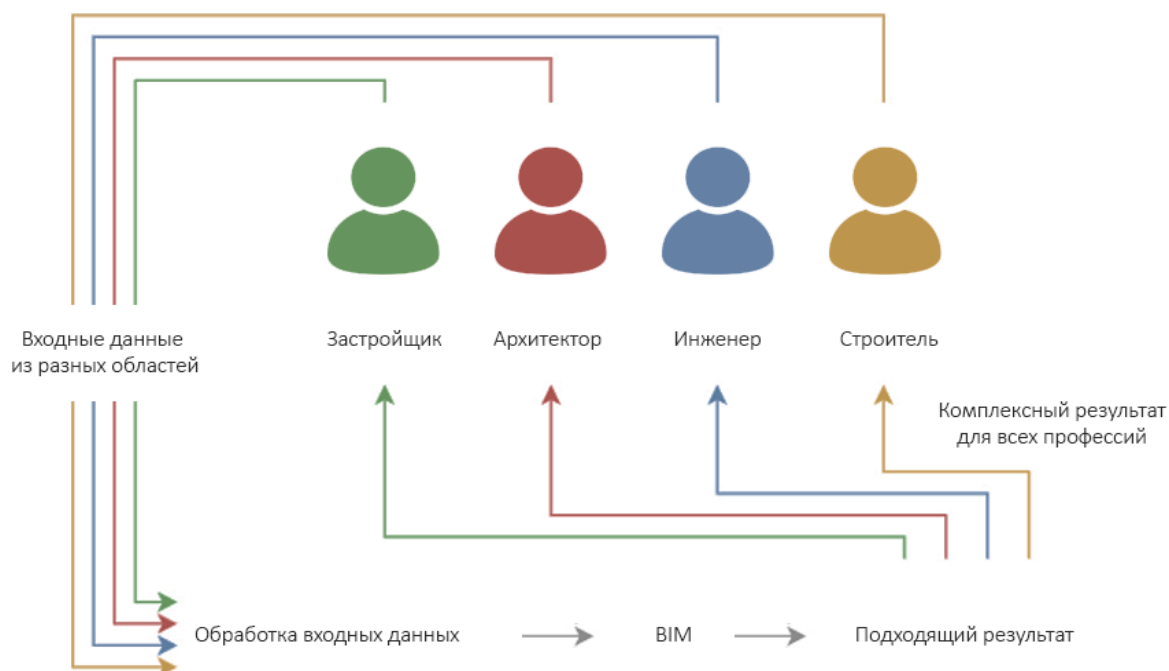


Рис. 2. Сотрудничество между различными командами с BIM
Fig. 2. Collaboration between different BIM teams

Индустрия архитектуры, проектирования, строительства и эксплуатации переживает стремительное развитие, определяемое технологическими достижениями и уроками, извлеченными из пандемии COVID-19. Применение методов ИИ, BIM и интернета вещей (IoT) способствует модернизации отрасли, позволяя создавать более надежные, автоматизированные, самообучающиеся, экономичные и рентабельные процессы на всех этапах жизненного цикла «умного» здания или города.

Концепция цифровых двойников, появившаяся недавно, представляет собой потенциальное решение для оптимизации сектора АЕСО [8, 23], направленное на достижение необходимой киберфизической интеграции. В исследовании, основанном на систематическом обзоре, разрабатываются и предлагаются

теоретические модели, рассматривающие эволюцию цифровых двойников в контексте BIM, передовых технологий, платформ и приложений на всех этапах жизненного цикла проекта.

Концепция BIM активно развивается благодаря технологическим достижениям, что делает ее сопоставимой с подготовкой цифрового двойника. Технология BIM предоставляет возможность для визуальной трехмерной коммуникации, которая может быть использована в рамках цифрового двойника. Кроме того, интеграция BIM и IoT позволяет осуществлять мониторинг в режиме реального времени, создавая активную модель для использования в качестве приложения ДТ в строительной отрасли [9]. Это может быть полезно при выборе материалов, управлении энергопотреблением и выборе поставщиков.

BIM также можно использовать для принятия проектных решений на ранних стадиях, включая анализ осуществимости проекта, энергетический анализ и вопросы устойчивого развития. Это служит руководством для подготовки к строительству.

Благодаря накопленному опыту в области BIM, он стал предметом многочисленных исследований по применению цифровых технологий в отрасли AECO, особенно на начальных этапах жизненного цикла проекта. Наконец несмотря на то, что концепция цифровых двойников обладает значительным потенциалом для улучшения городской среды в целом, моделирование городов представляет собой сложную задачу, поскольку они являются сложными системами, состоящими из динамично взаимодействующих инфраструктур и населения, подверженных влиянию разнообразных внешних факторов, таких как атмосферные, гидрологические, социально-экономические и др.

В контексте исследования и разработки цифровых двойников возникает еще одна серьезная проблема: необходимость создания динамичных и взаимосвязанных веб-сред, объединяющих в себе IoT, BIM и ИИ для обеспечения более эффективной работы, ориентированной на человека. Это особенно актуально для цифровых двойников и ИИ, ориентированного на человека, которые являются ключевыми компонентами интеллектуальной отрасли AECO.

Таким образом, внедрение новых технологий «Индустрии 5.0» может способствовать решению некоторых из этих проблем. В рамках данной программы происходит более слаженное взаимодействие между людьми и роботами, что приводит к острой необходимости гуманизации отрасли, а также к решению проблем устойчивого развития и жизнестойкости. Сочетание цифровых технологий, ИИ и человеко-ориентированных подходов определит будущее отрасли AECO, откроет широкие перспективы для исследований. Это указывает на то, что использование цифровых двойников в строительной отрасли еще находится на начальном этапе и для разработки программы будущих исследований необходимо более глубоко изучить современные передовые технологии.

Во время исследования были рассмотрены теоретические модели, которые описывают эволюцию цифровых двойников в контексте BIM, передовых технологий, платформ и приложений на всех этапах жизненного цикла проекта. Проведенный анализ показал высо-

кий потенциал цифровых двойников как комплексного подхода к планированию, управлению, прогнозированию и оптимизации проектов AECO. Их применение может способствовать достижению большего количества целей устойчивого развития. Однако результаты исследования основаны на теоретических предположениях, которые не были проверены на практике. Концепция исследования служит отправной точкой для дальнейших количественных исследований. Для подтверждения теоретических основ потребуются дополнительные исследования, включая интервью с экспертами и анализ существующих тематических исследований.

Диффузионные модели стали настоящим прорывом в области создания произведений искусства с использованием ИИ. Впервые они были представлены в работе [10], основанные на принципах неравновесной термодинамики. Диффузионные модели опираются на структуру глубокой нейронной сети (DNN), при этом выделяется два ключевых аспекта:

1. Последовательное удаление информации, содержащейся в изображении, методом интеграции белого шума на этапе прямой диффузии.

2. Восстановление удаленной информации на этапе обратной диффузии за счет переобучения DNN.

В результате получается изображение, содержащее часть исходной информации, включая стиль и цвет, а также новую информацию, связанную с тегами, описывающими изображение. Поскольку DNN обучен исключительно на исправлении небольших фрагментов утраченной информации на изображении, подход к генерации данных становится более стабильным и позволяет эффективно решать основную проблему, возникающую при использовании традиционных методов, направленных на создание всего образа с нуля, что часто приводит к сбоям в процессе. Затем этот процесс повторяется с различными уровнями, что позволяет устранить ограничения. Согласно этому процессу глубокая нейронная сеть может восстанавливать только потерянную информацию. Поэтому можно создавать новые изображения в очень низком разрешении, а затем последовательно восстановить их до высокого качества. Данный подход также позволяет глубоким нейронным сетям специализироваться на различных визуальных аспектах в зависимости от уровня разрешения и размера изображения. Например, слои с низким разрешением позволяют анализировать композицию изображения, средние слои

представляют форму объекта, а слои с высоким разрешением – поверхность объекта, материалы и цвета. Эта концепция диффузии впоследствии была использована для разработки архитектур нейронных сетей, способных использовать обратную диффузию (или шумоподавление) для создания высококачественных изображений на основе зашумленных входных данных. В настоящее время данная концепция находит широкое применение не только в области генерации изображений, но и в обработке естественного языка, видео и 3D-моделей, а также в задачах определения позы, моделирования временных рядов и других областях.

Ранее для настройки этих моделей и достижения желаемых результатов требовались специальные знания. Однако более поздние разработки, такие как модель GLIDE от OpenAI, включают кодер, способный принимать произвольное текстовое приглашение пользователя и создавать допустимую кодировку текста. Это может быть использовано в модели connected diffusion. Архитектура, о которой идет речь, включает в себя вторую модель, которая значительно улучшает результаты диффузионной модели. В большинстве современных коммерческих моделей применяется метод контрастного обучения на основе предварительной подготовки изображений, архитектура которого описана в работах [11, 12]. Он отвечает за обучение кодировщика и определение того, как используются текстовые кодировки. Он также привязан к определенным частям изображения в модели пространства.

С этого момента каждая платформа может иметь незначительные различия в модели и архитектуре кодировщика. В данной модели используется кодировщик unClip – двухэтапная модель для генерации изображений по тексту, которая включает в себя кодировщик изображений. Он кодирует текстовые и визуальные данные, объединяя их в единое представление пространства [13].

В ходе исследования, посвященного использованию генеративных языковых моделей в архитектуре, авторы [14] разработали систематическую грамматику для применения DALL-E в процессе создания изображений в контексте городского планирования. Они создали обширный набор изображений, на которых продемонстрировали способность модели генерировать множество реалистичных изображений. Следует обратить внимание, что при попытке создать сложную сцену с большим количеством деталей модель показывает определенные ограничения.

В работе [15] представлен анализ результатов лабораторного исследования, в котором приняли участие 17 студентов-архитекторов. Целью исследования было изучение процесса использования генеративных моделей для создания образов в архитектурном творчестве. Авторы отмечают, что, несмотря на потенциальную полезность результатов исследования, существуют проблемы, с которыми сталкиваются архитекторы при использовании подобных моделей. К ним относятся получение непредвиденных результатов и поиск подходящих подсказок. Результаты масштабных исследований [16] демонстрируют, что для создания качественных подсказок пользователи должны пройти через ряд этапов.

Модели диффузии способны создавать изображения в том стиле, которому они были обучены. Интегрированные модели диффузии, такие как Midjourney и Stable Diffusion, обычно обучаются на обширных базах данных, собранных из интернета. Однако в этих наборах данных недостаточно примеров, относящихся к конкретным задачам, например, к разработке поэтажных планов. Из-за этого модели не могут быть эффективно адаптированы для создания подобных изображений.

Чтобы достичь высококачественных результатов, необходимо специализировать модель для конкретной области применения. Создание такой специализированной модели может оказаться дорогостоящим процессом. Например, для обучения стабильной диффузии на 160 млн изображений [17, 28] требуется 150 000 ч учебного времени. Новое поколение диффузионных моделей позволяет усовершенствовать эти интегрированные модели с помощью небольшого количества примеров для новой предметной области, что называется точной настройкой или обучением с помощью нескольких шагов. Для этого существуют различные подходы. Один из них заключается в повторном обучении всей диффузионной модели на основе нового набора данных и уточнении весов в глубокой нейронной сети. Это создает вариант исходной федеративной диффузионной модели, которая имеет тот же размер, что и исходная сеть, и требует значительных вычислительных затрат для уточнения всех весовых коэффициентов в DNN. Для предотвращения этого в других подходах вводятся новые уровни в модель федеративной диффузии, при этом изменяется только их вес. Этот метод позволяет уменьшить размер модели и ускорить процесс обучения. Исходная федеративная модель остается неизменной, требуется лишь тонкая настройка меньшего количества

параметров. Дополнительные слои позволяют моделям осваивать новые функции, такие как преобразование контурных набросков в полноценные изображения. Окончательный подход к точной настройке модели заключается не в изменении самой DNN, а в модификации входного вектора из приглашения. Текстовое приглашение, передаваемое в diffusion model, необходимо преобразовать в числовой вектор, который будет использоваться в качестве входного слоя для DNN [18]. В процессе точной настройки значения этого вектора для встраивания слов изменяются. Этот процесс называется текстовой инверсией. Преимущество этого подхода заключается в его высокой

скорости обучения и получении в результате небольшой, точно настроенной модели, содержащей только измененный вектор для встраивания слов.

Одна из целей данной статьи заключается в определении того, каким образом инструменты генеративного ИИ могут быть полезны практикующим специалистам в их повседневной работе над проектами, а также возможного использования в BIM.

Идеализированные рабочие процессы, которые наиболее полно раскрывают потенциал инструментов генеративного ИИ в процессе проектирования, представлены на рис. 3.



Рис. 3. Концепция идеального интегрированного рабочего процесса для проектирования с применением искусственного интеллекта
Fig. 3. The concept of an ideal integrated workflow for AI-enabled design

В рамках данного рабочего процесса проектировщик использует текстовый интерфейс или интерфейс преобразования речи в текст для указания ключевых слов, описывающих целевой дизайн.

В качестве альтернативы пользователь может составить приблизительный план, чтобы представить общую форму более сложных задач планирования. Система ИИ уточняет эти исходные данные, формируя вопросы для сбора дополнительных требований и прояснения неопределенностей в диалоге с пользователем. Эти требования могут включать в себя функциональные, нефункциональные, стилистические или вычислительные ограничения. Затем система генерирует несколько вариантов дизайна, используя объединенную модель, проверяет и ранжирует их, позволяя пользователю выбрать наилучший вариант. Итоговый дизайн должен быть экспортирован в BIM-модель, которую пользователь сможет легко импортировать в свои инструменты для дальнейшего использования.

Данный рабочий процесс основан на общих принципах работы с диффузионными моделями. Он также может быть полезен в области гражданского строительства, поскольку предоставляет пользователю несколько способов управления процессом проектирования, начиная с определения и уточнения требований и заканчивая редактированием деталей модели. Современные модели диффузии уже способны генерировать планы, а результаты могут быть значительно улучшены за счет тонкой настройки.

Предложенное семантическое кодирование позволило повысить достоверность сгенерированных значений.

Однако некоторые недостатки современных моделей диффузии связаны с отсутствием семантического понимания, из-за чего генеративные планы требуют ручной доработки проектировщиками. ИИ можно использовать для анализа данных с датчиков, собираемых системами мониторинга состояния конструкций (SHM) в режиме реального времени. Это

позволяет заблаговременно выявлять потенциальные проблемы и своевременно проводить техническое обслуживание и ремонт. Ключевым технологическим решением для достижения этих целей является мониторинг состояния конструкций [26].

Эта система разработана для упрощения перехода от традиционного выявления повреждений к более оперативной оценке состояния в режиме реального времени.

Следовательно, SHM представляет собой стратегию, позволяющую осуществлять длительное наблюдение за состоянием конструкции с помощью различных устройств для непрерывного измерения. Реакцию зданий на различные воздействия можно прогнозировать без необходимости каждый раз проводить сложные симуляции.

Это позволит быстрее и эффективнее отслеживать их состояние, особенно в районах, подверженных землетрясениям или сильным ветрам. С помощью такого моделирования инженеры могут с высокой точностью определять фактическое поведение здания.

Таким образом, проблемы можно выявлять на ранней стадии. Эта модель помогает поддерживать безопасность зданий в течение

длительного времени, поскольку она способна справляться с новыми и непредвиденными ситуациями.

Такой подход позволяет инженерам лучше обслуживать здания, снижая риск пропуска структурных проблем. Интеграция этой модели в системы мониторинга стала бы надежным и практичным способом защиты высотных зданий.

Эффективность машинного обучения для приложений SHM особенно важна в решении двух важнейших задач: доступности данных и интерпретируемости модели. Интеграция параметрического моделирования, анализа методом конечных элементов и MOGA обеспечила качество набора данных.

Использование нейронных сетей Long Short-Term Memory – один из типов рекуррентных нейронных сетей, которые используются для анализа текста, звука, видео и другой информации, имеющей последовательную структуру, известных своей способностью обрабатывать данные временных рядов, обеспечило большую интерпретируемость по сравнению с более сложными моделями, такими как глубокие сверточные нейронные сети.

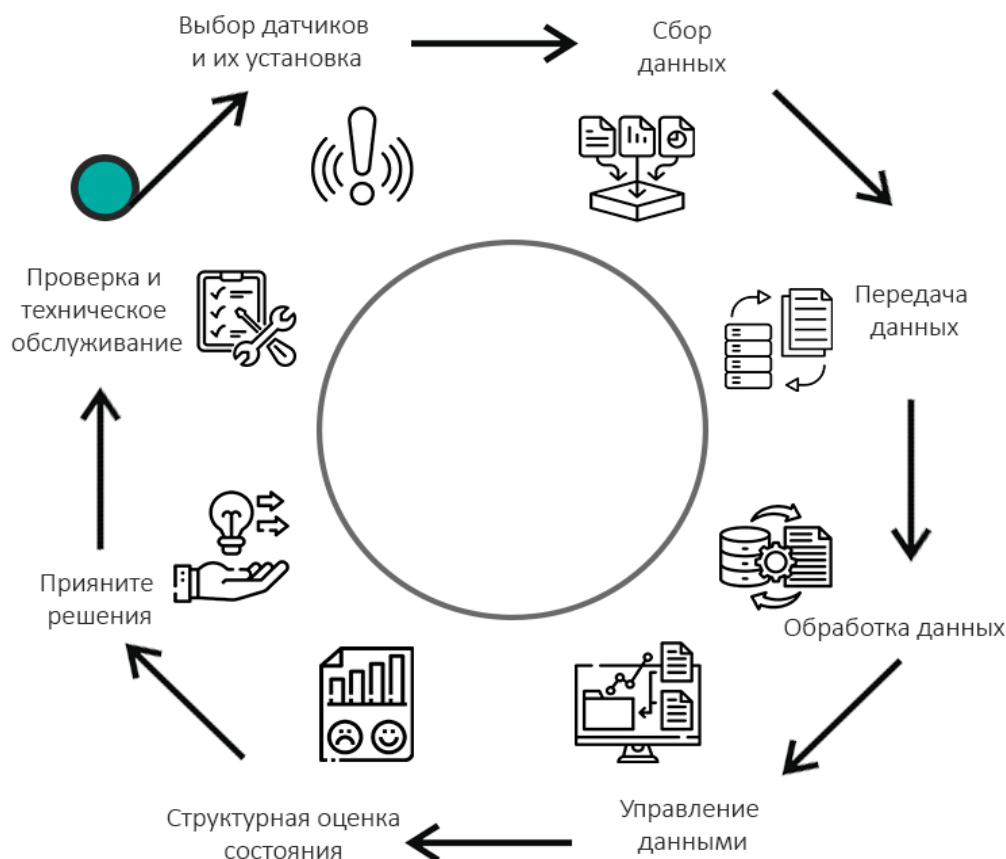


Рис. 4. Типичные компоненты мониторинга работоспособности структуры
Fig. 4. Typical components of structure health monitoring

Это передовые нейронные сети, которые используют несколько слоев сверточных операций для автоматического обучения и извлечения признаков из структурированных данных, таких как изображения.

По мере развития сенсорных технологий, методов анализа методом конечных элементов и алгоритмов машинного обучения будут появляться более сложные системы сверточных нейронных сетей, обеспечивающие безопасность и устойчивость высотных зданий в городской среде.

Система управления проектами на основе BIM также позволяет изменять важную информацию. Для улучшения взаимодействия между командами можно добавить другие технологии, например, веб-платформу BIM для доступа к важной информации и обмена ею в режиме реального времени.

Для обновления BIM требуются специальные знания, если пользователь допустит ошибку, неверная информация может быть передана другим командам. Поэтому для упрощения процесса добавления новой информации в модель используется программирование на естественном языке [29].

Процессы BIM и цифрового моделирования являются отличной поддержкой, упрощающей процесс и коммуникацию между различными командами в отсутствие квалифицированных специалистов или системы мониторинга.

Растущая эффективность обработки данных по мере их постепенной интеграции в процесс BIM позволяет предположить, что это улучшит совместную работу.

Более тесная интеграция таких технологий, как IoT, виртуальная реальность, ИИ и облачные хранилища, может обеспечить более глубокое понимание возможностей для улучшения управления геопространственными данными и «умными» зданиями. Новые технологии и их автоматизация упрощают разработку BIM и ее интеграцию. Они включают в себя широкий спектр методологий и подходов, использующих достижения в нескольких областях исследований.

Сочетание нескольких технологий может привести к снижению энергетических и финансовых затрат, а также экономии времени при реализации проектов.

Технология BIM использует передовые компьютерные технологии для повышения уровня проектирования в строительной от-

расли, сокращая при этом затраты на строительство и потребление энергии. Она требует большей вычислительной мощности, что влечет за собой дополнительные расходы.

Первоначальные затраты выгодны для отрасли, особенно в долгосрочной перспективе, поскольку позволяют ограничить колебания затрат на будущих этапах строительства и сократить ненужные расходы, что ускоряет реализацию проекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеграция ИИ и машинного обучения в AECO открывает новые горизонты для проектирования, строительства и эксплуатации зданий в эпоху «Индустрии 5.0».

Применение нейронных сетей и алгоритмов оптимизации, таких как PSO, в сочетании с BIM позволяет создавать цифровые двойники, которые не только отражают физические характеристики объектов, но и адаптируются к динамическим условиям эксплуатации.

Например, нейронные сети демонстрируют высокую эффективность в прогнозировании нагрузок на конструкции и оптимизации энергопотребления, в то время как PSO обеспечивает поиск оптимальных архитектурных решений, сокращая время проектирования на 20–30 %.

Внедрение IoT-устройств и систем мониторинга состояния конструкций в режиме реального времени значительно повышает безопасность и устойчивость зданий.

Цифровые двойники, обогащенные данными с датчиков, позволяют прогнозировать износ материалов, предотвращать аварии и оптимизировать техническое обслуживание. Например, в проектах умных городов использование BIM с интеграцией ИИ сократило затраты на эксплуатацию инфраструктуры на 15–25 % за счет автоматизации процессов анализа данных.

Сверточные нейронные сети могут использоваться в качестве инструмента, формирующего подходящие проектные решения, которые могут дать определенную вариативность планов и структур зданий. Однако дальнейшее развитие этих технологий требует решения таких вызовов, как стандартизация данных, обеспечение кибербезопасности и обучение специалистов.

Перспективным направлением является комбинирование генеративного дизайна, глубокого обучения и облачных вычислений для создания самообучающихся систем, способ-

ных адаптироваться к изменениям климата и социальным потребностям. Таким образом, синтез ИИ, машинного обучения, BIM и IoT формирует основу для перехода к интеллектуальному, устойчивому и человеко-

ориентированному строительству, соответствующему принципам «Индустрии 5.0». Это не только повышает эффективность отрасли, но и способствует созданию безопасной и комфортной среды для будущих поколений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Костюнина Т.Н. Технологии искусственного интеллекта в задачах BIM // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры. Материалы II Международной научно-практической конференции (г. Санкт-Петербург, 15–17 мая 2019 г.). СПб, 2019. С. 80–85. <https://doi.org/10.23968/BIMAC.2019.014>. EDN: KAYEKZ.
2. Anjum A., Hrairi M., Aabid A., Yatim N., Ali M. Civil Structural Health Monitoring and Machine Learning: A Comprehensive Review // *Fracture and Structural Integrity*. 2024. Vol. 18. Iss. 69. P. 43–59. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.69.04>.
3. Bishop Ch.M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer: New York City, 2006. 746 p.
4. Mannino A., Claudio Dejaco M., Re Cecconi F. Building Information Modelling and Internet of Things Integration for Facility Management – Literature Review and Future Needs // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 7. P. 1–25. <https://doi.org/10.3390/app11073062>.
5. Alavi H., Gordo-Gregorio P., Forcada N., Bayramova A., Edwards D.J. AI-Driven BIM Integration for Optimizing Healthcare Facility Design // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Iss. 8. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/buildings14082354>.
6. Halawa F., Madathil S.C., Khasawneh M.T. Integrated Framework of Process Mining and Simulation–Optimization for Pod Structured Clinical Layout Design // *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 185. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115696>.
7. Rakha T., Gorodetsky A. Review of Unmanned Aerial System (UAS) Applications in The Built Environment: Towards Automated Building Inspection Procedures Using Drones // *Automation in Construction*. 2018. Vol. 93. P. 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.002>.
8. Alizadehsalehi S., Hadavi A., Huang J.C. From BIM to Extended Reality in AEC Industry // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 116. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103254>.
9. Ammar A., Nasserredine H., Abdulbaky N., Aboukansour A., Tannoury J., Urban H. et al. Digital Twins in the Construction Industry: A Perspective of Practitioners and Building Authority // *Frontiers in Built Environment*. 2022. Vol. 8. P. 1–23. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.834671>.
10. Gal R., Alaluf Yu., Atzmon Yu., Patashnik Or, Bermano A.H., Chechik G. et al. An Image is Worth One Word: Personalizing Text-to-Image Generation using Textual Inversion // *ICLR*. 2023. P. 1–31. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.01618>.
11. Radford A., Jong Wook Kim, Hallacy Ch., Ramesh A., Goh G., Agarwal S. et al. Learning Transferable Visual Models from Natural Language Supervision // *Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning*. 2021. Vol. 139. P. 1–16.
12. Ramesh A., Pavlov M., Goh G., Gray S., Voss Ch., Radford A. et al. Zero-Shot Text-to-Image Generation // *PMLR*. 2021. P. 8821–8831. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.12092>.
13. Ramesh A., Dhariwal P., Nichol A., Chu C., Chen M. Hierarchical Text-Conditional Image Generation with CLIP Latents // *Cornell University Arxiv*. 2022. Vol. 1. Iss. 2. P. 1–27. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.06125>.
14. Seneviratne S., Senanayake D., Rasnayaka S., Vidanaarachchi R., Thompson J. DALLE-URBAN: Capturing The Urban Design Expertise of Large Text to Image Transformers // *2022 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications*. 2022. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/DICTA56598.2022.10034603>.
15. Paananen V., Oppenlaender J., Aku Visuri Using Text-to-Image Generation for Architectural Design Ideation // *International Journal of Architectural Computing*. 2024. Vol. 22. Iss. 3. P. 458–474. <https://doi.org/10.1177/14780771231222783>.
16. Ploennigs J., Berger M. AI Art in Architecture // *AI in Civil Engineering*. 2023. Vol. 2. P. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s43503-023-00018-y>.
17. Carlini N., Hayes J., Nasr M., Jagielski M., Sehwag V., Tramèr F. et al. Extracting Training Data from Diffusion Models // *32nd USENIX Security Symposium*. 2023. P. 5253–5270. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.13188>.
18. Ruiz N., Li Yu., Jampani V., Pritch Y., Rubinstein M., Aberman K. DreamBooth: Fine Tuning Text-to-Image Diffusion Models for Subject-Driven Generation // *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2023. P. 22500–22510. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.12242>.
19. Бамбетова К.В., Кабжихов А.А. Преимущества использования искусственного интеллекта в сфере строительства // *Вопросы науки и образования*. 2021. № 7. С. 32–34. EDN: WUYZDS.

20. Колчин В.Н. Специфика применения технологии «искусственного интеллекта» в строительстве // Инновации и инвестиции. 2022. № 3. С. 250–253. EDN: JJLECU.
21. Аманаков А.Х., Мурадова А.О., Сейдов А.И. Роль искусственного интеллекта в архитектурном проектировании: современные тенденции и перспективы // Вестник науки. 2024. Т. 2. № 4. С. 616–619. EDN: HCAAAXA.
22. Жилин В.В., Сафарьян О.А. Искусственный интеллект в системах хранения данных // Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20. № 2. С. 196–200. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-196-200>. EDN: JIQSQI.
23. Салех М.С. Внедрение цифровых методов на различных этапах архитектурного проектирования // Архитектура и современные информационные технологии. 2021. № 1. С. 268–278. <https://doi.org/10.24412/1998-4839-2021-1-268-278>. EDN: SKZHER.
24. Касьянов Н.В. Архитектура в контексте развития искусственного интеллекта // Современная архитектура мира. 2020. № 2. С. 23–48. <https://doi.org/10.25995/NIITIAG.2020.15.2.002>. EDN: FAWSUP.
25. Rombach R., Blattmann A., Lorenz D., Esser P., Ommer B. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models // 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2022. P. 10674–10685. <https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.01042>.
26. Xiang Lisa Li, Percy Liang Prefix-Tuning: Optimizing Continuous Prompts for Generation // Proceedings of the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing. 2021. Vol. 1. P. 4582–4597. <https://doi.org/10.18653/v1/2021.acl-long.353>.
27. Huang Weixin., Zheng Hao Recognition and Generation of Architectural Drawings Using Machine Learning // Proceedings of the 38th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture. 2018. P. 18–20. <https://doi.org/10.52842/conf.acadia>.
28. Taesung Park, Ming-Yu Liu, Ting-Chun Wang, Jun-Yan Zhu Semantic Image Synthesis with Spatially-Adaptive Normalization // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019. P. 2332–2341. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00244>.
29. Fürst A., Rumetshofer E., Tran V.T., Ramsauer H., Tang F., Lehner J. et al. CLOOB: Modern Hopfield Networks with InfoLOOB Outperform CLIP // ICLR 2022. 2022. P. 1–45.

REFERENCES

1. Kostyunina T.N. Artificial Intelligence Technologies in BIM Tasks. In: *BIM-modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury. Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = BIM Modeling in Construction and Architecture. Proceedings of The II International Scientific and Practical Conference*. 15–17 May 2019, Saint Petersburg. Saint Petersburg; 2019. p. 80–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/BIMAC.2019.014>. EDN: KAYEKZ.
2. Anjum A., Hrairi M., Aabid A., Yatim N., Ali M. Civil Structural Health Monitoring and Machine Learning: A Comprehensive Review. *Fracture and Structural Integrity*. 2024;18(69):43-59. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.69.04>.
3. Bishop Ch.M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer: New York City, 2006. 746 p.
4. Mannino A., Claudio Dejacco M., Re Cecconi F. Building Information Modelling and Internet of Things Integration for Facility Management – Literature Review and Future Needs. *Applied Sciences*. 2021;11(7):1-25. <https://doi.org/10.3390/app11073062>.
5. Alavi H., Gordo-Gregorio P., Forcada N., Bayramova A., Edwards D.J. AI-Driven BIM Integration for Optimizing Healthcare Facility Design. *Buildings*. 2024;14(8):1-15. <https://doi.org/10.3390/buildings14082354>.
6. Halawa F., Madathil S.C., Khasawneh M.T. Integrated Framework of Process Mining and Simulation–Optimization for Pod Structured Clinical Layout Design. *Expert Systems with Applications*. 2021;185:1-17. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115696>.
7. Rakha T., Gorodetsky A. Review of Unmanned Aerial System (UAS) Applications in The Built Environment: Towards Automated Building Inspection Procedures Using Drones. *Automation in Construction*. 2018;93:252-264. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.002>.
8. Alizadehsalehi S., Hadavi A., Huang J.C. From BIM to Extended Reality in AEC Industry. *Automation in Construction*. 2020;116:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103254>.
9. Ammar A., Nasserredine H., Abdulbaky N., Aboukansour A., Tannoury J., Urban H. et al. Digital Twins in the Construction Industry: A Perspective of Practitioners and Building Authority. *Frontiers in Built Environment*. 2022;8:1-23. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.834671>.
10. Gal R., Alaluf Yu., Atzmon Yu., Patashnik Or, Bermano A.H., Chechik G. et al. An Image is Worth One Word: Personalizing Text-to-Image Generation using Textual Inversion. *ICLR*. 2023:1-31. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.01618>.
11. Radford A., Jong Wook Kim, Hallacy Ch., Ramesh A., Goh G., Agarwal S. et al. Learning Transferable

- Visual Models from Natural Language Supervision. *Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning*. 2021;139:1-16.
12. Ramesh A., Pavlov M., Goh G., Gray S., Voss Ch., Radford A. et al. Zero-Shot Text-to-Image Generation. *PMLR*. 2021:8821-8831. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.12092>.
13. Ramesh A., Dhariwal P., Nichol A., Chu C., Chen M. Hierarchical Text-Conditional Image Generation with CLIP Latents. *Cornell University Arxiv*. 2022;1(2):1-27. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.06125>.
14. Seneviratne S., Senanayake D., Rasnayaka S., Vidanaarachchi R., Thompson J. DALLÉ-URBAN: Capturing The Urban Design Expertise of Large Text to Image Transformers. *2022 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications*. 2022:1-9. <https://doi.org/10.1109/DICTA56598.2022.10034603>.
15. Paananen V., Oppenlaender J., Aku Visuri Using Text-to-Image Generation for Architectural Design Ideation. *International Journal of Architectural Computing*. 2024;22(3):458-474. <https://doi.org/10.1177/14780771231222783>.
16. Ploennigs J., Berger M. AI Art in Architecture. *AI in Civil Engineering*. 2023;2:1-11. <https://doi.org/10.1007/s43503-023-00018-y>.
17. Carlini N., Hayes J., Nasr M., Jagielski M., Sehwag V., Tramèr F. et al. Extracting Training Data from Diffusion Models. *32nd USENIX Security Symposium*. 2023:5253-5270. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.13188>.
18. Ruiz N., Li Yu., Jampani V., Pritch Y., Rubinstein M., Aberman K. DreamBooth: Fine Tuning Text-to-Image Diffusion Models for Subject-Driven Generation. *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2023:22500-22510. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.12242>.
19. Bambetova K.V., Kabzhikhov A.A. Benefits of Using Artificial Intelligence in Construction. *Voprosy nauki i obrazovaniya*. 2021;7:32-34. (In Russ.). EDN: WUYZDS.
20. Kolchin V.N. The Specifics of the Use of "Artificial Intelligence" Technology in Construction. *Innovation & Investment*. 2022;3:250-253. (In Russ.). EDN: JJLECU.
21. Amanakov A.Kh., Muradova A.O., Seidov A.I. Role of Artificial Intelligence in Architectural Design: Current Trends and Prospects. *Vestnik nauki*. 2024;2(4):616-619. (In Russ.). EDN: HCAAXA.
22. Zhilin V.V., Safaryan O.A. Artificial Intelligence in Data Storage Systems. *Vestnik of Don State Technical University*. 2020;20(2):196-200. (In Russ.). <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-196-200>. EDN: JIQSQI.
23. Saleh M.S. Implementation of Digital Methods at Different Stages of Architectural Design. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2021;1:268-278. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1998-4839-2021-1-268-278>. EDN: SKZHER.
24. Kasyanov N.V. Architecture in The Context of the Development of Artificial Intelligence. *Sovremennaya arkhitektura mira*. 2020;2:23-48. (In Russ.). <https://doi.org/10.25995/NIITIAG.2020.15.2.002>. EDN: FAWSUP.
25. Rombach R., Blattmann A., Lorenz D., Esser P., Ommer B. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models. *2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2022:10674-10685. <https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.01042>.
26. Xiang Lisa Li, Percy Liang Prefix-Tuning: Optimizing Continuous Prompts for Generation. *Proceedings of the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing*. 2021;1:4582-4597. <https://doi.org/10.18653/v1/2021.acl-long.353>.
27. Huang Weixin., Zheng Hao Recognition and Generation of Architectural Drawings Using Machine Learning. *Proceedings of the 38th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture*. 2018:18-20. <https://doi.org/10.52842/conf.acadia>.
28. Taesung Park, Ming-Yu Liu, Ting-Chun Wang, Jun-Yan Zhu Semantic Image Synthesis with Spatially-Adaptive Normalization. *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019:2332-2341. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00244>.
29. Fürst A., Rumetshofer E., Tran V.T., Ramsauer H., Tang F., Lehner J. et al. CLOOB: Modern Hopfield Networks with InfoLOOB Outperform CLIP. *ICLR 2022*. 2022:1-45.

Информация об авторах

Пичугов Павел Алексеевич,
аспирант,
Южно-Уральский государственный университет,
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76,
Россия,
e-mail: pichugovp@yandex.ru

Information about the authors

Pavel A. Pichugov,
Postgraduate Student,
South Ural State University,
76 Lenin Ave., Chelyabinsk 454080,
Russia,
e-mail: pichugovp@yandex.ru

Шабиев Салават Галиевич,
доктор архитектуры, профессор,
заведующий кафедрой архитектуры,
Южно-Уральский государственный университет,
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76,
Россия,
✉ e-mail: shabievsg@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9405-2079>
Author ID: 476175

Salavat G. Shabiev,
Doctor of Architecture, Professor,
Head of the Department of Architecture,
South Ural State University,
76 Lenin Ave., Chelyabinsk 454080,
Russia,
✉ e-mail: shabievsg@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9405-2079>
Author ID: 476175

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 28.03.2025.
Одобрена после рецензирования 25.04.2025.
Принята к публикации 28.04.2025.

Information about the article

The article was submitted 28.03.2025.
Approved after reviewing 25.04.2025.
Accepted for publication 28.04.2025.

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей, читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации.

Журнал «Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость» публикует научные статьи и обзоры российских и зарубежных ученых, в том числе докторантов и аспирантов, содержащие новые результаты научных исследований.

Тематический охват соответствует утвержденной номенклатуре научных специальностей:

- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки);
- 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки);
- 2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки);
- 2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);
- 2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки);
- 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки);
- 2.1.9. Строительная механика (технические науки);
- 2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки);
- 2.1.11. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура);
- 2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура);
- 2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)
- 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки)
- 5.2.6. Менеджмент (экономические науки)

Представляемая в журнал работа должна быть законченным научным исследованием и содержать новые научные результаты, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

Статьи должны быть выполнены на высоком научном уровне и содержать результаты исследований по соответствующей проблематике. Рукопись, присылаемая в редакцию, должна соответствовать тематике журнала и требованиям редакции к оформлению рукописей.

1. Материалы, представляемые авторами в редакцию:

- Статья в печатном виде и идентичном варианте в электронной форме (с расширением *.docx и *.pdf);
- Иллюстрации к статье (рисунки, графики и т.д.) в электронном виде (в формате jpg);
- Авторское заявление;
- Сопроводительное письмо;
- Договор;
- Экспертное заключение.

2. Рукопись должна быть построена следующим образом:

- **Шифр УДК;**
- **Название статьи;**
- **Информация об авторах:** фамилия, имя, отчество; название учреждения;
- **Реферат (аннотация)** – количество слов – 190;
- **Ключевые слова** – (4–6);
- **Библиографические ссылки** должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р7.05 2008.
- **Критерии авторства, конфликт интересов;**
- **Сведения об авторах:** фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень, звание и должность; название учреждения, его адрес с индексом; e-mail; ORCID, ID.
- **Название рубрики**, в которой должна быть размещена статья.

3. Рекомендации по набору и оформлению текста

Параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 0,6 см; ориентация – книжная;

Шрифт – *Arial*, размер – 10,5, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический.

При вставке формул использовать *Microsoft Equation 3* при установках: элементы формулы выполняются – курсивом; для греческих букв и символов назначать шрифт *Symbol*, для остальных элементов – *Arial*.

Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул.

Рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, *B&W* – для черно-белых иллюстраций, *Grayscale* – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 170 мм, высота 245 мм. Рисунки должны быть представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Схемы, графики выполняются во встроенной программе *MS Word* или в *MS Excel*, с приложением файлов.

Для построения графиков и диаграмм следует использовать программу *Microsoft Office Excel*. Каждый рисунок вставляется в текст как объект *Microsoft Office Excel*.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

Для авторов / For authors

Статьи направляются в редакцию журнала по электронной почте izv_isn@istu.edu.

Рукописи статей и оригиналы всех необходимых документов предоставляются по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, редакционный отдел, ауд. Д-215, О.В. Никишиной

Телефон: (3952) 40-56-11, с.т.: 8 964 656 46 70 – Никишина Ольга Валерьевна, ответственный за выпуск,

(3952) 40-52-74 – Маркина Ирина Павловна, редактор.

**ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ
ИНВЕСТИЦИИ. СТРОИТЕЛЬСТВО. НЕДВИЖИМОСТЬ**

Научный журнал

12+

Том 15 № 3 (54)

Главный редактор В.В. Пешков
Ответственный за выпуск О.В. Никишина
Дизайн и макет издания Е.В. Хохрина
Перевод и верстка О.В. Никишиной
Редактор И.П. Маркина

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство ПИ № ФС77-62787 от 18 августа 2015 г.

Выход в свет 29.09.2025. Формат 60 x 90 / 8 (А4).
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 28,50.
Тираж 500 экз. Зак. 85. Поз. плана бн.

Издание распространяется бесплатно

ФГБОУ ВО "Иркутский национальный исследовательский технический университет"
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный исследовательский технический университет"
Адрес типографии: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А
