



# СТРОИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 2010 г.

CONSTRUCTION  
PRODUCTION

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

№2  
2025

Рекомендован высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки РФ  
для публикации научных работ, отражающих основное содержание диссертаций

Журнал включён в Российский индекс  
научного цитирования (РИНЦ)



## Лапидус Азарий Абрамович

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**АБРАМОВ И. Л.** – д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
**АШИХМИН О. В.** – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»  
**АШРАПОВ А. Х.** – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»  
**ГУРЬЕВА В. А.** – д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»  
**ЗЕЛЕНЦОВ Л. Б.** – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»  
**ИБРАГИМОВ Р. А.** – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»  
**ИГНАТЬЕВ А. А.** – канд. техн. наук, доцент, ФАУ «РОСДОРНИИ», Управление развития отраслевого образования  
**КАЗАКОВ Д. А.** – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
**КОНДРАТЬЕВ В. А.** – канд. техн. наук, доцент, Самаркандский государственный архитектурно-строительный институт им. Мирзо Улугбека, Узбекистан  
**КОРОБКОВ С. В.** – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»  
**КРОКОВ К. М.** – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»  
**КУЗИНА О. Н.** – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
**КУЗЬМИНА Т. К.** – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
**ЛЕОНОВИЧ С. Н.** – д-р техн. наук, профессор, Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь  
**ЛОГАНИНА В. И.** – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»  
**МАИЛЯН Л. Р.** – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»  
**МАЛАЕВ В. Ф.** – канд. техн. наук, доцент, Ливанский Университет, факультет Искусств и Архитектуры, Ливанская Республика  
**МАКАРОВ К. Н.** – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет»  
**МЕНЕЙЛОК А. И.** – д-р техн. наук, профессор, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Республика Украина  
**МОЛОДИН В. В.** – д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет» (Сибстрин)  
**МОНДРУС В. Л.** – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
**МОРОЗЕНКО А. А.** – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
**ОЛЕЙНИК П. П.** – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
**ПИКУС Г. А.** – канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет»  
**ПОПОВА О. Н.** – канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова»  
**РЫБАКОВА А. О.** – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
**САБИТОВ Л. С.** – д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»  
**СУЛЕЙМАНОВА Л. А.** – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова»  
**ТАМРАЗЯН А. Г.** – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
**ТЕР-МАРТИРОСЯН А. З.** – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
**ФЕДОСОВ С. В.** – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
**ФЕДЮК Р. С.** – д-р техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»  
**ФОМИН Н. И.** – канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»  
**ХАВИН Д. В.** – д-р эконом. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
**ЦОПА Н. В.** – д-р эконом. наук, профессор, ФГOU ВO «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Академия строительства и архитектуры  
**ЭКЛЕР Н. А.** – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова»  
**ЮДИНА А. Ф.** – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»  
**ЮСУПОВ Х. И.** – канд. техн. наук, профессор, Ташкентский архитектурно-строительный университет, Узбекистан

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРОИТЕЛЬСТВА МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ: ОПЫТ ТУРКМЕНИСТАНА</b> Лапидус А. А., Аразов Б., Черкезова Г. . . . .	3
<b>АНАЛИЗ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩЕЙ ПРОЦЕСС ОБСЛЕДОВАНИЯ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ</b> Топчий Д. В., Вишневский А. Ю. . . . .	9
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ РИСКА НА СТОИМОСТЬ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ ИРАКА</b> Кабанов В. Н., Аль-Джубури Х. А. М. С. . . . .	16
<b>ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА РИСКОВ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АЭС</b> Енговатов И. А., Морозенко А. А., Альшрайдех М. . . . .	22
<b>РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ВЕРИФИКАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА</b> Железнов М. М., Монахов Б. Е., Адамцевич Л. А., Осташев Р. В., Феттер М. Г. . . . .	31
<b>ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА СКЛАДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ</b> Лапидус А. А., Кардава А. М.. . . . .	39
<b>АДАПТАЦИЯ БЕРЕЖЛИВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ДЛЯ ПРОЕКТОВ ВЫСОТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В РОССИИ</b> Огидан О. Т. . . . .	45
<b>НАУЧНЫЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ МОНТАЖНОЙ БЛОЧНОСТИ ЗДАНИЯ РЕАКТОРА АЭС С ВВЭР</b> Морозенко А. А., Баукин А. В. . . . .	50
<b>АКТУАЛЬНОСТЬ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТ ПО УСТРОЙСТВУ НФС НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ И МИРОВОЙ ЭКОНОМИКИ</b> Топчий Д. В., Гришин К. С. . . . .	54
<b>ПУТИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПРОЕКТОВ РАЗРАБОТКИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ</b> Грахов В. П., Ворона В. Г. . . . .	58
<b>РЕКОНСТРУКЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ: КОЭФФИЦИЕНТ ФРОНТА РАБОТ</b> Кабанов В. Н., Ляховский К. А.. . . . .	63
<b>МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ИНЖЕНЕРНЫХ ДАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ</b> Железнов М. М., Адамцевич Л. А., Монахов Б. Е., Казаков С. Д., Феттер М. Г. . . . .	70
<b>ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАБОРА ТРЕБУЕМОЙ ПРОЧНОСТИ КЛЕЕВОГО АНКЕРА НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТНОГО КЛЕЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ</b> Непомнящев Г. А.. . . . .	76
<b>ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СМОНТИРОВАННЫХ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ</b> Перунов А. С., Шаргородская О. В. . . . .	83
<b>ИННОВАЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ</b> Малышева К. А., Шабаев Ю. Р. . . . .	89
<b>ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ</b> Топчий Д. В., Чупракова Е. П. . . . .	92

<b>АНАЛИЗ ПОДХОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С УЧЁТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭТАПОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТА</b>	97
Саввин Н. Ю., Овсянников Ю. Г., Феоктистов А. Ю., Алифанова А. И. . . . .	
<b>РЕСУРСНО-ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД ПРИ РЕМОНТНЫХ РАБОТАХ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА БАШЕННОГО ТИПА</b>	105
Абдуллаев Э. Ю., Сабитов Л. С., Гарькин И. Н., Закирова М. А. . . . .	
<b>РАСЧЁТ ТЕРМОНАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ БЕТОНИРОВАНИИ НИЖНЕЙ ПЛИТЫ КОРОБЧАТОГО ФУНДАМЕНТА ЗДАНИЯ «БАШНЯ МФК «ЛАХТА ЦЕНТР»»</b>	111
Никифоров С. В., Травуш В. И., Семёнов К. В. . . . .	
<b>ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНОЙ И ТРАДИЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА</b>	118
Галишникова В. В., Коренева А. И. . . . .	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ ТРУДА НА РАЗРАБОТКУ РАБОЧЕЙ ДОКУМЕНТАЦИИ РАЗДЕЛА «КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ»</b>	128
Коротеев Д. Д., Максименко Р. В. . . . .	
<b>АНАЛИЗ СРОКОВ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО КАПИТАЛЬНОМУ РЕМОНТУ</b>	132
Кузьмина Т. К., Бабушкина Д. Д., Федорова У. А., Касьянов Д. С., Сухоруков А. Е. . . . .	
<b>КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДУЛЬНЫХ И КЛАССИЧЕСКИХ НАВЕСНЫХ ФАСАДНЫХ СИСТЕМ</b>	140
Сабитов Л. С., Волков М. Ю. . . . .	
<b>АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ПОТЕНЦИАЛ ВНЕДРЕНИЯ В ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО</b>	151
Гранева А. В., Васечко Е. В. . . . .	
<b>УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ ДЕФЕКТА ПРИ УСТРОЙСТВЕ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ КРОВЕЛЬ МНОГОЭТАЖНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ</b>	158
Макаров А. Н., Монахов Б. Е., Коротеева М. С. . . . .	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ОГРАЖДЕНИЯ КОТЛОВАНА (ОБОЛОЧЕК) РУСЛОВЫХ ОПОР ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОСТА ЧЕРЕЗ Р. ВОЛГА (8-Й ЭТАП СТРОИТЕЛЬСТВА М-12 В РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН)</b>	164
Бунт А. М.. . . . .	
<b>БОЛТОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ</b>	169
Коргин А. В. . . . .	
<b>УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ СТРОИТЕЛЬСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ</b>	175
Шахраманян А. М., Ярёменко А. В., Мозжухин Д. А., Трофимов И. Д., Шмук Н. А., Юрин А. А. . . . .	
<b>ПОЛИТИКА И ИННОВАЦИИ В УПРАВЛЕНИИ СТРОИТЕЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ И ПРОДУКТАМИ СНОСА В ПОСТКОНФЛИКТНОЙ СИРИИ</b>	187
Перунов А. С., Даюб Т. . . . .	

УДК 69.05:624.9(575.4)

## Организационно-технологические аспекты строительства многоквартирных жилых домов в условиях техногенных рисков: опыт Туркменистана

Organizational and Technological Aspects of Construction of Multi-Apartment Residential Buildings in Conditions of Man-Made Risks: the Experience of Turkmenistan

### Лапидус Азарий Абрамович

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, lapidus58@mail.ru

### Lapidus Azariy Abramovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, lapidus58@mail.ru

### Аразов Байраммырат

Аспирант кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, baymyrat94.94@mail.ru

### Arazov Bayrammyrat

Postgraduate student of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, baymyrat94.94@mail.ru

### Черкезова Гунча

Аспирант кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, cherkezova.guncha1998@mail.ru

### Cherkezova Guncha

Postgraduate student of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, cherkezova.guncha1998@mail.ru

**Аннотация.** В статье исследуются организационно-технологические аспекты строительства многоквартирных жилых домов в условиях техногенных рисков на примере Туркменистана. Цель работы заключается в анализе факторов, влияющих на безопасность и эффективность строительного процесса в условиях возможных техногенных угроз, таких как природные катаклизмы, аварии и промышленные загрязнения. В рамках исследования рассмотрены инженерные решения, нормативные требования и современные технологии управления рисками, которые способствуют минимизации воздействия неблагоприятных факторов на строительство.

Методология исследования включает анализ существующих подходов к проектированию и строительству в регионах с повышенными техногенными рисками, а также изучение примеров успешной адаптации технологий в Туркменистане. Рассмотрены методы повышения устойчивости зданий и сооружений,

**Abstract.** The article examines the organizational and technological aspects of the construction of apartment buildings in conditions of man-made risks using Turkmenistan as an example. The purpose of the work is to analyze the factors affecting the safety and efficiency of the construction process in conditions of possible man-made threats, such as natural disasters, accidents and industrial pollution. The study examines engineering solutions, regulatory requirements and modern risk management technologies that help minimize the impact of adverse factors on construction.

The research methodology includes an analysis of existing approaches to design and construction in regions with increased man-made risks, as well as a study of examples of successful adaptation of technologies in Turkmenistan. Methods for increasing

включая внедрение инновационных инженерных решений и соблюдение актуальных строительных стандартов.

Результаты работы показывают, что использование современных технологий и строгие требования к безопасности в строительстве способствуют снижению рисков и повышению устойчивости жилых объектов. В статье подчёркивается необходимость интеграции инновационных решений и подходов для повышения надёжности и эффективности строительных работ в условиях техногенных угроз. Полученные выводы могут быть полезны для совершенствования строительных процессов в регионах с аналогичными экологическими и техногенными условиями.

**Ключевые слова:** строительство; многоквартирные жилые дома; техногенные риски; безопасность; технологии строительства; Туркменистан; управление рисками.

the sustainability of buildings and structures are considered, including the introduction of innovative engineering solutions and compliance with current building standards.

The results of the work show that the use of modern technologies and strict safety requirements in construction help reduce risks and increase the sustainability of residential buildings. The article emphasizes the need to integrate innovative solutions and approaches to improve the reliability and efficiency of construction work in conditions of man-made threats. The findings may be useful for improving construction processes in regions with similar environmental and technological conditions.

**Keywords:** construction; multi-apartment residential buildings; technogenic risks; safety; construction technologies; Turkmenistan; risk management.

## Введение

Строительная отрасль Туркменистана является одной из наиболее динамично развивающихся в Центральной Азии, формируя порядка 10 % валового внутреннего продукта (ВВП) страны. За последние 15 лет накопленный объём инвестиций в строительство и жилищно-коммунальное хозяйство составил 2,6 млрд долларов США. В настоящее время в стране возводится около 3 тысяч объектов общей стоимостью около 40 млрд долларов США [1].

С 2007 года Туркменистан активно реализует масштабные строительные проекты. Если в 2005 году на рассмотрении в Главном управлении государственной экспертизы находилось порядка 250 объектов, то к 2020 году их число превысило 1050 [2].

За годы независимости в Туркменистане было сдано в эксплуатацию 35 млн квадратных метров жилья, что позволило увеличить обеспеченность населения жилой площадью до 23,2 квадратных метра на человека, что вдвое превышает показатели 1991 года [3].

Туркменистан расположен в сейсмоактивной зоне, где сейсмичность достигает 9 баллов по шкале Рихтера. В 1948 году Ашхабад был полностью разрушен землетрясением магнитудой 7,3 баллов, что привело к значительным человеческим жертвам.

В условиях активного строительства и повышенных техногенных рисков особое значение приобретают разработка и внедрение эффективных организационно-технологических решений при возведении многоквартирных жилых домов.

## Цель исследования

Цель исследования – определить и обосновать эффективные организационно-технологические решения, направленные на повышение безопасности и устойчивости многоквартирных жилых домов в условиях техногенных рисков Туркменистана.

## Материалы и методы

В исследовании применены аналитический метод, основанный на изучении нормативных документов, строительных стандартов и технических регламентов, а также сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта строительства в условиях повышенных техногенных рисков. Для получения экспертного мнения проведены интервью со специалистами строительной отрасли, направленные на выявление актуальных и эффективных решений. Моделирование использовано для разработки оптимальных строительных схем и технологий, повышающих безопасность многоквартирных жилых домов. Проведён экономический анализ, включающий оценку затрат на внедрение передовых технологий и сравнение их с потенциальными потерями, связанными с техногенными рисками. Комплексный подход к исследованию позволил не только систематизировать существующие проблемы, но и предложить практические рекомендации по их решению.

## Анализ научно-информационной базы исследования

Вопросы строительства многоквартирных жилых домов в условиях техногенных рисков, особенно в сейсмоактивных регионах, широко освещены в научной литературе. В диссертации Т. Б. Иманалиева «Новые конструктивные решения искусственных сооружений в условиях высокой сейсмической активности» рассматрива-

ются инновационные подходы к проектированию и возведению сооружений, обеспечивающие их устойчивость при сейсмических воздействиях [4].

В статье Е. М. Зиятдинова и Г. Г. Худайбердиева «Особенности развития строительной отрасли Туркменистана» рассматриваются ключевые аспекты развития строительного сектора страны, в том числе влияние государственной политики на объёмы и качество строительства [5].

Вопросы организационно-технологических решений при реконструкции объектов недвижимости в условиях техногенных воздействий освещены в работе В. А. Борисова «Организационно-технологические решения реконструкции объектов недвижимости в условиях техногенных воздействий». Автор анализирует современные методы минимизации рисков при строительстве и реконструкции зданий в сложных условиях [6].

В монографии Ю. Н. Абрамова «Обеспечение надёжности зданий и сооружений в условиях техногенных факторов» исследуются механизмы управления строительными проектами с учётом техногенных угроз. В работе подчёркивается необходимость внедрения инновационных технологий для повышения безопасности и долговечности жилых зданий [7].

Рассмотренные выше исследования подтверждают актуальность разработки эффективных организационно-технологических решений, направленных на повышение устойчивости многоквартирных жилых домов в Туркменистане с учётом техногенных и сейсмических факторов.

## Основная часть

Техногенные риски в строительстве представляют собой вероятность возникновения различных неблагоприятных явлений, которые могут повлиять на безопасность зданий и сооружений в процессе их возведения, эксплуатации и реконструкции. Риски связаны с воздействием человеческой деятельности и технологии на строительные объекты и могут быть вызваны как внутренними, так и внешними факторами. Классификация техногенных рисков включает несколько категорий. Наиболее распространённые: сейсмические, климатические, гидрологические, экзогенные геологические процессы (оползни, карсты), а также риски, связанные с воздействием промышленных объектов, таких как выбросы химических веществ или вибрации от крупных предприятий.

В рамках теории управления рисками существует также деление на два типа рисков: оперативные, связанные с непосредственным выполнением строительных работ, и стратегические, которые могут возникнуть на уровне планирования, проектирования и эксплуатации объектов. По методу минимизации различают пассивные (инженерные решения, конструктивные изменения) и активные риски (динамическое управление воздействиями внешней среды) [8].

Туркменистан как страна, находящаяся в сейсмоактивной зоне, подвержен значительным рискам, связанным с геологической и сейсмической активностью. Согласно данным Международного института по сейсмологии и землетрясениям (2019), территория Туркменистана относится к зонам с высокой и средней сейсмической активностью, особенно в таких районах, как Ашхабад, Мары и Дашогуз. В частности, сейсмические риски оказывают влияние на выбор строительных материалов, проектиро-

Источник техногенных рисков	Характеристики	Влияние на строительство
Сейсмическая активность	Высокая сейсмичность в ряде регионов (Ашхабад, Мары, Дашогуз)	Повышенные требования к сейсмостойкости конструкций
Климатические условия	Температурные колебания (летом до 40 °C)	Усадка и расширение материалов, трещины в конструкции
Промышленные зоны	Загрязнение воздуха и воды вблизи крупных предприятий	Коррозия строительных материалов, ухудшение экологической ситуации
Экзогенные процессы	Оползни, карстовые явления на определённых участках территории	Сложности при строительстве фундаментов, дополнительные укрепления

Табл. 1. Основные источники техногенных рисков в строительстве Туркменистана

Tab. 1. Main sources of man-made risks in construction in Turkmenistan

вание зданий и способы их защиты от разрушений, включая сейсмостойкие конструкции и использование демпфирующих технологий.

Ещё одним значимым фактором является климатическая зона страны, где наблюдается резкое изменение температуры, частые засухи и аномальные погодные условия. В Туркменистане среднегодовая температура воздуха составляет около 17 °C, при этом летом температура может достигать 40 °C и выше. Климатические особенности влияют на выбор строительных материалов, их способность выдерживать такие экстремальные условия, а также на требования к теплоизоляции и вентиляции жилых и коммерческих объектов.

Промышленные зоны также представляют собой источник техногенных рисков, особенно в плане загрязнения воздуха и воды. Например, в районах, где расположены нефтехимические заводы и другие производственные предприятия, наблюдаются выбросы химических веществ, что может оказывать негативное воздействие на здания и сооружения, расположенные в этих зонах.

В итоге, воздействие техногенных факторов, таких как сейсмическая активность, климатические условия, загрязнение воздуха и воды, оказывает прямое влияние на безопасность строительства и эксплуатацию зданий. Так, сейсмические риски требуют разработки и применения специальных технологий для обеспечения сейсмостойкости сооружений, что включает в себя использование гибких конструктивных элементов, усиление фундамента и стен, а также систем автоматического оповещения о возможных землетрясениях [9].

Климатические факторы, такие как температура, влажность и количество осадков, влияют на долговечность строительных материалов. Например, резкие перепады температуры могут приводить к трещинам в бетонных и кирпичных стенах, а также снижать эффективность теплоизоляции. Для защиты от этих факторов на строительных объектах необходимо применять специальные теплоизоляционные покрытия и фундаменты, устойчивые к высокому уровню влажности и перепадам температуры.

Негативное воздействие загрязняющих веществ из промышленных зон может ускорять процесс коррозии металлических конструкций, разрушать бетонные и кирпичные стены, а также вызывать химическое загрязнение окружающей среды. В связи с этим необходимы дополнительные исследования и разработки, направленные на создание устойчивых строительных материалов, а также на улучшение методов очистки воздуха и водоёмов вблизи крупных промышленных объектов.

Зарубежный опыт в управлении техногенными рисками в строительстве, особенно в сейсмоактивных регионах,

включает использование различных инновационных технологий и методов проектирования. Например, в Японии широко используется метод сейсмической изоляции зданий, включающий в себя использование амортизирующих материалов и гибких конструктивных решений. В странах с холодным климатом, таких как Канада и Норвегия, используются утеплённый фундамент и технологии, снижающие влияние низких температур на прочностные характеристики зданий [10].

В Туркменистане, несмотря на наличие сейсмических и климатических рисков, зачастую используются устаревшие методы строительства, что приводит к повышенным рискам для безопасности зданий. Это обусловлено недостаточным внедрением современных технологий и стандартов, а также отсутствием комплексного подхода к управлению рисками. Например, в туркменских городах зачастую не соблюдаются нормы по сейсмостойкости, что может привести к разрушениям в случае сильных землетрясений.

Нормативно-правовая база строительства в Туркменистане включает законы, постановления, стандарты и нормативы, которые регулируют безопасность строительства, качество работ и защиту от техногенных рисков. Согласно «Градостроительному кодексу Туркменистана», строительство в регионах с повышенными рисками, такими как сейсмическая активность или загрязнение окружающей среды, регламентируется строгими требованиями и особым контролем. Также важным документом является «Свод правил безопасности строительства», который содержит нормы, касающиеся устойчивости конструкций к техногенным воздействиям, он утверждается Министерством строительства Туркменистана. Основным источником правового регулирования строительных работ является «Закон о строительной деятельности», который регулирует проектирование, строительство и эксплуатацию зданий в условиях различных техногенных рисков. Важнейшим аспектом является обязательность выполнения сейсмических норм и экологических стандартов в проектировании жилых и общественных зданий. В Туркменистане большое внимание уделяется экологической безопасности строительных проектов, что обеспечивается сертификацией и проверками, осуществляемыми надзорными органами [11; 12].

Проектирование многоквартирных жилых домов в условиях повышенных техногенных рисков требует применения специализированных методов и инструментов, направленных на минимизацию воздействия внешних факторов на конструкцию зданий. Важно учитывать сейсмические, климатические и экологические риски при проектировании каждого объекта. Для этого в Туркменистане создаются специализированные проектные организации,

которые занимаются разработкой безопасных и устойчивых строительных решений с учётом местных рисков [12].

Одним из примеров является использование сейсмоактивных расчётов при проектировании зданий, расположенных в сейсмоопасных районах, таких как Ашхабад и Мары. Применение сейсмостойких технологий и конструктивных решений позволяет уменьшить вероятность разрушений при землетрясениях. Кроме того, большое внимание уделяется выбору строительных материалов, таких как армированный бетон, устойчивый к вибрационным воздействиям и климатическим колебаниям.

В условиях повышенных техногенных рисков крайне важно эффективное взаимодействие всех участников строительного процесса: заказчика, проектировщика, подрядчика и контрольных органов. Организация работ требует чёткой координации действий всех сторон, чтобы избежать возможных ошибок и несоответствий стандартам. В Туркменистане для обеспечения безопасности строительных объектов предусмотрено обязательное участие инженерных консультантов и экспертов, которые оценивают возможные риски и предлагают способы их минимизации на всех стадиях строительства.

Процесс проектирования и строительства много квартирных домов должен включать в себя регулярные проверки и ревизии всех проектных решений. Важно взаимодействие проектировщиков с государственными надзорными органами, такими как Министерство строительства Туркменистана и Управление по защите окружающей среды. Их роль заключается в контроле за соблюдением экологических и строительных норм, а также в мониторинге сейсмической активности и климатических изменений [13].

Государственные структуры Туркменистана играют ключевую роль в контроле за безопасностью строительства в условиях техногенных рисков. Министерство строительства и архитектуры отвечает за разработку и утверждение строительных стандартов, а также за контроль за соблюдением норм и стандартов на всех этапах строительства. Важную роль в этом процессе также играют органы, регулирующие экологическую безопасность и сейсмологические исследования.

Важнейшей частью системы контроля является лицензирование строительных компаний и специалистов, которые должны иметь соответствующие квалификации и опыт для работы в сложных условиях. В Туркменистане разрабатываются специализированные программы по обучению и сертификации инженеров и строителей для работы в сейсмоактивных и экологически неблагоприятных районах.

Современные технологии строительства активно развиваются с целью снижения техногенных рисков. Одним из таких решений является использование технологий сейсмозоляции и виброзоляции, которые значительно повышают устойчивость зданий к землетрясениям и другим вибрационным воздействиям. Такие технологии позволяют минимизировать разрушения и даже предотвратить полное разрушение зданий в случае сильных землетрясений. В Туркменистане эти технологии активно внедряются в проектирование жилых объектов, особенно в районах с высокой сейсмической активностью, таких как Ашхабад и Мары.

Одним из новых направлений является использование адаптивных конструктивных решений, которые автоматически подстраиваются под внешние изменения, такие как сильные колебания или экстремальные погодные условия. Примером является использование новых материалов, которые имеют высокую степень эластичности и могут восстанавливать свою форму после воздействия сейсмических волн.

Применение инновационных строительных материалов и конструктивных решений значительно повышает безопасность зданий. В условиях техногенных рисков важным аспектом является использование материалов, устойчивых к химическим воздействиям, высокой влажности, а также к колебаниям температуры. Например, в Туркменистане применяются специальные бетонные смеси с добавлением полимерных материалов, которые обеспечивают лучшую сопротивляемость воздействию влаги и температуры.

Также для повышения долговечности строительных объектов используются алюминиевые и композитные материалы, которые обладают высокой прочностью и устойчивостью к механическим повреждениям, а также обеспечивают необходимую гибкость для работы в условиях сейсмических и климатических колебаний.

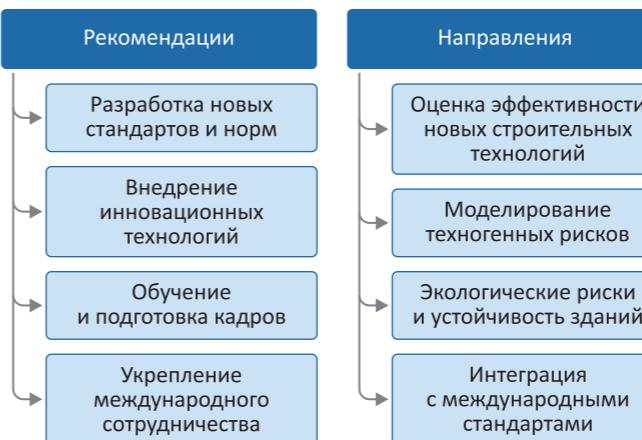
Важным элементом современных строительных решений являются инженерные системы, направленные на повышение безопасности зданий. Одной из таких систем является сейсмозоляция, которая помогает снизить воздействие вибраций на здания и конструкции. Данная система включает в себя использование амортизирующих материалов, таких как резино-битумные или полиуретановые покрытия, которые устанавливаются между зданием и фундаментом.

Туркменистан имеет уникальные географические и климатические особенности, которые влияют на выбор технологий и материалов для строительства. В регионах с высокой сейсмической активностью используются сейсмостойкие технологии и материалы, такие как армированный бетон, а также системы для улучшения сейсмостойкости. В районах с высокой влажностью применяются водоотталкивающие и утепляющие материалы, которые защищают здания от воздействия воды и сырости.

Примером успешной реализации таких проектов является строительство жилых комплексов в Ашхабаде, где учитываются не только сейсмические риски, но и необходимость защиты от сильной жары и песчаных бурь, характерных для региона.

Использование инновационных материалов, например, высокопрочных бетонов и композитных материалов, позволяет повысить устойчивость зданий к внешним воздействиям. В работе рассматриваются особенности выбора организационно-технических решений при строительстве в условиях ограничения ресурсов, что способствует эффективному использованию инновационных материалов.

Внедрение инженерных систем, таких как сейсмозоляция и автоматизированные системы мониторинга, играет ключевую роль в повышении безопасности зданий. В рамках проекта по усилению потенциала управления рисками стихийных бедствий в Туркменистане рассматриваются лучшие международные практики в



**Рис. 1. Рекомендации для строительной отрасли Туркменистана и направления дальнейших исследований**  
**Fig. 1. Recommendations for the construction industry of Turkmenistan and directions for further research**

области диагностики и мониторинга, что способствует повышению безопасности строительных объектов [14].

Учёт региональных особенностей, таких как климатические условия и сейсмическая активность, является важным аспектом при проектировании и строительстве. В проекте по поддержке процесса установления целевых показателей деградации земель в Туркменистане рассматриваются методы оценки и управления экологическими рисками, что способствует учёту региональных особенностей в строительстве [15].

Оценка эффективности существующих методов и технологий строительства многоквартирных жилых домов в условиях техногенных рисков требует комплексного подхода. В работе рассматриваются организационно-технические решения при строительстве в условиях ограничения ресурсов, что способствует повышению эффективности и безопасности строительства.

### Результаты

Исследование показало, что, несмотря на наличие современных строительных норм и стандартов, многие объекты в Туркменистане продолжают возводиться с использованием устаревших технологий, что повышает риски для безопасности.

Выявлено, что значительная часть многоквартирных жилых домов не соответствует современным требованиям сейсмостойкости и не учитывает влияния климатических и экзогенных факторов. В частности, использованные материалы и конструктивные решения не всегда обеспечивают должный уровень защиты от землетрясений и экстремальных климатических условий. Рекомендовано внедрение инновационных решений, таких как сейсмозоляция и автоматизированные системы мониторинга.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Серебрякова, Ю. Иван Волынkin: Строительная отрасль формирует порядка 10 % ВВП Туркменистана / Ю. Серебрякова // Вестник. Строительство. Архитектура. Инфраструктура. – 2024. – URL: <https://vestnikstroy.ru/articles/building/ivan-volynkin-stroitelnaya-otrasl-formiruet-poryadka-10-vvp-turkmenistana/>.
- В Туркменистане резко выросли объёмы строительства // Сметчик.рф : [сайт]. – 2021. – URL: <https://www.xn--e1aggfyi9a.xn--p1ai/news/interesnye/v-turkmenistane-rezko-vyrosli-obemnye-stroitelstva>.
- За 26 лет независимости в Туркменистане построили 35 млн квадратных метров жилья // SNG.Today (СНГ.Сегодня) : [сайт]. – 2017. – URL: <https://sng.today/ashkhabad/4769-za-26-let-nezavisimosti-v-turkmenistane-postroili-35-mln-kvadratnyh-metrov-zhilya.html>.
- Иманалиев, Т. Б. Новые конструктивные решения искусственных сооружений в условиях высокой сейсмической активности : дис. ... д-ра тех. наук : 05.23.01 / Иманалиев Темир Болотбекович ; Кыргызско-российский славянский университет им. Б. Н. Ельцина. – Бишкек, 2011.
- Аманова, Б. Особенности развития строительной отрасли Туркменистана / Б. Аманова, М. Байрамов, Ш. Атаев // Символ науки. – 2023. – № 3-2. – С. 89–91. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razvitiya-stroitelnoy-otrasli-turkmenistana>.
- Бурмак, А. А. Организационно-технологические решения реконструкции объектов недвижимости в условиях техно-

золяции, виброзоляции и адаптивные конструктивные материалы.

### Заключение

В ходе проведённого исследования были выявлены ключевые аспекты, касающиеся организационно-технологических подходов к строительству многоквартирных жилых домов в условиях техногенных рисков на территории Туркменистана. Основным выводом является необходимость строгого соблюдения нормативно-правовых требований и разработки новых стандартов для снижения влияния техногенных рисков на строительный процесс. Сейсмичность, климатические особенности и наличие промышленных объектов в регионе требуют особого внимания при проектировании и строительстве. Также подчёркнём, что интеграция современных технологий и инновационных материалов, таких как сейсмозоляция и автоматизированные системы мониторинга, способствует значительному повышению безопасности зданий и минимизации рисков.

Рекомендации для строительной отрасли Туркменистана и направления дальнейших исследований представлены на рисунке 1.

Рекомендуется обновить действующие нормативно-правовые акты с учётом специфики региона, включая усиленные требования к строительству в сейсмоактивных зонах и районах с повышенными экологическими рисками.

Потребуется дальнейшее исследование эффективности применения инновационных материалов и конструктивных решений для снижения техногенных рисков в строительстве.

Важно развивать методы моделирования и прогнозирования техногенных рисков в строительстве, что позволяет заранее предусматривать возможные угрозы и минимизировать их воздействие на безопасность зданий.

В дальнейшем следует обратить внимание на исследования, связанные с воздействием экологических факторов (например, изменения климата) на устойчивость зданий и жилых комплексов в условиях Туркменистана.

Будет целесообразно изучить возможность интеграции туркменских строительных норм и стандартов с международными требованиями и лучшими практиками для повышения качества и безопасности строительства.

Таким образом, исследование имеет значимость с целью разработки и внедрения современных технологий и методов для снижения техногенных рисков в строительстве, а также доказывает необходимость совершенствования законодательства и повышения квалификации кадров в строительной отрасли Туркменистана.

- генных воздействий / А. А. Бурмак, П. М. Медведев // Мировая наука. – 2018. – № 10 (19). – С. 107–109. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-tehnologicheskie-resheniya-rekonstruktii-obektor-nedvizhimosti-v-usloviyah-tehnogennyh-vozdeystviy>.
7. Современные проблемы строительной науки, техники и технологии: монография / Н. В. Брайла, Ю. Г. Лазарев, М. А. Романович, Т. Л. Симанкина, А. В. Ульбин; СПбПУ. – Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета, 2017. – 147 с. – URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/s17-50.pdf/download/s17-50.pdf>.
8. Land Degradation Neutrality. Supporting the LDN Target Setting Process in Turkmenistan: Final Summary Report / LDN National Working Group : [Electronic resource]. – Ashgabat, 2022. – URL: [https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-06/Turkmenistan\\_LDN%20TSP%20Final%20Report%20%28Russian%29.pdf](https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-06/Turkmenistan_LDN%20TSP%20Final%20Report%20%28Russian%29.pdf).
9. Шестерикова, Я. В. Формирование комплексного показателя качества многоэтажных жилых зданий : дис. ... канд. тех. наук : 05.02.22 / Шестерикова Яна Валерьевна ; МГСУ. – Москва, 2020. – 138 с.
10. IV национальная конференция «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования» / Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – URL: <https://iges.mgsu.ru/science/science-startup/Prog2023.pdf>.

## REFERENCES

1. Serebryakova, Yu. Ivan Volynkin: Stroitel'naya otrasl' formiruet poryadka 10 % VVP Turkmenistana [Ivan Volynkin: The construction industry generates about 10% of Turkmenistan's GDP] / Yu. Serebryakova // Vestnik. Stroitel'sto. Arkhitektura. Infrastruktura [The messenger. Construction. Architecture. Infrastructure]. – 2024. – URL: <https://vestnikstroy.ru/articles/building/ivan-volynkin-stroitelnaya-otrasl-formiruet-poryadka-10-vvp-turkmenistana/>.
2. V Turkmenistane rezko vyrosli ob'yomy stroitel'stva [Construction volumes have increased dramatically in Turkmenistan] // Сметчик.рф : [website]. – 2021. – URL: <https://www.xn--e1aggfyi9a.xn--p1ai/news/interesnye/v-turkmenistane-rezko-vyrosli-obem-stroitelstva>.
3. Za 26 let nezavisimosti v Turkmenistane postroili 35 mln kvadratnykh metrov zhil'ya [Over the 26 years of independence, 35 million square meters of housing have been built in Turkmenistan] // SNG.Today (SNG.Segodnya) : [website]. – 2017. – URL: <https://sng.today/ashkhabad/4769-za-26-let-nezavisimosti-v-turkmenistane-postroili-35-mln-kvadratnyh-metrov-zhilya.html>.
4. Imanaliev, T. B. Novye konstruktivnye resheniya iskusstvennykh sooruzhenij v usloviyakh vysokoj sejsmicheskoy aktivnosti : dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.23.01 [New constructive solutions for artificial structures in conditions of high seismic activity : dissertation of Doctor of Technical Sciences : 05.23.01] / Imanaliev Temir Bolotbekovich ; Kyrgyzsko-rossijskij slavyanskij universitet im. B. N. El'tsina [Kyrgyz-Russian Slavic University named after B. N. Yeltsin]. – Bishkek, 2011.
5. Amanova, B. Osobennosti razvitiya stroitel'noj otrassli Turkmenistana [Features of the development of the construction industry of Turkmenistan] / B. Amanova, M. Bayramov, Sh. Ataev // Simvol nauki [Symbol of Science]. – 2023. – №. 3-2. – Pp. 89–91. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razvitiya-stroitelnoy-otrasli-turkmenistana>.
6. Burmak, A. A. Organizatsionno-tehnologicheskie resheniya rekonstruktii ob'ektor nedvizhimosti v usloviyakh tekhnogenykh vozdeystviy [Organizational and technological solutions for the reconstruction of real estate in conditions of anthropogenic impacts] / A. A. Burmak, P. M. Medvedev // Mirovaya nauka [World Science]. – 2018. – №. 10 (19). – Pp. 107–109. – URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-tehnologicheskie-resheniya-rekonstruktii-ob'ektor-nedvizhimosti-v-usloviyakh-tehnogenykh-vozdeystviy](https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-tehnologicheskie-resheniya-rekonstruktii-obektor-nedvizhimosti-v-usloviyakh-tehnogenykh-vozdeystviy).
7. О градостроительной деятельности : Закон Туркменистана от 18 августа 2015 года № 263-В : подписан Президентом Туркменистана Г. Бердымухамедовым : вступил в силу со дня его официального опубликования // Ведомости Меджлиса Туркменистана. – Ашхабад, 2015. – № 3. – Ст. 97.
11. Инновационные методы организации строительного производства : Материалы II Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 17–18 ноября 2022 г. / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2023. – 248 с.
13. Во имя приумножения богатства природы родной земли / Государственное информационное агентство Туркменистана «Туркменистан сегодня» : [электронный ресурс]. – URL: <https://tdh.gov.tm/index.php/ru/post/447/vo-imya-priumnozheniya-bogatstva-prirody-rodnoi-zemli>.
14. Инициатива по управлению риском бедствий в Центральной Азии и Кавказе (ЦАК ИУРБ) : Сводный отчет об оценке риска бедствий в странах Центральной Азии и Кавказа (ЦАК) : [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.unisdr.org/files/11641\\_RMSFINALrussmall.pdf](https://www.unisdr.org/files/11641_RMSFINALrussmall.pdf).
15. Усиление потенциала управления рисками стихийных бедствий в Туркменистане : Программа развития ООН в Туркменистане. – URL: <https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/TKM/DRM%20prod%20Draft%202012May2014%20RUS.docx>.

icheskie-resheniya-rekonstruktii-obektor-nedvizhimosti-v-usloviyah-tehnogennyh-vozdeystviy.

7. Sovremennye problemy stroitel'noj nauki, tekhniki i tekhnologii: monografiya [Modern problems of construction science, engineering and technology: a monograph] / N. V. Braila, Yu. G. Lazarev, M. A. Romanovich, T. L. Simankina, A.V. Ulybin; SPbPU. – St. Petersburg : Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta [Polytechnic University Publishing House], 2017. – 147 p. – URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/s17-50.pdf/download/s17-50.pdf>.

8. Land Degradation Neutrality. Supporting the LDN Target Setting Process in Turkmenistan: Final Summary Report / LDN National Working Group : [Electronic resource]. – Ashgabat, 2022. – URL: [https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-06/Turkmenistan\\_LDN%20TSP%20Final%20Report%20%28Russian%29.pdf](https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-06/Turkmenistan_LDN%20TSP%20Final%20Report%20%28Russian%29.pdf).

9. Shestikova, Ya. V. Formirovaniye kompleksnogo pokazatelya kachestva mnogoekhaznykh zhilykh zdaniy : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.02.22 [Formation of a comprehensive quality indicator for multi-storey residential buildings : dis. ... Candidate of Technical Sciences : 02/05/12] / Shestikova Yana Valерьевна ; MGSU. – Moscow, 2020. – 138 p.

10. IV Natsional'naya konferentsiya «Aktual'nye problemy stroitel'noj otrassli i obrazovaniya» [IV National Conference "Actual problems of the construction industry and education"] / Natsional'nyj issledovatel'skij Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet [National Research Moscow State University of Civil Engineering]. – URL: <https://iges.mgsu.ru/science/science-startup/Prog2023.pdf>.

11. O gradostroitel'noj deyatel'nosti : Zakon Turkmenistana ot 18 avgusta 2015 goda № 263-В [On urban development : Law of Turkmenistan dated August 18, 2015 No. 263-В] : podpisany Prezidentom Turkmenistana G. Berdimukhamedovym : vstupil v silu so dnya ego ofitsial'nogo opublikovaniya [signed by President of Turkmenistan G. Berdimuhamedov : entered into force from the date of its official publication] // Vedomosti Medzhlisa Turkmenistana [Gazette of the Mejlis of Turkmenistan]. – Ashgabat, 2015. – №. 3. – Art. 97.

12. Innovatsionnye metody organizatsii stroitel'nogo proizvodstva : Materialy II Vserossijskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 17–18 noyabrya 2022 g. [Innovative methods of organizing construction production: Materials

of the II All-Russian Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 17-18, 2022] / Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arkhitekturno-stroitel'nyj universitet [St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering]. – St. Petersburg : SPbGASU, 2023. – 248 p.

13. Vo imya priumnozheniya bogatstva prirody rodnoj zemli [In the name of increasing the wealth of nature of the native land] / Gosudarstvennoe informatsionnoe agentstvo Turkmenistana «Turkmenistan segodnya» [State Information Agency of Turkmenistan "Turkmenistan Today"] : [electronic resource]. – URL: <https://tdh.gov.tm/index.php/ru/post/447/vo-imya-priumnozheniya-bogatstva-prirody-rodnoi-zemli>.
14. Initsiativa po upravleniyu riskom bedstvij v TSentral'noj Azii i

Kavkaze (TSAK IURB) : Svodnyj otchet ob otsenke riska bedstvij v stranakh TSentral'noj Azii i Kavkaza (TSAK) [Disaster Risk Management Initiative in Central Asia and the Caucasus (CAC IURB) : Consolidated Disaster Risk Assessment Report in the Countries of Central Asia and the Caucasus (CAC) : [Electronic resource]]. – URL: [https://www.unisdr.org/files/11641\\_RMSFINALrussmall.pdf](https://www.unisdr.org/files/11641_RMSFINALrussmall.pdf).

15. Usilenie potentsiala upravleniya riskami stikhijnykh bedstvij v Turkmenistane : Programma razvitiya OON v Turkmenistane [Strengthening disaster risk management capacity in Turkmenistan : The United Nations Development Program in Turkmenistan]. – URL: <https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/TKM/DRM%20prod%20Draft%202012May2014%20RUS.docx>.

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_9

## УДК 69

## Анализ нормативно-технической документации, регламентирующей процесс обследования высотных зданий в Российской Федерации

Analysis of the Regulatory Documentation Regulating the Process of Inspection of High-Rise Buildings on the Russian Federation

Топчий Дмитрий Владимирович

Доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой «Испытания сооружений», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, TopchiyDV@mgsu.ru

Topchiy Dmitry Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Head of the Department of Testing of Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, TopchiyDV@mgsu.ru

Вишневский Александр Юрьевич

Аспирант кафедры «Испытания сооружений», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26; ведущий инженер отдела обследований зданий и сооружений, ООО «ЮНИПРО», Россия, 109147, Москва, улица Марксистская, 3, строение 2, подъезд 2, этаж 4, vishnevskii\_ay\_mgsu@mail.ru

Vishnevskiy Aleksander Yurievich

Postgraduate student of the Department of Testing of Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26; Lead engineer of the Department of Buildings and Structures Inspection, UNIPRO LLC, Russia, 109147, Moscow, ulitsa Marksistskaya, 3, building 2, entrance 2, floor 4, vishnevskii\_ay\_mgsu@mail.ru

**Аннотация.** Высотные здания представляют собой сложные инженерные сооружения, требующие особого подхода к проектированию, строительству и эксплуатации. В связи с увеличением объёмов строительства высотных зданий в России, особенно в крупных городах, актуальным становится вопрос обеспечения их безопасности и долговечности. Высотные здания занимают особое место в градостроительстве, поскольку они подвержены различным воздействиям и требуют особого внимания при оценке их состояния. Безопасность эксплуатации подобных объектов напрямую зависит от надлежащей диагностики и своевременного выявления недостатков.

Кроме того, за последние годы значительно увеличилось как количество высотных объектов, так и их функциональная сложность. Эти факторы делают проблему обследования таких зданий крайне важной для обеспечения их безопасности, долговечности и надёжности в эксплуатации.

Нормативная документация играет ключевую роль в регулировании процессов обследования и мониторинга технического состояния таких объектов.

Целью данной статьи являются детальный анализ нормативно-технической документации, регулирующей процесс обследования высотных зданий, а также выявление основных проблем, возникающих в практике применения этих норм. К числу задач данного исследования относятся изучение существующих стандартов и правил, действующих в Российской Фе-

дерации, их применение при обследовании высотного здания, а также определение недостатков и вопросов, требующих дополнения или пересмотра.

В результате проделанной работы установлено: нормативно-техническая документация может содержать пробелы и неточности, обусловленные изменениями в строительных технологиях, материалах и оборудовании, используемых при возведении и эксплуатации современных высотных зданий, что, в свою очередь, затрудняет практическое применение современных методов обследования.

Существующая база нормативных документов имеет ряд недостатков, связанных с устареванием и недостаточной детализацией требований. Учитывая конструктивные и эксплуатационные особенности высотных зданий, важно достигать того, чтобы все аспекты нормативной документации оставались актуальными и способствовали повышению качества проводимых работ и безопасности эксплуатации подобных объектов. Таким образом, представленный анализ показывает необходимость комплексного подхода к регламентации обследований, учитываяющего как технические, так и эксплуатационные аспекты.

**Ключевые слова:** высотные здания; обследование; техническое состояние; эксплуатация; нормативно-техническая документация; проблемы практического применения; жизненный цикл.

**Abstract.** High-rise buildings are complex engineering structures that require a special approach to design, construction and operation. Due to the increase in the volume of high-rise building construction in Russia, especially in large cities, the issue of ensuring their safety and durability is becoming relevant. Regulatory documentation plays a key role in regulating the processes of inspection and monitoring of the technical condition of such objects. High-rise buildings occupy a special place in urban development, since they are subject to various impacts and require special attention when assessing their condition. The safety of operation of such objects directly depends on proper diagnostics and timely detection of deficiencies.

In addition, in recent years both the number of high-rise buildings and their functional complexity have increased significantly. These factors make the problem of inspecting such buildings extremely important to ensure their safety, durability and reliability in operation.

The purpose of this article is a detailed analysis of the normative and technical documentation governing the process of inspection of high-rise buildings, as well as identifying the main problems that arise in the practice of applying these standards. The objectives of this study include studying the existing stand-

## Введение

Строительная отрасль характеризуется широким спектром норм и правил, которые создают правовые и технические рамки для проектирования и эксплуатации зданий [1]. Система стандартов охватывает как проектирование, строительство, эксплуатацию и оценку состояния зданий, так и требования к прочности и устойчивости конструкций, которые необходимо учитывать при обследовании объектов [2–4].

Процесс обследования высотных зданий имеет ряд особенностей, отличающих его от обследования стандартных зданий. Это связано с такими факторами, как сложность инженерных систем, многослойность конструкций, труднодоступность исследуемых объектов, влияние климатических условий и т. д. Традиционные методы обследования часто не эффективны или оказываются не достаточными для учёта всех нюансов, которые возникают при оценке состояния высотных объектов [5; 6].

Кроме того, за последние годы значительно увеличилось как количество высотных объектов, так и их функциональная сложность. Эти факторы делают проблему обследования таких зданий крайне важной для обеспечения их безопасности, долговечности и надёжности в эксплуатации [7–9].

Для комплексной оценки технического состояния высотного здания необходимо использовать как классические методы, так и современные технологии, что позволяет достичь более высокой точности в выявлении скрытых дефектов и в оценке состояния зданий [6; 10].

## Материалы и методы

Основными методами исследования являются сравнительный анализ и изучение применения нормативных требований в реальных условиях [9].

Сравнительный анализ представляет собой ключевую методологию, позволяющую выявить основные различия и схожесть между действующими строительными стандартами и практическими рекомендациями, зафиксированными в различных документах. Важность этого метода заключается в возможности не только оценить существующие нормы, но и выявить их соответствие современным требованиям, предъявляемым к высотным зданиям. Ключевой задачей анализа является система-

рдов и правил в Российской Федерации, их применение в инспекции высотных зданий, а также выявление недостатков и проблем, требующих дополнений или редакций.

В результате выполненных работ было установлено, что нормативная и техническая документация может содержать недостатки и неточности, вызванные изменениями в строительных технологиях, материалах и оборудовании, используемых в строительстве и эксплуатации высотных зданий. Это усложняет практическое применение современных методов инспекции.

Существующий базис нормативных документов имеет ряд недостатков, связанных с устареванием и недостаточным описанием требований. Учитывая дизайн и эксплуатационные особенности высотных зданий, важно, чтобы все аспекты регулирующей документации оставались актуальными и способствовали улучшению качества выполненных работ и безопасности эксплуатации таких объектов. Таким образом, проведенный анализ показывает необходимость разработки обширного комплекса методов и рекомендаций для обследования высотных зданий, учитывая как технические, так и эксплуатационные аспекты.

**Keywords:** high-rise buildings; inspection, technical condition; operation; regulatory and technical documentation; problems of practical application; life cycle.

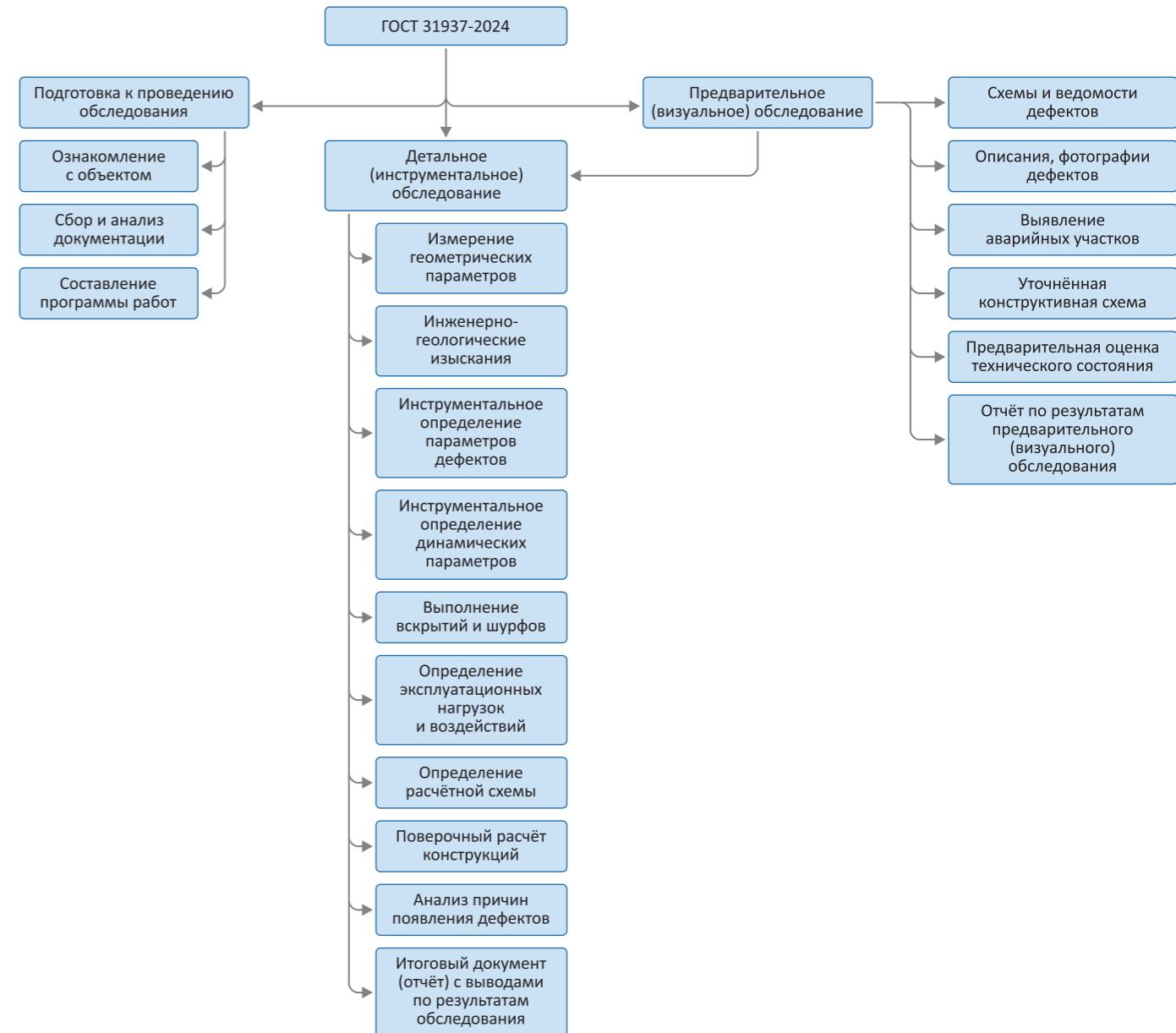


Рис. 1. Этапы проведения обследования и состав работ согласно ГОСТ 31937-2024  
Fig. 1. The stages of the survey and the scope of work according to GOST 31937-2024

- «Пособие по обследованию строительных конструкций зданий», АО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ», Москва, 2004 г. [20].

При анализе документов изучались общие требования к обследованию (цели и задачи, периодичность), методы и технологии выполнения работ (этапы, инструменты и оборудование, требования к квалификации специалистов), ключевые параметры и критерии оценки состояния здания, требования к оформлению результатов (форма отчёта, перечень обязательных приложений).

Наиболее полным документом, регулирующим обследование зданий и сооружений, является ГОСТ 31937-2024 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» [4]. По сравнению с другими документами, он охватывает большее количество аспектов процесса обследования, содержит более точные рекомендации к выполнению работ. Описывает наиболее широкий спектр исследуемых параметров.

Исходя из вышеизложенного, принято решение в дальнейшем анализе использовать ГОСТ 31937-2024.

В рассматриваемом нормативе выделяются следующие основные этапы обследования зданий и сооружений, а также состав работ (см. рисунок 1).

Другим методом, использованным в анализе, стало изучение практического применения нормативных требований в ходе обследования реальных объектов. Для этого были проанализированы отчёты о проведении обследований высотных зданий. На основании собранной информации была произведена оценка эффективности применения существующих стандартов и методических рекомендаций в реальных условиях.

Сравнительный анализ действующих норм и реальных условий обследования высотных зданий показывает значительное расхождение между установленными требованиями и практическими условиями проведения обследований.

Действующие нормы предполагают идеальные условия для проведения обследований и для чёткого следования им требуется наличие полного доступа ко всем объектам обследования, чтобы провести оценку состояния на основе визуального осмотра или инструментального из-

№ пп.	Требование по ГОСТ 31937-2024	Проблемы при обследовании	Причины
1	Сбор и анализ исходной документации (проектная, эксплуатационная, техническая)	Исходная документация отсутствует у службы эксплуатации / представлена не в полном объёме	Несоблюдение правил задействованными структурами по хранению или передаче документации по объекту
2	Предварительное (визуальное) обследование	Ограниченный доступ к конструкциям, инженерным системам или оборудованию	Наличие сложной многослойной отделки и декораций; высота расположения исследуемых объектов, ограничения в доступе из-за арендаторов
3	Детальное (инструментальное) обследование	Ограниченный доступ к конструкциям, инженерным системам или оборудованию	Существующие системы безопасности, наличие сложной многослойной отделки и декораций, ограничения в доступе из-за арендаторов, конструктивные особенности здания, необходимость ограждения определённых участков для обеспечения безопасности проходящих и т. д.
		Неучтённые в нормативе современные разработки в области строительных технологий и материалов	Необходимость актуализации существующих норм с учётом современных технологий и инновационных методов обследования
		Ограничность задействованных структур в части применения новых технологий	Недостаток квалифицированных специалистов, финансовых средств

**Табл. 1. Проблемы при реализации требований ГОСТ 31937-2024 при реальном обследовании**  
**Tab 1. Problems in implementing the requirements of GOST 31937-2024 during a real inspection**

мерения [4; 11; 12; 13; 19; 20]. Однако в реальности доступ к конструкциям, инженерным системам или оборудованию здания может быть ограничен по ряду причин: существующие системы безопасности, наличие сложной многослойной отделки и декораций, конструктивные особенности здания, необходимость ограждения определённых участков для обеспечения безопасности проходящих и т. д. В некоторых случаях без применения специального оборудования и технологий, таких как дроновые системы, невозможно полноценно выполнить обследование, что делает выполнение норм в таких условиях затруднительным [21].

Часто на практике применяются методы, более адаптированные к конкретным условиям, которые могут отличаться от рекомендованных норм. Однако важно понимать, что современные технологии, такие как лазерное сканирование, дрон-технологии, термография и т. п., не всегда упоминаются в действующих документах. Их применение носит рекомендательный характер, что может приводить к недостаточной точности оценки состояния зданий. Однако результаты обследования, выполненного с использованием устаревших методов, могут не отражать реальное состояние конструкций и систем, что приводит к снижению эффективности, создаёт риски для обеспечения безопасности и надёжности объектов [22].

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что на данный момент нормативные документы не содержат достаточного объёма сведений и чётких рекомендаций, необходимых для проведения эффективного обследования именно высотных зданий с учётом всех особенностей данного типа сооружений, а также сложностей выполнения работ по обследованию в условиях эксплуатации объекта.

## Результаты

Согласно ГОСТ 31937-2024, при комплексном обследовании технического состояния зданий (сооружений) объектами обследования являются грунты основания, строительные конструкции и их элементы, оборудование и системы инженерно-технического обеспечения [4].

Однако в ходе выполнения обследования здания при эксплуатации исполнитель сталкивается с рядом проблем, основной из которых является отсутствие доступа к конструкциям, оборудованию или инженерным системам

по следующим причинам: ввиду ограничений, установленных собственником/арендатором; наличие отделки; труднодоступность к конструкциям, оборудованию или системам, обусловленная конструктивными особенностями зданий (высота, длина пролёта, сложность конструкции).

Казалось бы, отсутствие доступа к обследуемым объектам возможно компенсировать анализом документации по объекту, однако опыт показывает, что наличие всеобъемлющей документации по объекту – довольно редкий случай. Данная проблема вызвана часто сменяющимися организациями службы эксплуатации, а также ненадлежащим подходом к хранению и передаче документации [23].

В ходе исследования были проанализированы отчёты о проведении обследования высотных зданий, выполненные в соответствии с установленными нормами. Данные документы предоставляют ценную информацию о том, насколько эффективно применяются требования и рекомендации, обозначенные в нормативной документации.

Таким образом, по результатам анализа нормативных документов и при изучении их практического применения были выявлены ключевые проблемы, которые значительно усложняют работу специалистов и могут повлиять на итоговую оценку состояния объектов (подробнее см. табл. 1).

Причиной расхождения требований нормативной документации с процессом обследования существующих объектов является отсутствие достоверной и всеобъемлющей информации о здании, а также ограниченность применения инструментальных методов для её получения.

Для решения данной проблемы необходимо сформировать методику обследования на основании всеобъемлющей информации об объекте, полученной на предыдущих этапах его жизненного цикла и объединённой в общую информационную модель.

## Обсуждение

В процессе анализа было установлено, что многие практики обследований не учитывают последние разработки в области строительных технологий и материалов. Например, существующие нормы не всегда отражают изменения в конструкциях, используемых в современных высотных зданиях. Это может увеличивать риск неверной

оценки состояния конструкций и, как следствие, угрожать безопасности эксплуатации таких объектов [24].

Также было выявлено, что недостатком является ограниченность задействованных структур в части применения новых технологий неразрушающего контроля, которые могли бы существенно повысить качество диагностики. Использование современных методов, таких как ультразвуковая диагностика, инфракрасное термографирование, лазерное сканирование и т. п., ещё не нашло должного отражения в действующих документах, что отрицательно сказывается на итоговых результатах обследования.

На основании проведённого анализа практического применения нормативной документации, регламентирующей обследование высотных зданий, можно предложить ряд рекомендаций, направленных на её совершенствование. Эти рекомендации могут значительно повысить безопасность и эффективность процесса обследования, а также уменьшить риски, связанные с эксплуатацией высотных объектов:

- Формирование методики обследования высотного здания на этапе эксплуатации на основании всеобъемлющей информации об объекте, полученной на предыдущих этапах его жизненного цикла и объединённой в общую информационную модель.
- Необходимость актуализации существующих норм с учётом современных технологий и инновационных методов обследования. Важно учитывать новые разработки в области строительных материалов и конструкций, что позволит повысить точность диагностики и уменьшить вероятность возникновения новых дефектов. Интеграция современных методов неразрушающего контроля должна стать неотъемлемой частью процедуры обследования.
- Проработка вопросов методологии ведения документации по эксплуатируемым объектам. Разработка чётких руководств по хранению документации позволит упростить сбор информации по объекту и повысить эффективность обследования. Это также обеспечит лучшее взаимодействие между различными структурами, задействованными в процессе обследования.
- Повышение уровня квалификации специалистов, осуществляющих обследование высотных зданий. Важно

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Система нормативных документов в строительстве. Основные положения : СП 555.1325800.2025 : Свод правил : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 12 марта 2025 года № 159/пр : введён в действие с 13 апреля 2025 г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). – Москва : Росстандарт, 2025. – 24 с.
- Нормативная база высотного строительства в России / С. В. Николаев, В. И. Травуш, Ю. А. Табунщиков, А. Н. Колубков, Г. Г. Соломанидин, А. А. Магай, Н. В. Дубынин // Жилищное строительство. – 2016. – № 1-2. – С. 3-6.
- Здания и комплексы высотные. Правила проектирования: СП 267.1325800.2016 : Свод правил : утверждён Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1032/пр : введён в действие с 1 июля 2017 г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). – Москва : Стандартинформ, 2017.
- Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния: ГОСТ 31937-2024 : Межгосударственный стандарт : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации по протоколу от 29 февраля 2024 г. № 170-П : введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 апреля 2024 г. № 433-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 мая 2024 г. / Российский институт стандартизации. – Москва, 2024.
- Помазкина В. М. Негативные и позитивные аспекты высотного строительства // Успехи молодёжной науки в агропромышленном комплексе : Сборник трудов VII Студенческой научно-практической конференции, Тюмень, 30 ноября 2022 г. ; Государственный аграрный университет Северного Зауралья. – Тюмень : ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, 2022. – С. 512–521.
- Шлафман, Н. В. Особенности конструкций высотных зданий / Н. В. Шлафман // Инженерные исследования. – 2021. – № 4 (4). – С. 33–40.
- Шумейко, В. И. Об особенностях проектирования уникальных, большепролётных и высотных зданий и сооружений /

создать системы обучения и повышения квалификации, которые помогут работникам освоить современные методы и технологии. Регулярные курсы, семинары и мастер-классы помогут специалистам оставаться в курсе актуальных изменений в области обследования, что повысит общий уровень компетенций в отрасли.

• Активное внедрение современных информационных технологий в процесс обследования. Использование программного обеспечения для аналитики, 3D-моделирования и управления данными сможет значительно улучшить процесс диагностики и последующего анализа состояния объектов. Интеграция различных информационных систем позволит автоматизировать отдельные этапы обследования.

• Установление обратной связи между регулирующими органами, исследовательскими институтами и практическими специалистами. Создание рабочих групп и платформ для обмена опытом может способствовать коллективному анализу существующих норм и практик, выявлению проблем и совместному поиску решений. Этот подход не только повысит качество норм, но и улучшит взаимодействие между различными участниками процесса обследования высотных зданий.

## Заключение

Исходя из вышеизложенного, необходимо подвести итог анализа применения норм. Выявленные недостатки и проблемы указывают на отсутствие достаточного объёма информации и чётких указаний в нормативных документах, необходимых для эффективного обследования высотных зданий, с учётом всех специфических особенностей данного типа сооружений, а также сложностей, связанных с проведением обследований в условиях эксплуатации объекта.

Решением данной проблемы является формирование детальной методики обследования высотных зданий. Основой данной методики должны стать организационно-технические решения, выполняемые на различных этапах жизненного цикла высотного здания. Комплекс таких решений должен быть направлен на получение максимально достоверной информации о фактическом состоянии объекта, позволяющей эффективно выполнить оценку его технического состояния на этапе эксплуатации.

- В. И. Шумейко, О. А. Кудинов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. – С. 213–224.
8. Здания и комплексы высотные. Правила эксплуатации : СП 394.1325800.2018 : Свод правил : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 13 сентября 2018 года № 578/пр : введён в действие с 14 марта 2019 г. / Стандартинформ. – Москва, 2018.
9. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный Закон РФ от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ : принят Государственной Думой 23 декабря 2009 года : одобрен Советом Федерации 25 декабря 2009 года : редакция от 20.07.2013 // Российская газета. – 2009. – 31 декабря. – № 255.
10. Топчий, Д. В. Особенности строительного контроля на объектах уникального строительства / Д. В. Топчий, В. С. Черников // Современные научно-исследовательские технологии. – 2019. – № 10-2. – С. 331–336.
11. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений : СП 13-102-2003 : Свод правил : принят постановлением Госстроя России от 21 августа 2003 г. № 153 / Госстрой России. – Москва, 2011.
12. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения : СП 47.13330.2016. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 : Свод правил : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 года № 1033/пр : введён в действие с 1 июля 2017 г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). – Москва : Стандартинформ, 2016.
13. Правила оценки физического износа жилых зданий : ВСН 53-86(р) : Ведомственные строительные нормы : утверждены Приказом Государственного комитета по гражданскому строительству и архитектуре при Госстрое СССР от 24 декабря 1986 г. № 446 и внесены Минжилкомхозом РСФСР : введены в действие 1 июля 1987 г. / Госстрой России. – Москва : ФГУП ЦПП, 2007.
14. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности : ГОСТ 18105-2018 : Межгосударственный стандарт : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации по протоколу от 29 ноября 2018 г. № 54 : введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 апреля 2019 г. № 130-ст с 1 января 2020 г. / Росстандарт. – Москва : Стандартинформ, 2019.
15. Организация строительства : СП 48.13330.2019. Актуализированная редакция СНиП 12-01-2004 : Свод правил : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 декабря 2019 года № 861/пр : введен в действие с 25 июня 2020 г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). – Москва : Стандартинформ, 2019.
16. Нагрузки и воздействия : СП 20.13330.2016. Актуализированная редакция СНиП 20.13330.2016 : Свод правил : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 декабря 2016 года № 1032/пр : введён в действие с 14 марта 2017 г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). – Москва : Стандартинформ, 2017.
17. Основания зданий и сооружений: СП 22.13330.2016. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* : Свод правил : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 года № 970/пр : введён в действие с 17 июня 2017 г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). – Москва : Стандартинформ, 2016.
18. Защита строительных конструкций от коррозии : СП 28.13330.2017. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 : Свод правил : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 года № 127/пр : введён в действие с 28 августа 2017 г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). – Москва : Стандартинформ, 2017.
19. Рекомендации по обследованию и мониторингу технического состояния эксплуатируемых зданий, расположенных вблизи нового строительства или реконструкции : согласованы Управлением развития Генплана г. Москвы : принятые и введены в действие указанием Москомархитектуры от 12.11.98 № 98. – Москва, 1998. – 74 с.
20. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий: одобрено Департаментом развития научно-технической политики и проектно-изыскательских работ Минстроя России : АО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ». – Москва, 1998.
21. Дрон-технологии в строительстве – современные решения и возможности / И. В. Носков, К. И. Носков, С. В. Тиненская, С. А. Ананьев // Вестник Евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 5. – С. 27.
22. Богданец, Е. С. Современные методы выполнения обмерных работ и обследования промышленных зданий и сооружений / Е. С. Богданец, В. В. Мусихин // Вестник Пермского государственного технического университета. Геология, геоинформационные системы, горно-нефтяное дело. – 2009. – Т. 8, № 4. – С. 68–74.
23. Приёмка в эксплуатацию законченных строительством объектов : СП 68.13330.2017. Актуализированная редакция СНиП 3.01.04-87 : Свод правил : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 июля 2017 года № 1033/пр : введён в действие с 28 января 2018 г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). – Москва : Стандартинформ, 2017.
24. Сюй, Ц. Изучение управления рисками безопасности в высотном жилищном строительстве / Ц. Сюй // Молодой учёный. – 2022. – № 17 (412). – С. 48–51.
2025. – 24 p.
2. Нормативная база высотного строительства в России [Regulatory Framework of High-Rise Construction in Russia] / S. V. Nikolaev, V. I. Travush, Yu. A. Tabunshchikov, A. N. Kolubkov, G. G. Solomanidin, A. A. Magai, N. V. Dubynin // Zhilishchnoe stroitel'stvo [Housing construction]. – 2016. – № 1-2. – Pp. 3–6.
3. Zdaniya i kompleksy vysokotnye. Pravila proektirovaniya : SP 267.1325800.2016 : Svod pravil [High-rise buildings and complexes. Rules for designing : SP 267.1325800.2016 : Set of Rules] : utverzhdenny prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 30 dekabrya 2016 g. № 1032/pr [approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated March 12, 2016 No. 1032/pr] : vveden v deystvie s 13 aprelya 2016 g. [introduction from April 13, 2016] / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii (Rosstandart) [Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart)]. – Moscow : Rosstandart, 2016.
- of the Russian Federation dated December 30, 2016 No. 1032/pr : vveden v deystvie s 1 iyulya 2017 g. [introduction from July 1, 2017]. – Moscow : Standartinform, 2017.
4. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya : GOST 31937-2024 : Mezhgosudarstvenny standart [Buildings and structures. Rules of inspection and monitoring of technical condition : GOST 31937-2024 : Interstate Standard] : prinyat Mezhgosudarstvennym sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii po protokolu ot 29 fevralya 2024 g. № 170-P [adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification to Protocol No. 170-P dated February 29, 2024] : vveden Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 10 aprelya 2024 g. № 433-st v deystvie v kachestve natsional'nogo standarta Rossiyskoy Federatsii s 1 maya 2024 g. [put into effect by Order No. 433-ct of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated April 10, 2024 as the national standard of the Russian Federation since May 1, 2024] // Rossiyskiy institut standartizatsii [Russian Institute of Standardization]. – Moscow, 2024.
5. Pomazkina, V. M. Negativnye i pozitivnye aspekty vysotnogo stroitel'stva [Negative and positive aspects of high-rise construction] // Uspekhi molodezhnoi nauki v agropromyshlennom komplekse : Sbornik trudov konferencii [Successes of youth science in the agro-industrial complex] : Sbornik trudov LVII Studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Tyumen', 30 noyabrya 2022 g. [Proceedings of the LVII Student Scientific and Practical Conference, Tyumen, November 30, 2022] ; Gosudarstvennyy agrarnyy universitet Severnogo Zaural'ya [State Agrarian University of the Northern Urals]. – Tyumen : Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Northern Trans-Urals, 2022. – Pp. 512–521.
6. Shlafman, N. V. Osobennosti konstruktsiy vysokotnykh zdaniy [Construction features of high-rise buildings] / N. V. Shlafman // Inzhenernye issledovaniya [Engineering research]. – 2021. – № 4 (4). – Pp. 33–40.
7. Shumeyko, V. I. Ob osobennostyakh proektirovaniya unikal'nykh, bol'sheproletnykh i vysokotnykh zdaniy i sooruzheniy [About the design features of unique, large-span and high-rise buildings and structures] / V. I. Shumeiko, O. A. Kudinov // Inzhenernyy vestnik Doma [Engineering Bulletin of the Don]. – 2013. – № 4. – Pp. 213–224.
8. Zdaniya i kompleksy vysokotnye. Pravila ekspluatatsii : SP 394.1325800.2018 : Svod pravil [High-rise buildings and complexes. Operating rules : SP 394.1325800.2018 : Set of Rules] : utverzhdenny prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 13 sentyabrya 2018 goda № 578/pr [approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated September 13, 2018 No. 578/pr] : vveden v deystvie s 1 yanvarya 2019 g. [introduction from January 1, 2019] / Rosstandart, 2019.
9. Tekhnicheskiy reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy [Technical Regulations on the safety of buildings and structures] : Federal'nyy Zakon RF ot 30.12.2009 g. № 384-FZ [Federal Law of the Russian Federation No. 384-FZ dated December 30, 2009] : prinyat Gosudarstvennoj Dumoj 23 dekabrya 2009 goda [adopted by the State Duma on December 23, 2009] : odobren Sovetom Federatsii 25 dekabrya 2009 goda : redaktsiya ot 20.07.2013 [approved by the Federation Council on December 25, 2009 : edition from 07/20/2013] // Rossiyskaya gazeta. – 2009. – December 31. – № 255.
10. Topchiy, D. V. Osobennosti stroitel'nogo kontrolya na ob'ektaх unikal'nogo stroitel'stva [Features of construction control at unique construction objects] / D. V. Topchiy, V. S. Chernigov // Sovremennye naukoyomkie tekhnologii [Modern high technologies]. – 2019. – № 10-2. – Pp. 331–336.
11. Pravila obsledovaniya nesuschikh stroitel'nykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy : SP 13-102-2003 : Svod pravil [Rules for the inspection of load-bearing building structures of buildings and structures : SP 13-102-2003 : Set of Rules] : printet postanovleniem Gosstroya Rossii ot 21 avgusta 2003 g. № 153 [adopted by Resolution No. 153 of the State Construction Committee of Russia dated August 21, 2003] / Gosstroy of Russia. – Moscow, 2011.
12. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Osnovnye polozheniya : SP 47.13330.2016. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 11-02-96 : Svod pravil [Engineering surveys for construction. General provisions : SP 47.13330.2016 : Code of rules] : utverzhdenny prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 30 dekabrya 2016 g. № 1033/pr [approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 30, 2016 No. 1033/pr] : vveden v deystvie s 1 iyulya 2017 g. [introduction from July 1, 2017] / Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart). – Moscow : Standartinform, 2016.
13. Pravila otsenki fizicheskogo iznosa zhilykh zdaniy : VSN 53-86(r) : Vedomstvennye stroitel'nye normy [Rules for assessing the physical deterioration of residential buildings : Departmental building Regulations] : utverzhdenny Prikazom Gosudarstvennogo komiteta po grazhdanskому stroitel'stvu i arkhitekture pri Gosstroe SSSR ot 24 dekabrya 1986 g. № 446 [approved by Order of the State Committee for Civil Engineering and Architecture under the USSR State Construction Committee dated December 24, 1986 No. 446 and introduced by the Ministry of Housing and Communal Services of the RSFSR] : vneseny Minzhilkomkhozom RSFSR, vvedeny v deystvie 1 iyulya 1987 g. [introduced by the Ministry of Housing and Communal Services of the RSFSR, put into effect on July 1, 1987] / Gosstroy of Russia. – Moscow : FSUE CCI, 2007.
14. Betony. Pravila kontrolya i otsenki prochnosti : GOST 18105-2018 : Mezhgosudarstvenny standart [Concretes. Rules for strength control and assessment : GOST 18105-2018 : Interstate standard] : prinyat Mezhgosudarstvennym sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii po protokolu ot 29 noyabrya 2018 g. № 54 [adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification to Protocol No. 54 dated November 29, 2018] : vvedeny v deystvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 12 aprelya 2019 g. № 130-st s 1 yanvarya 2020 g. [put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated April 12, 2019 No. 130-st from January 1, 2020] / Rosstandart. – Moscow : Standartinform, 2019.
15. Organizatsiya stroitel'stva : SP 48.13330.2019. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 12-01-2004 : Svod pravil [Organization of construction : SP 48.13330.2019. Updated version of SNiP 12-01-2004 : Code of rules] : utverzhdenny prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 24 dekabrya 2019 goda № 861/pr [approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 24, 2019 No. 861/pr] : vveden v deystvie s 25 iyunya 2020 g. [introduction from June 25, 2020] / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii (Rosstandart) [Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart)]. – Moscow : Standartinform, 2019.
16. Nagruzki i vozdeystviya : SP 20.13330.2016. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85\* : Svod pravil [Loads and impacts: SP 20.13330.2016. Updated version of SNiP 2.01.07-85\* : Code of Rules] : utverzhdenny prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 3 dekabrya 2016 goda № 891/pr [approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 3, 2016 No. 891/pr] : vveden v deystvie s 1 iyulya 2017 g. [introduction from July 1, 2017] / Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart). – Moscow : Standartinform, 2016.

## REFERENCES

1. Sistema normativnykh dokumentov v stroitel'stve. Osnovnye polozheniya : SP 555.1325800.2025 : Svod pravil [The system of regulatory documents in construction. General provisions : SP 555.1325800.2025 : Code of rules] : utverzhdenny prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 12 marta 2025 g. № 159/pr [approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated March 12, 2025 No. 159/pr] : vveden v deystvie s 13 aprelya 2025 g. [introduction from April 13, 2025] / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii (Rosstandart) [Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart)]. – Moscow : Rosstandart, 2025. – 24 p.
2. Normativnaya baza vysotnogo stroitel'stva v Rossii [Regulatory Framework of High-Rise Construction in Russia] / S. V. Nikolaev, V. I. Travush, Yu. A. Tabunshchikov, A. N. Kolubkov, G. G. Solomanidin, A. A. Magai, N. V. Dubynin // Zhilishchnoe stroitel'stvo [Housing construction]. – 2016. – № 1-2. – Pp. 3–6.
3. Zdaniya i kompleksy vysokotnye. Pravila proektirovaniya : SP 267.1325800.2016 : Svod pravil [High-rise buildings and complexes. Rules for designing : SP 267.1325800.2016 : Set of Rules] : utverzhdenny prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 13 sentyabrya 2018 goda № 578/pr [approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated September 13, 2018 No. 578/pr] : vveden v deystvie s 1 yanvarya 2019 g. [introduction from January 1, 2019] / Rosstandart, 2019.
4. Zdaniya i kompleksy vysokotnye. Pravila ekspluatatsii : SP 394.1325800.2018 : Svod pravil [High-rise buildings and complexes. Operating rules : SP 394.1325800.2018 : Set of Rules] : utverzhdenny prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 13 sentyabrya 2018 goda № 578/pr [approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated September 13, 2018 No. 578/pr] : vveden v deystvie s 1 yanvarya 2019 g. [introduction from January 1, 2019] / Rosstandart, 2019.
5. Tekhnicheskiy reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy [Technical Regulations on the safety of buildings and structures] : Federal'nyy Zakon RF ot 30.12.2009 g. № 384-FZ [Federal Law of the Russian Federation No. 384-FZ dated December 30, 2009] : prinyat Gosudarstvennoj Dumoj 23 dekabrya 2009 goda [adopted by the State Duma on December 23, 2009] : odobren Sovetom Federatsii 25 dekabrya 2009 goda : redaktsiya ot 20.07.2013 [approved by the Federation Council on December 25, 2009 : edition from 07/20/2013] // Rossiyskaya gazeta. – 2009. – December 31. – № 255.
6. Topchiy, D. V. Osobennosti stroitel'nogo kontrolya na ob'ektaх unikal'nogo stroitel'stva [Features of construction control at unique construction objects] / D. V. Topchiy, V. S. Chernigov // Sovremennye naukoyomkie tekhnologii [Modern high technologies]. – 2019. – № 10-2. – Pp. 331–336.

- Communal Services of the Russian Federation dated December 3, 2016 No. 891/pr] : vveden v deystvie s 4 iyunya 2017 g. [introduction from June 4, 2017] / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskому regulirovaniyu i metrologii (Rosstandart) [Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart)]. – Moscow : Standartinform, 2016.
17. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy : SP 22.13330.2016. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01-83\* : Svod pravil [Foundations of buildings and structures : SP 22.13330.2016. Updated version of SNiP 2.02.01-83\* : Code of Rules] : utverzhden prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 16 dekabrya 2016 g. № 970/pr [approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 16, 2016 No. 970/pr] : vveden v deystvie s 17 iyunya 2017 g. [introduction from June 17, 2017] / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskому regulirovaniyu i metrologii (Rosstandart) [Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart)]. – Moscow : Standartinform, 2016.
18. Zashchita stroitel'nykh konstruktsiy ot korrozii : SP 28.13330.2017. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.03.11-85 : Svod pravil [Protection of building structures from corrosion: SP 28.13330.2017. Updated version of SNiP 2.03.11-85 : Code of Rules] : utverzhden prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 27 fevralya 2017 g. № 127/pr [approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated February 27, 2017 No. 127/pr] : vveden v deystvie s 28 avgusta 2017 g. [introduction from August 27, 2017] / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskому regulirovaniyu i metrologii (Rosstandart) [Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart)]. – Moscow : Standartinform, 2017.
19. Rekomendatsii po obsledovaniyu i monitoringu tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemykh zdaniy, rastpolozhennykh vblizi novogo stroitel'stva ili rekonstruktii [Recommendations for the inspection and monitoring of the technical condition of operated buildings located near new construction or reconstruction] : soglasovany Upravleniem razvitiya Genplana g. Moskvy : prinyaty i vvedeny v deystvie ukazaniem Moskomarkhitektury ot 12.11.98 g. № 98 [approved by the Moscow General Plan Development Department : adopted
- and put into effect by the instruction of the Moscow Architecture Department dated 12.11.98 No. 98]. – Moscow, 1998. – 74 p.
20. Posobie po obsledovaniyu stroitel'nykh konstruktsiy zdaniy [Manual on the inspection of building structures] : otdobroeno Departamentom razvitiya nauchno-tehnicheskoy politiki i proektno-izyskateльskikh rabot Minstroya Rossii : AO «TsNIIPROMZDANIY» [approved by the Department of Scientific and Technical Policy Development and Design and Survey Work of the Ministry of Construction of the Russian Federation : JSC TSNIIPROMZDANIY]. – Moscow, 1998.
21. Dron-tehnologii v stroitel'stve - sovremennye resheniya i vozmozhnosti [Dron-technologies in construction - modern] / I. V. Noskov, K. I. Noskov, S. V. Tinenskaya, S. A. Ananyev // Vestnik Evraziyskoy nauki [The Eurasian Scientific Journal]. – 2020. – Vol. 12, No. 5. – Pp. 27.
22. Bogdanets, E. S. Sovremennye metody vypolneniya obmernykh rabot i obsledovaniya promyshlennyykh zdaniy i sooruzhenii [Modern methods of performing measurement work and inspection of industrial buildings and structures] / E. S. Bogdanets, V. V. Musikhin // Vestnik permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. geologiya, geoinformatsionnye sistemy, gorno-neftyanoe delo [Bulletin of Perm State Technical University. geology, geoinformation systems, mining and oil business]. – 2009. – Vol. 8, No. 4. – Pp. 68–74.
23. Priemka v ekspluatatsiyu zavershennykh stroitel'stвom ob'ektov : SP 68.13330.2017. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 3.01.04-87 : Svod pravil [Commissioning of completed facilities: SP 68.13330.2017. Updated version of SNiP 3.01.04-87 : Code of rules] : utverzhden prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaistva Rossiiskoi Federatsii ot 27 iyulya 2017 goda № 1033/pr [approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated July 27, 2017 No. 1033/pr] : vveden v deistvie s 28 yanvarya 2018 g. [introduction from January 28, 2018] / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskому regulirovaniyu i metrologii (Rosstandart) [Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart)]. – Moscow : Standartinform, 2017.
24. Xu, C. Izuchenie upravleniya riskami bezopasnosti v yevotnom zhilishchnom stroitelstve [Study of safety risk management in high-rise housing construction] / C. Xu // Molodoj uchenyj [Young Scientist]. – 2022. – No. 17 (412). – Pp. 48–51.

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_16

## Исследование влияния критических факторов риска на стоимость и продолжительность в строительной отрасли Ирака

Investigation the Impact of Critical Risk Factors on Cost and Time in the Iraqi Construction Industry

**Кабанов Вадим Николаевич**

Доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, kabanovn@yandex.ru

**Kabanov Vadim Nikolaevich**

Doctor of Economical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, kabanovn@yandex.ru

**Аль-Джубури Хуссейн А. М. С.**

Аспирант, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Hussainjuboori87@gmail.com

**Al-Juboori Hussein A. M. S.**

Postgraduate student, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Hussainjuboori87@gmail.com

**Аннотация.** Строительная отрасль является жизненно важным сектором экономики во всём мире. При возведении объектов капитального строительства команда управления часто сталкивается с рисками, которые могут поставить под угрозу успешное завершение проекта. В данном исследовании представлен всесторонний анализ строительной отрасли Ирака и окружающей среды для выявления потенциальных источников риска. Риски определяются как факторы неопределенности, влияющие на цели проекта, такие как стоимость, продолжительность и качество.

Для достижения целей исследования был разработан комплексный план исследований, включающий анализ количественных и качественных данных. Данные были собраны с привлечением экспертов, с помощью структурированных интервью, анализа документов и анкетирования с привлечением различных заинтересованных сторон, включая руководителей и менеджеров проектов. В ходе этого исследования было выявлено 64 фактора риска, влияющего на строительную отрасль Ирака. Для классификации факторов риска были получены количественные данные с помощью анкетирования, состоящего

**Abstract.** The construction industry, a vital economic sector globally, faces risks that can endanger the success of project completion. This study provides a comprehensive analysis of the Iraq construction industry and its environment to identify potential risk sources. Risks are defined as uncertainties affecting project objectives such as cost, time, and quality.

A multifaceted research plan, incorporating both quantitative and qualitative data, was developed to achieve the research goals. Data was collected through structured interviews, document reviews and questionnaires, engaging a diverse group of stakeholders, including executives and project managers. This study identified 64 risk factors impacting the Iraq construction industry. To classify the risk factors, quantitative data was obtained through a survey consisting of two sections: personal information and

### Введение

Строительная отрасль является одним из ключевых видов экономической деятельности во всём мире и подвержена различным рискам, которые могут поставить под угрозу успешное завершение проектов. Под успешным завершением проекта здесь понимается завершение строительства в срок, установленный проектом, без превышения величины стоимости, установленной сметой, а также соответствие готовой продукции требованиям национальных стандартов. Изменение одного из критериев успешного завершения строительного проекта, как правило, в сторону увеличения, приводит к снижению экономической эффективности. Вероятность увеличения продолжительности и стоимости строительства принято измерять показателем, получившим название «риск».

Управление рисками направлено на обеспечение заданной величины экономической эффективности строительного проекта. Риски можно определить, как влияние неопределенности на критерии проекта (продолжительность, стоимость и качество), которые необходимо регулярно измерять, чтобы минимизировать вероятность отклонения от показателей, установленных проектом, а также смягчить любые дестабилизирующие воздействия на процесс строительства. Управление рисками часто называют риск-менеджментом. Риск-менеджмент представляет собой систему управленческих решений, способных уменьшить риски и повысить вероятность достижения показателей, установленных проектом.

Реализации строительного проекта могут препятствовать задержки, отмены и необходимость корректировки

из двух разделов: личной информации и закрытых вопросов с использованием 5-балльной шкалы Лайкера для оценки значимости факторов риска.

Анализ показал, что наибольшее влияние оказывает высокая температура наружного воздуха летом (X9.1), за ней следуют инфляция и колебания цен (X7.2) и плохая координация между заказчиком и подрядчиком (X1.2). В ходе исследования были построены уравнения множественной регрессии для оценки влияния этих факторов на стоимость и продолжительность проекта. Анализ, выполненный при помощи уравнений множественной регрессии, показал, что плохая координация между заказчиком и подрядчиком (X1.2) оказывает наибольшее влияние на величину общего риска проекта. На этом основании подчёркивается необходимость разработки научно обоснованных стратегий управления для повышения эффективности строительных проектов.

**Ключевые слова:** риск-менеджмент; критические факторы; эксперимент; стоимость; продолжительность; фокус-группа; Ирак.

closed-ended questions using a 5-point Likert scale to assess the significance of the risk factors.

The analysis revealed that high temperature in summer (X9.1) ranked first, followed by Inflation and price fluctuations (X7.2) and poor coordination between clients and contractors (X1.2). The study developed equations to evaluate the impact of these factors on project costs and time, highlighting that poor coordination between clients and contractors (X1.2) has the greatest impact on overall project outcomes, emphasizing the need for effective management strategies to enhance performance in construction projects.

**Keywords:** risk management; critical factors; experimental; cost; time; focus group discussions (FGD); Iraq.

традиционных способов ведения бизнеса. В результате многие компании несут значительные убытки, исчисляемые миллионами долларов, из-за неудачных проектов [1; 2]. Эти проблемы возникают из-за различных факторов, возникающих в ходе выполнения проекта. К числу наиболее значимых факторов следует отнести:

- во-первых, качественную проблему, связанную с нехваткой квалифицированных или опытных работников, которая приводит к потенциальным ошибкам и увеличению расходов на обучение [3];
- во-вторых, количественную проблему, характеризующуюся нехваткой трудовых ресурсов, что приводит к прямым задержкам реализации проектов, к снижению производительности и ограниченным возможностям для профессиональной подготовки [4];
- в-третьих, климатические проблемы, например, в странах с жарким климатом экстремальная жара и связанные с ней экологические условия могут создавать дополнительные проблемы [5].

Таким образом, для любой организации важно изучать, выявлять риски, возникающие при реализации проектов строительства, и своевременно принимать меры по смягчению их дестабилизирующего воздействия. В этом контексте данное исследование направлено на выявление факторов риска, влияющих на практику управления строительными проектами.

Цель работы – установить зависимость величины риска реализации строительного проекта от величины наиболее значимых факторов, описывающих дестабилизиру-

рующее воздействие. Для достижения заявленной цели решены следующие научные задачи:

- выявлены факторы, оказывающие дестабилизирующее воздействие на процессы строительства;
- обоснована группировка факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на величину риска;
- получено линейное уравнение регрессии, описывающее зависимость величины риска от влияния наиболее значимых факторов.

## Материалы и методы

В рамках настоящей работы применялись методы теоретического научного исследования: теоретический анализ научно-технической литературы, синтез, дедукция, индукция.

В большинстве исследований, предполагающих выполнение экспертизы оценки, не представляется возможным изучить всю интересующую нас популяцию из-за практических ограничений, таких как время, ресурсы и доступность. Обычно прибегают к изучению подмножества или выборки популяции [6; 7]. Для того чтобы выборка служила точным отображением совокупности, крайне важно, чтобы при её отборе использовались надлежащие методы отбора. Это гарантирует, что выборка будет репрезентативной, отражающей ключевые характеристики и вариативность, присущие популяции [8]. Подходы к определению объёма выборки разделяют на случайные и неслучайные. При случайной выборке все члены целевой группы имеют равные шансы или вероятность быть отобранными для включения в выборку исследования. Это обеспечивает репрезентативность и позволяет делать статистические выводы о широкой совокупности.

С другой стороны, методы неслучайной выборки не обеспечивают равных шансов на отбор для всех членов популяции. Вместо этого выборка отбирается по определённым критериям или на основе суждения исследователя, а не чисто случайным образом [9]. В случае данного исследования используемый метод выборки является неслучайным. Это связано с тем, что исследование требует участия экспертов и технических специалистов, обладающих специальными знаниями и опытом работы в строительной отрасли Ирака. Благодаря целенаправленному отбору этих информированных людей исследователи могут получить богатую, глубокую информацию, которая может быть недоступна при случайном подходе к выборке.

Уравнение Томпсона используется для определения размера выборки, необходимого для оценки доли населения с заданным уровнем доверия и погрешностью, как показано в уравнении (1) [10]:

$$n = \frac{N \times p \times (1-p)}{(N-1) \times \left( \frac{d^2}{z^2} \right) + p \times (1-p)}, \quad (1)$$

где  $z$  – верхняя точка  $a/2$  нормального распределения;

$n$  – объём выборки;

$N$  – численность популяции;

$d$  – предел ошибки ( $d = 0,05$ );

$P$  – предполагаемая вероятность.

Формула зависит от неизвестной доли населения  $p$ . Если нет предварительной оценки, доступной до проведения опроса, консервативный подход заключается в использовании  $p = 0,5$  для расчёта размера выборки. Это связано с тем, что выражение  $p(1-p)$  достигает своего

максимального значения, когда  $p$  равно  $1/2$ , что приводит к наибольшему требуемому размеру выборки в соответствии с этой формулой [11].

Оценка факторов рисков предполагает определение, обнаружение и распознавание рисков. Выявление наиболее важных препятствий, которые мешают компаниям принимать и внедрять соответствующие управлочные решения, требует присутствия людей с опытом и способностью распознавать риски [12]. Для этого также необходимо всесторонне изучить строительную отрасль, её деятельность, внешнюю среду, заинтересованные стороны и т. д. Таким образом, обеспечиваются сбор экспертных мнений в строительной отрасли Ирака и учёт влияния местоположения и географического района страны при оценке и выявлении этих рисков [13]. В рамках данного исследования экспертная оценка факторов риска собрана и идентифицирована при помощи трёх методов: 1) структурированных интервью, 2) документального обзора, 3) анкетирования.

До выполнения процедур экспертизы оценки целесообразно выполнять обсуждения в фокус-группах. Метод обсуждения в фокус-группах – это стратегия качественного исследования, что позволяет выявить различные точки зрения на определённую тему посредством группового взаимодействия. Фокус-группы обычно строятся таким образом, чтобы в них участвовали люди, обладающие схожими чертами характера или опытом. Как правило, оптимальный размер фокус-группы составляет 6–12 участников. Кроме того, рекомендуется проведение не менее трёх фокус-раундов, чтобы собрать всесторонний взгляд на тему исследования [14].

Для получения линейного уравнения множественной регрессии применялись хорошо известные методы математической статистики и планирования эксперимента. Для получения постоянных коэффициентов в линейном уравнении множественной регрессии использовался стандартный метод наименьших квадратов.

## Анализ данных и результаты

Для сбора данных о ключевых факторах риска в строительной отрасли Ирака проведены структурированные интервью. В исследовании участвовали представители заинтересованных сторон, включая руководителей, менеджеров проектов и государственных служащих. Структурированный протокол интервью включает биографии респондентов, воспринимаемые риски, причины, последствия, существующие практики и рекомендации по улучшению. Интервью проводились лично или в режиме видеоконференции.

В дополнение к интервью выполнен документальный обзор. Документальный обзор посвящён ключевым факторам, влияющим на строительство в различных развивающихся странах, с особым вниманием к Ираку и его соседям. Особое внимание удалено таким факторам, как климат, безопасность, экономика и доступность строительных материалов. Такой комбинированный подход позволил получить полное представление о важнейших факторах риска в строительном секторе. На основе проведённых интервью и обзора предыдущих исследований было выявлено 162 фактора риска, влияющих на строительную отрасль.

Перед выполнением структурированного анкетирования проводилось обсуждение в фокус-группах, в результате

Код	Источники	Количество факторов		
		Раунд 1	Раунд 2	Раунд 3 / Раунд 4
$X_1$	Организационные	15	10	7
$X_2$	Технологические	15	12	9
$X_3$	Продолжительность	9	7	6
$X_4$	Рабочее место	9	6	6
$X_5$	Безопасность и охрана труда	18	13	10
$X_6$	Качество	5	5	5
$X_7$	Экономические	22	15	12
$X_8$	Военные	4	4	4
$X_9$	Климатические условия	5	5	5
Выходы		102	77	64

Табл. 1. Итоги раундов ФГД  
Tab. 1. FGD Rounds Outputs

того которого количество факторов было уменьшено со 162 до 64 (таблица 1).

После проведения исследования в фокус-группах собраны количественные данные с помощью структурированного анкетирования. Это анкетирование ориентировано на более широкую аудиторию в строительной отрасли и преследует цель сбора различных точек зрения на выявленные факторы риска. В анкете перечислены различные потенциальные факторы риска (например, климатические условия, экономическая ситуация и доступность строительных материалов), и респондентам предложено оценить их значимость.

Анкета состоит из двух разделов. В первом разделе собрана личная информация о респондентах, включая их пол, возраст, образование, опыт и тип работы. Второй раздел содержит 64 вопроса с закрытыми ответами по 5-балльной шкале Лайкера. Шкала измерения от 1 до 5, где 1 соответствует совсем не важному влиянию, а 5 – очень высокому влиянию. Это придаёт шкале измерения свойство интервальной шкалы, что позволяет подвергнуть собранные данные качественному анализу, в которых рассматриваются различные факторы риска и их влияние с учётом особенностей строительной отрасли Ирака. Анализ ответов позволил составить комплексный профиль рисков для строительной отрасли, определить приоритетность критических рисков и помочь в создании эффективной системы управления рисками.

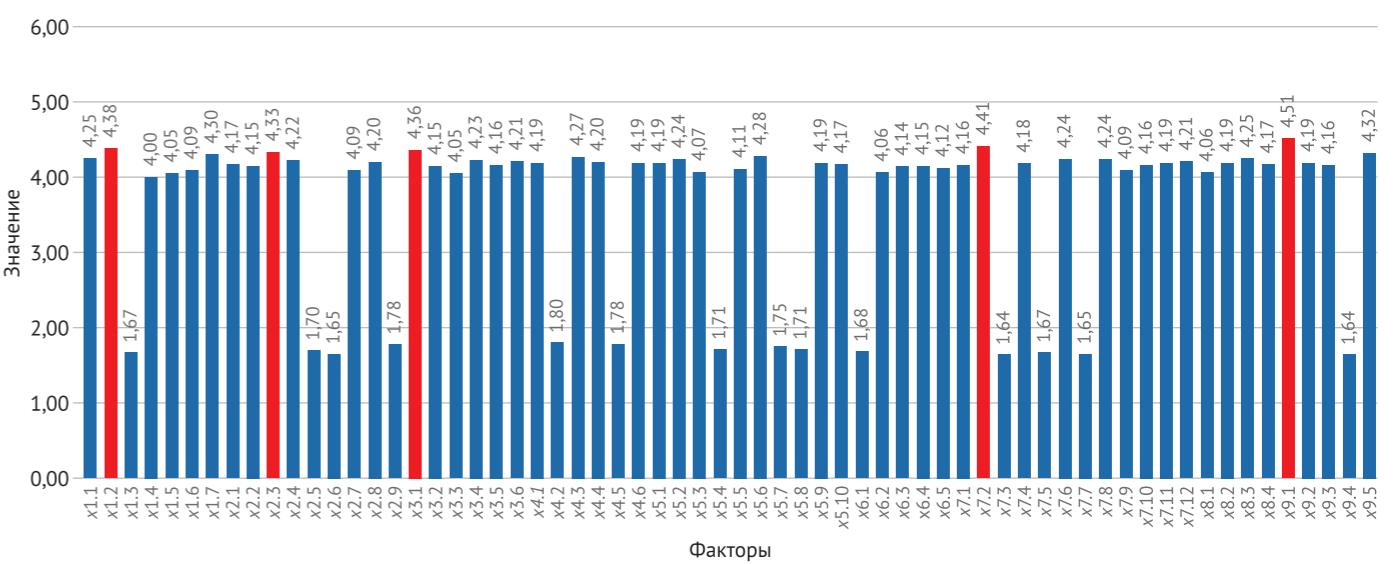


Рис. 1. Результаты средней степени влияния каждого из 64 факторов  
Fig. 1. Results of the mean degree of influence of each of the 64 factors

Для анкетирования из 30 компаний Ирака было отобрано по 5 инженеров от каждой компании. Статистика  $z = 1,96$  при 5 % уровне ошибки. В результате объём выборки, который был распределён, составляет:

$$n = \frac{150 \times 0,5 \times (1-0,5)}{(150-1) \times \left( \frac{0,05^2}{1,96^2} \right) + 0,5 \times (1-0,5)} = 108 \text{ (взять 110).}$$

Было распространено 110 анкет, что соответствует размеру выборки, полученному в результате расчётов.

Для ранжирования факторов было рассчитано среднее значение. Оценка факторов на основе их среднего значения – это метод, используемый для анализа и измерения эффективности конкретных переменных путём определения их средних значений.

На основе полученных результатов определены пять факторов, имеющих наибольшее значение для строительных рисков (рисунок 1). Эти факторы выделяют критические области, которые существенно влияют на общий риск строительных проектов, предоставляя ценную информацию для разработки эффективных стратегий управления рисками.

В контексте финансовых рисков значение ( $Y$ ) может быть определено на основе оценок и мнений экспертов в данной области. Эксперты используют свой опыт, знания и аналитические навыки для оценки потенциальных финансовых рисков, связанных с различными проектами или инвестициями. Индивидуальные оценки всех экспертов собираются, и рассчитывается среднее значение. Это среднее значение становится величиной ( $Y$ ), обеспечивающей согласованное мнение о финансовом риске для каждого возможного сценария.

Аналогично стоимости, влияние каждого фактора на продолжительность проекта ( $Y_p$ ) может быть определено экспериментально. Каждый фактор оценивался по его ожидаемому влиянию на стоимость и продолжительность, что позволяет выявить наиболее влиятельные факторы и разработать эффективные стратегии управления временем и затратами в проекте.

В целом, чтобы обеспечить глубокое понимание факторов риска в строительстве, данные, собранные с помощью исследовательских инструментов, таких как анкеты и интервью, подвергнуты комплексному процессу анали-

за. Этот процесс включает в себя кодирование исходных данных путём присвоения числовых или категориальных меток, упорядочивание информации [15]. Затем отредактированные данные скомпилированы и табулированы с помощью программ SPSS и Excel, организованы в значимые строки и столбцы. Это облегчает визуализацию и интерпретацию закономерностей, тенденций и взаимосвязей в данных. Для ранжирования факторов были рассчитаны средние веса, присвоенные экспертами каждому фактору. На рисунке 1 представлена гистограмма, показывающая результаты средней степени влияния каждого из 64 факторов.

Ранжирование факторов показывает, что  $X_{9,1}$  (высокая температура летом) обладает наиболее высоким рангом. Этот фактор важен, поскольку высокая температура может негативно повлиять на график работ и качество используемых материалов. Например, сильная жара может привести к ухудшению свойств таких материалов, как бетон, что потребует задержки проекта или переоценки используемых методов [16]. Кроме того, работа в сложных климатических условиях может повлиять на безопасность и производительность труда, что увеличит общую стоимость проекта.

Следующий по значимости фактор –  $X_{7,2}$  (инфляция и колебания цен) был определён как основная проблема для проектов с точки зрения составления бюджета и финансового планирования. Колебания цен на сырьё затрудняют точную оценку затрат, что может привести к превышению бюджета или необходимости внесения неожиданных изменений в проект. Эти колебания оказывают давление на команды планирования, которые должны найти способы сокращения расходов без ущерба для качества.

На третьем месте фактор  $X_{1,2}$  (плохая координация между заказчиком и подрядчиком). Влияние этого фактора может привести к серьёзным проблемам при реализации проекта. Когда между двумя сторонами нет чёткого механизма коммуникации, количество ошибок и задержек может увеличиться. Это приводит к переделкам, что увеличивает затраты и нарушает график проекта. Улучшение координации может значительно повысить эффективность и сократить количество ошибок.

Следующий фактор  $X_{3,1}$  (использование инструментов планирования и составления графиков) занимает важное место в повышении эффективности и организации проекта. Инструменты планирования предоставляют мощные аналитические возможности, которые помогают отслеживать ход работ, выявлять потенциально «узкие места» и обеспечивать эффективное использование ресурсов. Внедрение современных методов планирования позволяет уменьшить количество проблем и повысить производительность.

Фактор  $X_{2,3}$  (стремительный технологический прогресс) признан фактором, создающим значительные риски и требующим быстрой адаптации к меняющимся инструментам и методам. Внедрение современных технологий может со временем повысить эффективность и сократить расходы, однако для обеспечения эффективного использования этих инструментов необходимо постоянное обучение.

Индивидуальные оценки всех экспертов были собраны, и среднее значение было рассчитано для определения

значения ( $Y_i$ ) для каждого возможного сценария. Предлагаемое уравнение (2) представлено в виде:

$$Y_i = C + \sum_{i=1}^{i=s} C_i X_i, \quad (2)$$

где  $Y_i$  представляет собой общий уровень риска, связанный со строительно-монтажными работами;

$X_i$  – значимые факторы, влияющие на этот риск;

$C_i$  – взвешенная оценка, которая количественно определяет влияние  $i$ -го фактора на общий риск;

$C$  – постоянный коэффициент, который описывает величину базового уровня риска (то есть если все факторы равны нулю).

Уравнение 2 служит основополагающей моделью для оценки риска в строительных проектах. В этом уравнении суммирование отражает совокупный эффект всех соответствующих факторов, что позволяет провести комплексный анализ динамики риска.

Чтобы определить риск увеличения стоимости проекта, были собраны индивидуальные оценки всех экспертов, и среднее значение было рассчитано для определения значения ( $Y_C$ ) для каждого возможного сценария. С использованием методов регрессии и анализа данных в Excel построено следующее уравнение (3), которое иллюстрирует, как основные факторы влияют на стоимость проекта:

$$Y_C = -0,256 + 0,156x_{9,1} + 0,338x_{7,2} + 0,272x_{1,2} + 0,213x_{3,1} + 0,222x_{2,3}. \quad (3)$$

Коэффициенты при аргументах (например, 0,156, 0,338 и т. д.) указывают на степень влияния каждого фактора на стоимость. Чем больше значение коэффициента, тем сильнее влияние данного фактора на стоимость. В данном уравнении влияние фактора  $X_{7,2}$  (инфляция и колебания цен) на стоимость является самым высоким.

Чтобы определить риск увеличения продолжительности проекта, были собраны индивидуальные оценки всех экспертов, и среднее значение было рассчитано для определения значения ( $Y_T$ ) для каждого возможного сценария. Уравнение (4) показывает взаимосвязь между основными факторами и продолжительностью проекта. Влияние фактора  $X_{1,2}$  (плохая координация между заказчиком и подрядчиком) имеет наиболее значительное влияние на продолжительность проекта.

$$Y_T = -0,038 + 0,211x_{9,1} + 0,169x_{7,2} + 0,311x_{1,2} + 0,200x_{3,1} + 0,172x_{2,3}. \quad (4)$$

Важно рассчитать общее влияние факторов риска ( $R$ ). Этот расчёт основывается на понимании того, как каждый фактор влияет на конкретные переменные, такие как время и стоимость. Анализируя это влияние, лица, принимающие решения, могут сделать обоснованный выбор, способствующий улучшению производительности и повышению эффективности. Для расчёта уравнения общей величины риска проекта ( $R$ ) для каждого возможного сценария ( $i$ ) предлагается применять уравнение (5):

$$R = (Y_C \times \text{Importance of Cost}) + (Y_T \times \text{Importance of Time}). \quad (5)$$

Доля степени риска продолжительности и стоимости зависит от типа и размера проекта. Для простоты расчётов в данном исследовании были приняты равные веса для времени и затрат, каждый из которых имеет вес 0,5. Это отражает одинаковую значимость обоих факторов для успеха проекта, так как приоритет одного над другим может привести к ограничению применимости результатов и повлиять на обобщаемость результатов. Статистиче-

ская обработка результатов экспертной оценки позволила получить уравнение общего влияния основных факторов (6):

$$R = -0,109 + 0,183x_{9,1} + 0,253x_{7,2} + 0,292x_{1,2} + 0,206x_{3,1} + 0,197x_{2,3}. \quad (6)$$

Анализируя коэффициенты, можно сделать вывод, что  $X_{1,2}$  является наиболее влиятельным фактором, так как значение его постоянного коэффициента 0,292 является самым высоким среди всех факторов. Коэффициент 0,292 показывает, что  $X_{1,2}$  (плохая координация между заказчиком и подрядчиком) оказывает значительное влияние на результат вычисления количественного значения  $R$ . При увеличении значения  $X_{1,2}$  на одну единицу результат увеличится примерно на 0,292 при неизменности других факторов. То, что это наиболее влиятельный фактор среди всех переменных, означает, что изменения в  $X_{1,2}$  окажут большее влияние на результат по сравнению с другими факторами. Это указывает на необходимость мониторинга и управления  $X_{1,2}$  для достижения лучших показателей.

### Заключение

В данном исследовании риски определяются как факторы неопределённости, влияющие на цели проекта, такие как стоимость, продолжительность и качество. Для достижения целей исследования был разработан комплексный план исследований, включающий как количественные, так и качественные данные. Начальный этап включает в себя выявление и распознавание рисков, для чего требуются опытные специалисты, способные распознавать препятствия на пути принятия эффективных управленческих решений.

Для сбора данных использовались три метода: структурированные интервью, документальные обзоры и анкетирование. Этот комплексный подход позволил выявить 64 фактора риска, влияющих на строительную отрасль Ирака, что позволило получить ценную информацию

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Analyzing the factors affecting construction project schedules amidst COVID-19 pandemic / N. Adepu, Sh. Kermanshachi, A. Pamidimukkala, K. Loganathan // Project Leadership and Society. – 2023. – Vol. 4. – Art. 100100.
2. Cross-functional collaboration in the early phases of capital projects: Barriers and contributing factors / Z. Yin, C. Caldas, D. de Oliveira, Sh. Kermanshachi, A. Pamidimukkala // Project Leadership and Society. – 2023. – Vol. 4. – Art. 100092.
3. Эффективность применения алгоритмизации при разработке ППР для снижения уровня травматизма на строительной площадке при капитальном строительстве, реконструкции и перепрофилировании / Д. В. Топчий, А. Ю. Юртайис, Е. Первова, Р. В. Дернов // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 3 (74). – С. 94–98.
4. Systematic literature review of project failures: Current trends and scope for future research / S. Gupta, A. Gunasekaran, J. Antony, Sh. Gupta, S. Bag, D. Roubaud // Computers & Industrial Engineering. – 2019. – Vol. 127. – Pp. 274–285.
5. Organizational and technological solutions for controlling concrete structures projects in the dry hot weather in Iraq / L. S. M. Al-Asadi, M. A. Fakhratov, H. A. M. S. Al-Juboori. – DOI 10.1051/bioconf/202410706012 // 19th International Conference Water and Wastewater: Transportation, Treatment, Management "Yakovlev Readings" (YRC-2024) : BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 107. – Art. 06012.
6. Berndt, A. E. Sampling methods / A. E. Berndt. – DOI 10.1177/0890334420906850 // Journal of Human Lactation. – 2020. – Vol. 36, Iss. 2. – Pp. 224–226.
7. Elfil, M. Sampling methods in clinical research; an educational review / M. Elfil, A. J. E. Negida. – DOI 10.22037/emergency. v5i1.15215 // Emergency. – 2017. – Vol. 5, No. 1. – P. e52.
8. Andrade, C. J. I. Sample size and its importance in research / C. J. I. Andrade // Indian Journal of Psychological Medicine. – 2020. – Vol. 42, Iss. 1. – Pp. 102–103.
9. Adam, A. M. Sample Size Determination in Survey Research / A. M. Adam. – DOI 10.9734/JSRR/2020/v26i530263 // Journal of Scientific Research and Reports. – 2020. – Vol. 26, Iss. 5. – Pp. 90–97.
10. Scheaffer, R. L. Probability and statistics for engineers / R. L. Scheaffer, M. S. Mulekar, J. T. McClave. – DOI 10.2307/1269641 // Technometrics. – 2010. – Vol. 37, No. 2. – P. 39.
11. Statistics for business and economics / J. T. McClave, P. G. Benson, T. Sincich. – Boston : Pearson Education. – 2011. – 532 p.
12. Абрамов, И. Л. Аналитический инструментарий анализа устойчивости строительных предприятий / И. Л. Абрамов // Строительное производство. – 2019. – № 2. – С. 9–12.
13. Лапидус, А. А. Применение методов экспертной оценки в научном исследовании. Необходимое количество экспертов / А. А. Лапидус, А. В. Загорская // Строительное производство. – 2020. – № 3. – С. 21–33.
14. Focus group discussions: Three examples from family and consumer science research / M. E. B. Garrison, S. Pierce, P. A. Monroe, D. D. Sasser, A. C. Shaffer, L. Blalock // Family and Consumer Sciences Research Journal. – 2009. – Vol. 27, Iss. 4. – Pp. 428–450.
15. Лапидус, А. А. Идентификация и анализ технических рисков при строительстве малоэтажных жилых зданий / А. А. Лапидус, А. С. Воробьев // Строительное производство. – 2021. – № 2. – С. 2–7.

для совершенствования методов управления. В ходе исследования были собраны количественные данные путём анкетирования специалистов строительного сектора Ирака. Анкетирование состояло из двух разделов: в первом была собрана личная информация о респондентах, а второй включал 64 закрытых вопроса с использованием 5-балльной шкалы Лайкерта для оценки значимости факторов риска. В общей сложности было собрано 110 анкет от респондентов, занимающихся управлением строительством, большинство из которых имеют опыт работы не менее 16 лет и работают в различных университетах и компаниях Ирака.

После выявления этих факторов было составлено уравнение влияния для оценки уровня влияния критических факторов на стоимость, продолжительность, а также на величину общего риска строительного проекта. Практическое применение уравнений (3)–(6) для определения степени риска строительных проектов в Ираке позволяет сделать следующие выводы:

1. В результате исследования выявлены факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на вероятность рисков в проектах строительства в условиях Ирака.
2. Применение уравнений регрессии (3), (4), (6) значительно упрощает процедуру оценки риска строительного проекта, а также обеспечивает возможность отдельного анализа риска в отношении показателей продолжительности и стоимости, которые установлены в проектной документации.
3. В настоящее время продолжаются исследования по разработке методики формирования организационно-технологических решений, направленных на смягчение общего риска и рисков, связанных с обеспечением продолжительности и стоимости строительного проекта.

16. Фахратов, М. А. Выбор средств механизации производства бетонных работ в условиях сухого жаркого климата / М. А. Фахратов, Х. А. М. С. Аль-Джубури, К. В. Полосина. – DOI 10.54950/26585340\_2023\_4\_123 // Строительное производство. – 2023. – № 4 (48). – С. 123–128.

## REFERENCES

1. Analyzing the factors affecting construction project schedules amidst COVID-19 pandemic / N. Adepu, Sh. Kermanshachi, A. Pamidimukkala, K. Loganathan // Project Leadership and Society. – 2023. – Vol. 4. – Art. 100100.
2. Cross-functional collaboration in the early phases of capital projects: Barriers and contributing factors / Z. Yin, C. Caldas, D. de Oliveira, Sh. Kermanshachi, A. Pamidimukkala // Project Leadership and Society. – 2023. – Vol. 4. – Art. 100092.
3. Effektivnost' primeneniya algoritmizatsii pri razrabotke PPR dlya snizheniya urovnya travmatizma na stroitel'noj ploschadke pri kapital'nom stroitel'stve, rekonstruktsii i pereprofilirovani [The effectiveness of algorithmization in the development of safety measures to reduce the level of injuries on the construction site during capital construction, reconstruction and redevelopment] / D. V. Topchiy, A. Yu. Yurgaitis, E. Pervova, R. V. Dernov // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. – 2019. – № 3 (74). – Pp. 94–98.
4. Systematic literature review of project failures: Current trends and scope for future research / S. Gupta, A. Gunasekaran, J. Anthony, Sh. Gupta, S. Bag, D. Roubaud // Computers & Industrial Engineering. – 2019. – Vol. 127. – Pp. 274–285.
5. Organizational and technological solutions for controlling concrete structures projects in the dry hot weather in Iraq / L. S. M. Al-Asadi, M. A. Fakhratov, H. A. M. S. Al-Juboobi. – DOI 10.1051/bioconf/202410706012 // 19th International Conference Water and Wastewater: Transportation, Treatment, Management "Yakovlev Readings" (YRC-2024) : BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 107. – Art. 06012.
6. Berndt, A. E. Sampling methods / A. E. Berndt. – DOI 10.1177/0890334420906850 // Journal of Human Lactation. – 2020. – Vol. 36, Iss. 2. – Pp. 224–226.
7. Elfil, M. Sampling methods in clinical research; an educational review / M. Elfil, A. J. E. Negida. – DOI 10.22037/emergency.v5i1.15215 // Emergency. – 2017. – Vol. 5, No. 1. – P. e52.
8. Andrade, C. J. I. Sample size and its importance in research / C. J. I. Andrade // Indian Journal of Psychological Medicine. – 2020. – Vol. 42, Iss. 1. – Pp. 102–103.
9. Adam, A. M. Sample Size Determination in Survey Research / A. M. Adam. – DOI 10.9734/JSR/2020/v26i530263 // Journal of Scientific Research and Reports. – 2020. – Vol. 26, Iss. 5. – Pp. 90–97.
10. Scheaffer, R. L. Probability and statistics for engineers / R. L. Scheaffer, M. S. Mulekar, J. T. McClave. – DOI 10.2307/1269641 // Technometrics. – 2010. – Vol. 37, No. 2. – P. 239.
11. Statistics for business and economics / J. T. McClave, P. G. Benson, T. Sincich. – Boston : Pearson Education. – 2011. – 532 p.
12. Abramov, I. L. Analiticheskij instrumentarij analiza ustoichivosti stroitel'nykh predpriyatiy [Analytical tools for analyzing the sustainability of construction enterprises] / I. L. Abramov // Stroitel'noe proizvodstvo [Construction production]. – 2019. – No. 2. – Pp. 9–12.
13. Lapidus, A. A. Primenenie metodov ehkspertnoj otsenki v nauchnom issledovanii. Neobkhodimoe kolichestvo ehkspertov [Application of expert assessment methods in scientific research. The required number of experts] / A. A. Lapidus, A. V. Zagorskaya // Stroitel'noe proizvodstvo [Construction production]. – 2020. – No. 3. – Pp. 21–33.
14. Focus group discussions: Three examples from family and consumer science research / M. E. B. Garrison, S. Pierce, P. A. Monroe, D. D. Sasser, A. C. Shaffer, L. Blalock // Family and Consumer Sciences Research Journal. – 2009. – Vol. 27, Iss. 4. – Pp. 428–450.
15. Lapidus, A. A. Identifikatsiya i analiz tekhnicheskikh riskov pri stroitel'stve maloyetazhnykh zhilykh zdaniy [Identification and analysis of technical risks in the construction of low-storey residential buildings] / A. A. Lapidus, A. S. Vorobyov // Stroitel'noe proizvodstvo [Construction production]. – 2021. – No. 2. – C. 2–7.
16. Fakhratov, M. A. Vybor sredstv mekhanizatsii proizvodstva betonnykh rabot v usloviyakh sukhogo zharkogo klimata [The choice of means of mechanization of concrete works in a dry hot climate] / M. A. Fakhratov, H. A. M. S. Al-Juburi, K. V. Polosina. – DOI 10.54950/26585340\_2023\_4\_123 // Stroitel'noe proizvodstvo [Construction production]. – 2023. – No. 4 (48). – Pp. 123–128.

УДК 621.039.58

## Численная оценка рисков на различных стадиях жизненного цикла АЭС

Numerical Risk Assessment at Various Stages of the NPP Life Cycle

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_22

## Енговатов Игорь Анатольевич

Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство объектов тепловой и атомной энергетики», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, eng46@mail.ru

Engovatov Igor Anatolyevich

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Energy Facilitie, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, eng46@mail.ru

## Морозенко Андрей Александрович

Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство объектов тепловой и атомной энергетики», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, morozenkoaa@vgsu.ru

Morozenko Andrey Aleksandrovich

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Energy Facilitie, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, morozenkoaa@vgsu.ru

© Енговатов И. А., Морозенко А. А., Альшрайдех М., 2025, Строительное производство № 2'2025

## Альшрайдех Мухаммад

Аспирант кафедры «Строительство объектов тепловой и атомной энергетики», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Msh.19894@yahoo.com

Alshraideh Mohammad

Postgraduate student of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Energy Facilitie, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Msh.19894@yahoo.com

**Аннотация.** Анализ результатов и цель работы, представленных в ряде исследований авторов, убедительно демонстрируют критическую роль оценки рисков на всех этапах жизненного цикла атомных электростанций (ЖЦ АЭС).

**Цель.** Необходимо рассмотреть применение методов многокритериального анализа: метода анализа иерархий и метода нечеткой логики для численной оценки стадии жизненного цикла атомных электростанций с учётом рисков на примере стадии вывода АЭС из эксплуатации. Данная работа направлена на предоставление практических рекомендаций для специалистов в области атомной энергетики, а также на развитие теоретических основ управления рисками в сложных инженерных системах.

**Методы.** Отличительной особенностью предложенного подхода является интеграция методов иерархического анализа и метода нечеткой логики, что позволяет учитывать многокритериальность и неопределенность, свойственные данному процессу. Среди многообразия методов оценки рисков наиболее эффективным является многокритериальный анализ. Данный анализ решений применяется как инструмент в сложных управленииских ситуациях, таких как оценка ЖЦ АЭС.

**Abstract.** The analysis of the results and the purpose of the work presented in a number of studies by the authors convincingly demonstrate the critical role of risk assessment at all stages of the life cycle of nuclear power plants.

**Objective.** It is necessary to consider the application of decision-making methods for the numerical assessment of various stages of the life cycle of nuclear power plants. This work is aimed at providing practical recommendations for specialists in the field of nuclear energy, as well as developing the theoretical foundations of risk management in complex engineering systems.

**Methods.** A distinctive feature of the proposed approach is the integration of hierarchical analysis methods and the fuzzy logic method, which allows taking into account the multicriteria and uncertainty inherent in this process. Among the variety of risk assessment methods, multicriteria analysis is the most effective. This decision analysis is used as a tool in complex management situations, such as assessing the life cycle of NPPs.

## Введение

Атомные электростанции (далее АЭС) играют ключевую роль в обеспечении энергетической безопасности и устойчивого развития стран. Однако проектирование, строительство и эксплуатация АЭС сопряжены с высокими уровнями риска, которые могут повлиять на безопасность, экономическую эффективность и экологические последствия. В связи с этим эффективное управление рисками становится неотъемлемой частью жизненного цикла АЭС.

Существует несколько методов многокритериального принятия решений (англ. MCDM). Многокритериальное принятие решений, или многокритериальный анализ решений, является одним из наиболее точных методов принятия решений [1]. Широко распространённый метод анализа иерархий (далее МАИ) и нечеткой логики (далее МНЛ) представляют собой перспективные подходы к решению сложных задач. В частности, комбинация этих ме-

**Результаты.** В настоящем исследовании предложен подход к численной оценке рисков при выводе атомных электростанций из эксплуатации. Интеграция результатов оценки рисков в процессы принятия решений позволяет достичь более высокой точности прогнозирования, оптимизировать ресурсы и существенно снизить финансовые затраты.

**Выводы.** В ходе научных исследований были получены цифровые данные, которые служат основой для специалистов при принятии сложных, комплексных и дорогостоящих решений, что позволяет им избегать индивидуальных субъективных оценок. Методы принятия решений в значительной степени зависят от экспертного мнения, поскольку процесс принятия решений отдельным человеком или группой людей может содержать элемент субъективности. Кроме того, суждения экспертов могут различаться в зависимости от их личного практического опыта и уровня научных знаний.

**Ключевые слова:** управление рисками; анализ рисков; риски на стадиях жизненного цикла АЭС; расчёт рисков на ЖЦ АЭС; многокритериальный анализ решений для управления рисками на ЖЦ АЭС; управление ЖЦ АЭС.

**Results.** This study proposes an approach to the numerical assessment of risks during decommissioning of nuclear power plants. Integration of risk assessment results into decision-making processes allows achieving higher forecasting accuracy, optimizing resources and significantly reducing financial costs. Conclusions: Scientific research has produced digital data that serves as a basis for experts in making complex, comprehensive and expensive decisions, allowing them to avoid individual subjective assessments. Decision-making methods largely depend on expert opinion, since the decision-making process by an individual or a group of people may contain an element of subjectivity. In addition, expert judgments may vary depending on their personal practical experience and level of scientific knowledge.

**Keywords:** risk management; risk analysis; risks at the stages of the NPP life cycle; risk calculation for the NPP life cycle; multi-criteria analysis of decisions for NPP life cycle risk management; NPP life cycle management.

тодов, известная как метод нечеткого анализа иерархий (МАИ-НЛ), обладает значительным потенциалом для решения задач по управлению жизненным циклом (ЖЦ), однако в настоящее время недостаточно широко применяется в атомной энергетике [2–4]. В то же время комбинация методов позволяет учитывать неопределенность и субъективность экспертных оценок, что особенно важно при анализе сложных систем, таких как объекты АЭС.

## Материалы и методы

В данной статье рассматривается применение метода анализа иерархий и метода нечеткой логики для численной оценки рисков и анализа на их основе альтернативных вариантов решений по управлению ЖЦ АЭС [5].

1. Метод анализа иерархий является инструментом принятия решений по нескольким критериям [6]. Главное достоинство МАИ – универсальность, он применим в решении самых разных проблем, может быть использован при анализе вероятных сценариев развития ситуаций,

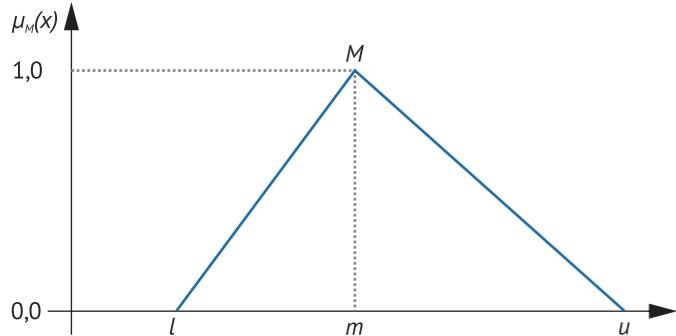


Рис. 1. Метод нечёткой логики  
Fig.1. The fuzzy logic method

распределении ресурсов, создании различных рейтингов, принятии управленческих решений [7].

2. Метод нечёткой логики – это метод анализа, который напоминает рассуждения человека. Данный подход похож на то, как люди принимают решения, и включает в себя все промежуточные варианты между «да» и «нет» [8].

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m} & m \leq x \leq u \\ 0 & m \prec l \text{ or } x \succ u. \end{cases}$$

3. МНЛ является аналитическим дополнением классического метода МАИ, который использует коэффициенты сравнения, описываемые треугольными функциями для обработки неопределённостей. Идея состоит в том, чтобы использовать треугольные нечёткие значения  $(l, m, u)$  для выражения весов по девятиуровневой шкале оценки, для ранжирования критерии по относительной

важности. На рисунке 1 показан треугольник нечётких значений  $M$ , обозначенных тройкой действительных чисел  $(l, m, u)$ , с параметрами  $l \leq m \leq u$ , где  $l$  обозначает наименьшее возможное значение,  $m$  – наиболее ожидаемое значение, а  $u$  указывает на максимально возможное значение функции принадлежности  $\mu_M(x)$  [9].

В данной статье рассматривается одна из стадий ЖЦ – вывод из эксплуатации (далее ВЭ) АЭС. Риски, связанные с выводом АЭС из эксплуатации, считаются наиболее высокими, особенно те, которые связаны с ядерными отходами и хранением радиоактивных материалов. Основываясь на предыдущих результатах [10–12], рассмотрим применение МАИ и МНЛ для оценки этапа ЖЦ АЭС «вывод атомной электростанции из эксплуатации».

## Результаты

В настоящей работе представлена численная оценка рисков, основанная на использовании МАИ и МНЛ, применительно к стадии вывода из эксплуатации атомной электростанции. Выбор указанных методов для данной стадии жизненного цикла обусловлен рядом факторов:

- В перспективе ближайших десятилетий прогнозируется существенное увеличение количества вводимых в эксплуатацию энергоблоков АЭС как на территории Российской Федерации, так и за рубежом.
- Ранее рядом авторов был сделан вывод о том, что стадия ВЭ связана с наибольшим количеством рисков (см. таблицу 1).

Первый шаг МАИ – построение иерархической структуры вывода АЭС из эксплуатации (рисунок 2), которая начинается с постановки цели, затем – определение критерии решения с помощью МНЛ путём анализа альтернативных решений с учётом различных факторов.

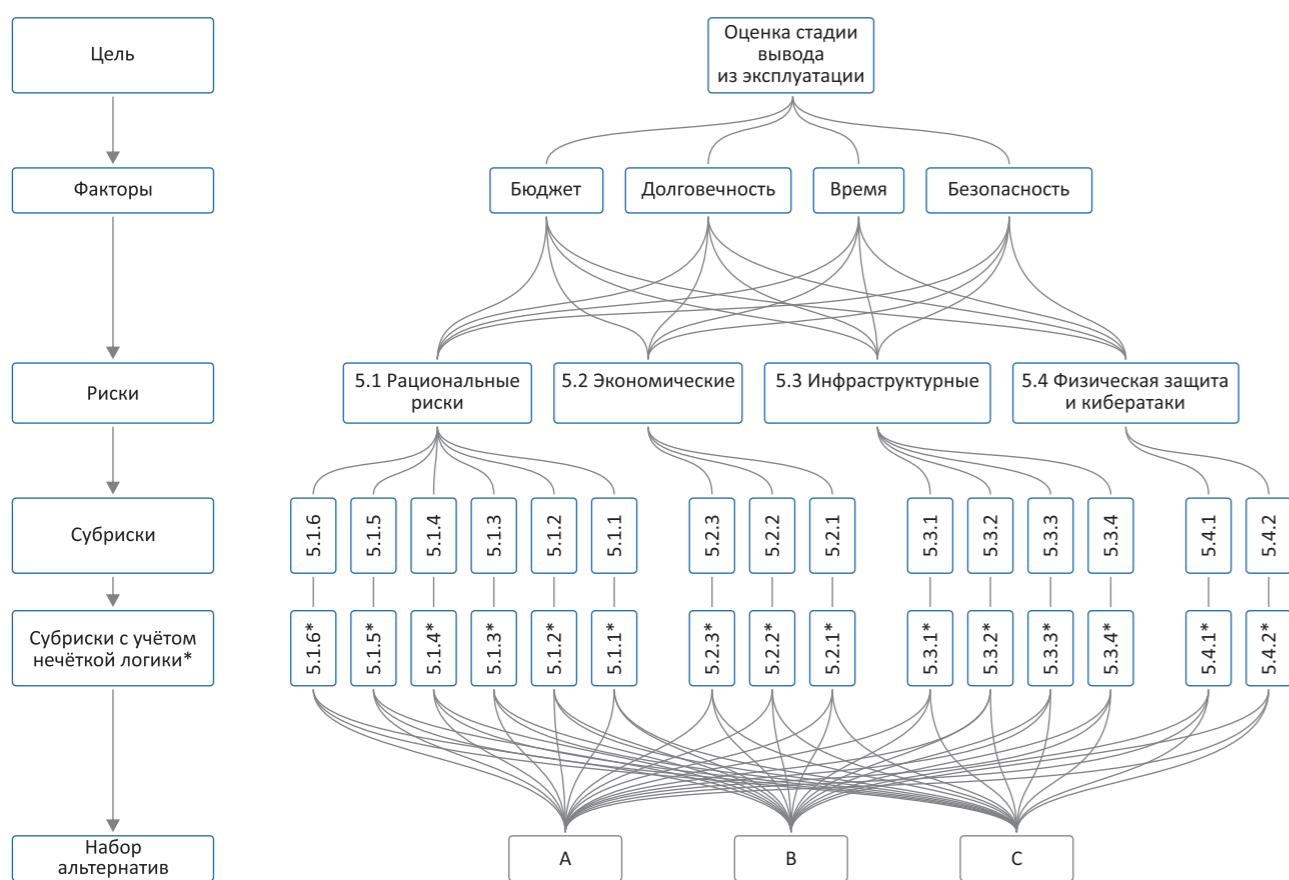


Рис. 2. Принципиальная схема иерархии и нечётная логика  
Fig. 2. Schematic diagram of the hierarchy and fuzzy logic

5. Риски при выводе из эксплуатации	Возникновения	Влияние	Взвешенность риска $R = p11 * W1$ , баллов
5.1. Радиационные риски			
5.1.1. Выбор стратегии	6	6	36
5.1.2. История эксплуатации (организованные и неорганизованные протечки теплоносителя, выбросы в атмосферу, различные радиационные инциденты)	6	8	48
5.1.3. Радиоактивные отходы с радиоактивным загрязнением (РАО)	6	6	36
5.1.4. Радиоактивные отходы с наведённой активностью	6	8	48
5.1.5. Место хранения (наличие мест для обращения с эксплуатационными радиоактивными отходами и отходами при выводе из эксплуатации)	6	8	48
5.1.6. Переработка РАО (наличие систем обращения, фрагментации, упаковки и транспортировки РАО)	8	8	64
5.2. Экономические			
5.2.1. Фонд накопления (наличие фонда накопления и фонда для вывода из эксплуатации)	8	8	64
5.2.2. Выбор технологии (использование безлюдных технологий)	8	8	64
5.2.3. Объёмы РАО (наличие методики управления объёмами радиоактивных отходов) на стадиях жизненного цикла эксплуатации и вывода из эксплуатации	6	8	48
5.3. Инфраструктурные			
5.3.1. Технологии	6	8	48
5.3.2. Кадры (преимущественное использование эксплуатационного потенциала)	6	8	48
5.3.3. Нормативы (наличие полного комплекта с действиями и процедурами по выводу из эксплуатации)	4	8	32
5.3.4. Законы (законодательное обеспечение работ по выводу из эксплуатации)	4	8	32
5.4. Физическая защита и кибератаки			
5.4.1. Потери цифровой информации	4	4	16
5.4.2. Отключение цифровых устройств непрерывной регистрации	4	6	24
<b>Итог: взвешенность риска по стадии ВЭ АЭС, баллов</b>			<b>656 баллов</b>

Табл. 1. Результаты экспертной оценки рисков при выводе АЭС из эксплуатации, баллы  
Tab. 1. Results of expert risk assessment during decommissioning of nuclear power plants, points

Построение такой организованной структуры позволяет проанализировать все аспекты поставленной задачи для вывода АЭС из эксплуатации. Целью данного анализа является оценка рисков для выбора стратегии вывода АЭС из эксплуатации (альтернативы А, В, С). Принципиальная схема иерархии МАИ-НЛ включает факторы, риски и субриски [13].

Авторами было проведено анкетирование специалистов в области атомной энергетики, в ходе которого были идентифицированы основные риски [13] для каждой стадии ЖЦ АЭС, а также определён вес каждого риска в баллах. Структура рисков и значения веса для стадии ЖЦ «вывод АЭС из эксплуатации» приведены в таблице 1.

Оценка рисков для принятия решения по выбору стратегии вывода АЭС из эксплуатации включает:

- Факторы для оценки рисков: безопасность, сроки, бюджет и долговечность [13] – сумма факторов равна 1.
- Перечень идентифицированных основных рисков для оценки их влияния на принятие решения по выбору варианта вывода АЭС из эксплуатации [10].
- Перечень идентифицированных субрисков [10].
- Определение альтернатив поставленной задачи [14].



Рис. 3. Схема МНЛ для решения задачи по выводу АЭС из эксплуатации  
Fig. 3. The Fuzzy scheme for solving the problem of decommissioning NPP

- Расчёт по методу нечёткой логики и методу анализа иерархий.

Следующим этапом МАИ является расстановка приоритетов для задачи по выводу АЭС из эксплуатации. Под приоритетами понимаются относительные веса элементов в каждой группе. Сумма приоритетов элементов, которые подчинены одному элементу вышестоящего уровня иерархии, равна единице, 100 баллам или 100 %. Приоритет цели по определению также равен 1. Следует отметить, что расчёт по МНЛ выполняется в обратном порядке, начиная с набора альтернатив и заканчивая результатом оценки стадии вывода АЭС из эксплуатации.

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ, существуют три варианта вывода АЭС из эксплуатации [14]:

- А – отсроченный демонтаж АЭС;
- В – изоляция АЭС;
- С – ликвидация АЭС.

Ключевой особенностью нечётких множеств является отсутствие жёстких правил относительно того, как определяются их функции принадлежности. Как математическая форма функции, так и параметры зависят от входных данных. При условии, что функции принадлежности со-

Классификация отходов Комиссии по ядерному регулированию	Класс А	Класс В	Класс С	Превосходит класс С или GTCC
Классификация радиоактивных отходов. МАГАТЭ № GSG – 1 [20]	Отходы с очень низким уровнем загрязнения VLLW (very low-level waste)	Низкоактивные отходы LLW (low-level waste)	Отходы средней степени очистки ILW (Intermediate-level waste)	Высокоактивные отходы HLW (high-level waste)
Классификация РАО в РФ. Подразделяются на 4 категории [21]	Очень низкоактивные (ОНРАО)	Низкоактивные (HAO)	Среднеактивные (CAO)	Высокоактивные (BAO)

**Табл. 2. Сравнение схем классификации отходов МАГАТЭ (IAEA, 2009) и NRC (NRC, 2015) и РФ**  
**Tab. 2. Comparison of waste classification schemes of the IAEA (IAEA, 2009) and NRC (NRC, 2015) and the Russian Federation**

гласованный, вывод, основанный на анализе МНЛ, является достоверным и обоснованным.

Применительно к выводу АЭС из эксплуатации механизм принятия решения МНЛ включает следующие этапы: введение нечёткости для риска на ЖЦ АЭС, нечёткий вывод для заданных рисков для вывода АЭС из эксплуатации, композиция рисков, приведение к чёткости (рисунок 3).

Дефазификация (приведение к чёткости) – это процесс представления нечёткого множества с чётким числом, которое требуется получить на выходе, чтобы использовать для выполнения такой функции, как указание индекса риска возникновения неполадок [15; 16]. Существует много способов дефазификации, и выбор конкретного метода зависит от предпочтений и характера задачи:

- Центр тяжести (Centroid): вычисляется центр тяжести нечёткого числа. Это наиболее распространённый метод.
- Максимум высоты (Maximum): выбирается значение, где функция принадлежности имеет наибольшее значение.
- Среднее максимумов (Mean of Maximum): вычисляется среднее значение точек, где достигается максимум функции принадлежности.
- Альфа-разрез: нечёткое число разбивается на несколько альфа-срезов, и дефазификация проводится на каждом срезе, затем результаты агрегируются.

Наиболее часто используемым методом дефазификации является метод определения центра области (геометрический центр), также известный как метод центроидов. Этот метод определяет центр области нечёткого множества и возвращает соответствующее значение чёткости [15; 16].

Как только все значения входных переменных преобразуются в соответствующие значения лингвистических переменных, на этапе нечёткого вывода выполняется оценка набора нечётких правил, это означает перевод слов в цифры. Этап дефазификации преобразует этот лингвистический результат в числовое значение.

Использование анализа МАИ-НЛ является очень эффективным и точным способом получения решений для задач, связанных с оценкой вывода АЭС из эксплуатации.

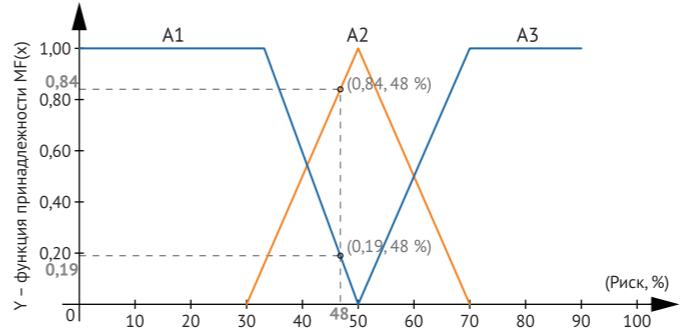
Всё существующие риски следует определять путём изучения всей доступной информации об объекте на всех стадиях его жизненного цикла, а также с помощью экспертизы оценки. Постановка задач и правил учёта весов рисков по МНЛ является более точным методом по сравнению с другими, такими как обращение к экспертам или приблизительная оценка рисков без каких-либо расчётов или ранжирования. После нахождения математического описания [17] производят расчёт по имеющимся фактическим данным для получения результатов.

Международное агентство по атомной энергии разделило радиоактивные отходы на несколько групп (таблица 2).

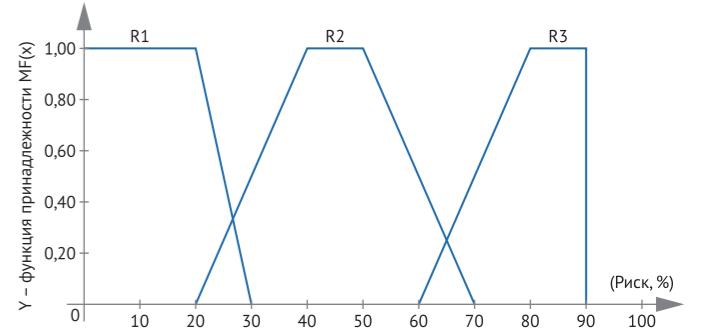
Рассмотрим риски АЭС с заданной степенью влияния в процентном отношении. Исходные данные для поставленной задачи приведены в таблице 3.

Риск	Значение риска в %	Альтернативы
5.1.1. Выбор стратегии	0	A – отсроченный демонтаж АЭС B – изоляция АЭС C – ликвидация АЭС
5.1.2. История эксплуатации	48	A1 – неорганизованные протечки теплоносителя, выбросы в атмосферу, различные радиационные инциденты A2 – частично организованные протечки теплоносителя, выбросы в атмосферу, различные радиационные инциденты A3 – организованные протечки теплоносителя, выбросы в атмосферу, различные радиационные инциденты
5.1.3. Радиоактивные отходы с радиоактивным загрязнением	55	Класс В – низкоактивные отходы Класс С – отходы средней степени очистки и высокоактивные отходы
5.1.4. Радиоактивные отходы с наведённой активностью	40	Класс В.1 – низкоактивные отходы Класс С.1 – отходы средней степени очистки и высокоактивные отходы
5.1.5. Место хранения	95	C1 – отсутствие мест для обращения с эксплуатационными радиоактивными отходами и отходами при выводе из эксплуатации C2 – наличие мест для обращения с эксплуатационными радиоактивными отходами и отходами при выводе из эксплуатации
5.1.6. Переработка РАО	85	D1 – отсутствие систем обращения, фрагментации, упаковки и транспортировки РАО D2 – наличие систем обращения, фрагментации, упаковки и транспортировки РАО

**Табл. 3. Исходные данные для выбора стратегии ВЭ**  
**Tab. 3. Initial data for selecting a decommissioning strategy**



**Рис. 4. История эксплуатации**  
**Fig. 4. Operational history**



**Рис. 5. Функция принадлежности категории рисков**  
**Fig. 5. The function of belonging to the risk category**

Правило 1	Если значение риска 5.1.1 = 0, риска 5.1.2 = A1, и риска 5.1.3 = класс В, и риска 5.1.4 = класс В.1, и риска 5.1.5 = C1, и риска 5.1.6 = D1, в таком случае риск = R3.
Правило 2	Если значение риска 5.1.1 = 0, риска 5.1.2 = A2, и риска 5.1.3 = класс В, и риска 5.1.4 = класс В.1, и риска 5.1.5 = C1, и риска 5.1.6 = D1, в таком случае риск = R2.
Правило 3	Если значение риска 5.1.1 = 0, риска 5.1.2 = A3, и риска 5.1.3 = класс С, и риска 5.1.4 = класс С.1, и риска 5.1.5 = C2, и риска 5.1.6 = D2, в таком случае риск = R1.

**Табл. 4. Набор правил для оценки экономических рисков**  
**Tab. 4. A set of rules for assessing economic risks**

Правила	Риск 5.1.1	Риск 5.1.2	Риск 5.1.3	Риск 5.1.4	Риск 5.1.5	Риск 5.1.6	Значение риска
Правило 1	0	A1 = 0,19	B1 = 0,19	B1 = 0,72	C1 = 0	D1 = 0	R3 = 0,19
Правило 2	0	A2 = 0,84	B1 = 0,19	B1 = 0,72	C1 = 1	D1 = 0	R2 = 0,84
Правило 3	0	A3 = 0	C = 0,81	C1 = 0,38	C1 = 1	D1 = 1	R1 = 0

**Табл. 5. Результаты расчёта МНЛ**  
**Tab. 5. Results of the calculation of the FL**

Рассмотрим величину риска 5.1.1 «Выбор стратегии»: принимаем равным нулю, поскольку рассчитываем наиболее подходящий способ ВЭ. Для этого необходимо учесть историю эксплуатации: организованные и неорганизованные протечки теплоносителя, выбросы в атмосферу, различные радиационные инциденты.

Предположим, что данные для риска 5.1.2 «История эксплуатации» (таблица 1) сохранились в объёме 48 %, тогда функцию принадлежности по МНЛ можно представить в следующем виде (рисунок 4).

Аналогичным образом построим функции принадлежности для 5.1.3, 5.1.4, 5.1.5, 5.1.6.

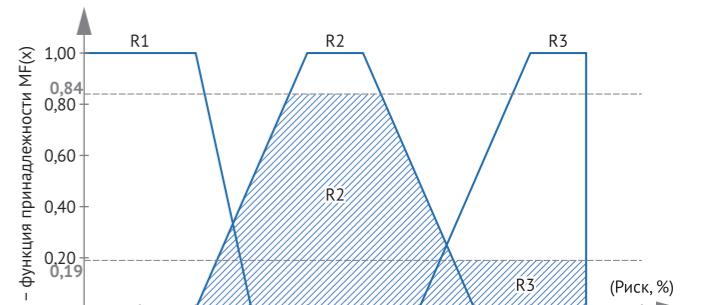
Основываясь на публикациях [10; 11; 12], приняли, что высокими являются риски весом более 60 баллов. Предположим, риски АЭС (Х) разделены по трём категориям, а именно: низкий риск (R1), средний риск (R2) и высокий риск (R3). После построения диаграмм функций принадлежности всех рисков будут разработаны правила, логичные для человека, которые помогут сделать обоснованный вывод по данной задаче (рисунок 5).

Правило нечёткого управления можно рассматривать как знание эксперта в любой смежной области применения. Нечёткое правило представляет собой последовательность вида «если – то», которая приводит к алгоритмам, описывающим, какие действия или выходные данные следует предпринять на основе наблюдаемой в данный момент информации. Эта информация включает в себя как входные данные, так и обратную связь, если применяется замкнутая система управления. Закон о разработке или построении набора нечётких правил основан на знаниях или опыта эксперта. Нечёткое правило «если – то» связывает условие, описываемое с использованием лингвистических переменных и нечётких множеств, с выводом или заключением. Часть «если» в

основном используется для получения знаний с помощью гибких условий, а часть «то» может использоваться для получения заключения или вывода в форме лингвистической переменной [15]. Это правило «если – то» широко используется в системах нечёткого логического вывода для вычисления степени соответствия входных данных условию правила. Авторы разработали набор правил (таблица 4) для оценки экономических, радиационных, инфраструктурных и физических рисков при выводе АЭС из эксплуатации [15; 16].

После определения правил расчёта преобразуем их в числа, используя матрицу «и, или» [15]. Затем по данным таблицы 2 составим график рисков, чтобы перевести правила (предложения) в математические выражения с числовыми значениями (таблица 5).

Таким образом, были получены значения рисков  $R1 = 0$ ,  $R2 = 0,22$ ,  $R3 = 0,19$ . Затем необходимо построить графики (рисунок 10) и вычислить площадь фигур [18; 19]. Общая площадь построенных фигур равна:  $A = 25,6 + 13,44 + 7,14 + 0,38 + 5,7 = 33,8$ .



**Рис. 6. Площади функции с помощью метода центрида, или геометрического центра**  
**Fig. 6. Area of the function using the centroid method or geometric center**

Риски при выводе из эксплуатации, %	Значение риска, %	Значение риска, баллов	Нормализация = значение риска / сумма рисков
5.1. Радиационные риски	51,40 %	51,40	0,265
5.2. Экономические риски	51,99 %	51,99	0,268
5.3. Инфраструктурные риски	45,52 %	45,52	0,235
5.4. Риски, связанные с физической защитой и кибератаками	44,53 %	44,53	0,230
<b>СУММА</b>	<b>193,44%</b>	<b>193,44</b>	<b>1</b>

**Табл. 6. Результаты расчёта рисков 5.1, 5.2, 5.3, 5.4**  
**Tab. 6. Results of calculation of risks 5.1, 5.2, 5.3, 5.4**

$$\text{Площадь } Ax = 182,78 + 268,41 + 846,8 + 25,75 + 484,5 = 1737,6.$$

В итоге, результат расчёта МНЛ по оценке радиационных рисков (5.1) для принятия решения по выбору стратегии вывода АЭС из эксплуатации выглядит следующим образом: 5.1 «Радиационные риски» =  $1737,6 / 39,17 = 51,4\%$ .

Аналогичным способом произведём расчёт для экономических, инфраструктурных рисков, рисков в сфере физической защиты и кибербезопасности. Результаты расчёта приведены в таблице 6.

Очень важный момент возникает при переходе от МНЛ, используемой в МАИ-НЛ, к применению её в рамках метода, основанного на шкале Саати [19]. Дело в том, что 9-балльная шкала Саати работает с чёткими числами, а нечёткая логика оперирует нечёткими числами, которые представляют собой диапазоны значений. Поэтому необходим этап дефазификации, то есть приведения нечётких чисел к чётким.

После получения значений рисков МНЛ необходимо их упорядочить от наименьшего к наибольшему путём нормализации значений рисков [11]. Затем мы применим линейное сопоставление: от наименьшего к наименьшему, от наибольшего к наибольшему, чтобы при присвоении значений из 9-балльной шкалы значениям природных и упорядоченных рисков мы провели линейное сравнение, а именно: наименьшему значению риска из заказанного списка присваивается наименьшее значение 9-балльной шкалы; наибольшему значению риска из заказанного списка присваивается наибольшее значение выбранной 9-балльной шкалы; промежуточные значения риска получают промежуточные значения на шкале, распределённые между минимумом и максимумом. Предпочтения между отдельными критериями отображаются в так называемой матрице парного сравнения (матрица Саати). Шкала Саати используется для выражения степени предпочтения между объектами [21; 27–29].

Проведём процесс сравнения всех альтернатив по каждому из существующих критериев, а именно риски 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 [21–26]. В МАИ приоритет используется для попарного сравнения критерии, а также для попарного сравнения альтернатив.

Проведём процесс сравнения всех альтернатив по каждому из существующих критериев, а именно риски 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 [21–26]. В МАИ приоритет используется для попарного сравнения критерии, а также для попарного сравнения альтернатив.

Альтернативы	5.1. Радиационные риски		5.2. Экономические риски		5.3. Инфраструктурные риски		5.4. Физическая защита и кибератаки		Общая оценка
	Вес	Оценка	Вес	Оценка	Вес	Оценка	Вес	Оценка	
A	0,37	0,05	0,48	0,68	0,10	0,06	0,05	0,24	0,37
B	0,37	0,19	0,48	0,24	0,10	0,19	0,05	0,06	0,21
C	0,37	0,75	0,48	0,08	0,10	0,75	0,05	0,70	0,42

**Табл. 8. Определение наивысших оценок для альтернатив метода МАИ**  
**Tab. 8. Determination of the highest target scores for the MAI method alternative**

Риск	Значение риска МНЛ	Оценка относительной важности МАИ
5.1. Радиационные риски	0,265	7
5.2. Экономические риски	0,268	9
5.3. Инфраструктурные риски	0,235	5
5.4. Риски, связанные с физической защитой и кибератаками	0,230	3

**Табл. 7. Линейное сопоставление: наименьшее к наименьшему, наибольшее к наибольшему**  
**Tab. 7. Linear Comparison: smallest to smallest, largest to largest**

Строим матрицу попарных сравнений между критериями матрицы, а также матрицу попарных сравнений альтернатив по критериям (таблица 8).

Мы также составляем аналогичные матрицы для сравнения вариантов (альтернатив) по каждому критерию путём умножения полезности отдельных альтернатив по отношению к указанным критериям на весовые коэффициенты этих критериев, таким образом определяется общая полезность данной альтернативы. Заключительным шагом является выбор оптимальной альтернативы на основе значения общей полезности. На основе результатов применения МАИ-НЛ был рекомендован вариант С – ликвидация [30; 31; 32; 33].

#### Обсуждение

Интеграция методов нечёткой логики и иерархического анализа в управление рисками представляет собой эффективный подход, особенно в условиях неопределённости и недостатка точных данных. Данный методологический синтез позволяет учитывать многокритериальность задач и формализовать неопределённые экспертные оценки, что делает его особенно полезным для сложных систем, таких как атомные электростанции.

#### Заключение

1. Предложено и обосновано использование методов иерархического анализа и нечёткой логики для оценки жизненного цикла атомных электростанций с целью принятия решений по управлению ЖЦ АЭС, таких как выбор стратегии вывода АЭС из эксплуатации. Было доказано, что методы иерархического анализа и нечёткой логики эффективны для получения численных результатов.

2. Получены результаты численной оценки рисков для одной из важнейших стадий ЖЦ – вывода из эксплуатации АЭС.

3. Комбинированный метод МАИ-НЛ является наиболее приемлемым и эффективным для численной оценки рисков и принятия на их основе решений по управлению ЖЦ АЭС. Расчёты можно производить как в цифровом, так и в процентном отношении, в зависимости от исходных данных.

4. Преимущество МАИ заключается в том, что для его применения не требуется каких-либо специальных знаний, в отличие от некоторых других методов принятия многокритериальных решений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aruldoss, M. A survey on multi criteria decision making methods and its applications / M. Aruldoss, M. T. Lakshmi, V. P. Venkatesan // American Journal of Information Systems. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – Pp. 31–43.
2. Velasquez, M. An analysis of multi-criteria decision making methods / M. Velasquez, P. T. Hester // International Journal of Operations Research. – 2013. – Vol. 10. – Pp. 56–66.
3. Шпенст, В. А. Использование метода нечёткого анализа иерархии для выбора оптимальной ветроэнергетической установки / В. А. Шпенст, В. С. Ермолович // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 368–373.
4. Taherdoost, H. Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts / H. Taherdoost, M. Madanchian // Encyclopedia. – 2023. – Vol. 3, No. 1. – Pp. 77–87.
5. Методы многокритериального анализа решений / М. О. Петросян, П. В. Зеленков, И. В. Ковалев, С. В. Ефремова // Решетневские чтения. – 2016. – Т. 2, № 20. – С. 76–77.
6. Vaidya, O. S. Analytic hierarchy process: An overview of applications / O. S. Vaidya, S. Kumar // European Journal of operational research. – 2006. – Vol. 169, No. 1. – Pp. 1–29.
7. Saaty, T. L. The Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty. – New York ; London : McGraw-Hill, 1980. – 312 p.
8. Курбанова, Э. Р. Метод анализа иерархий: характеристика / Э. Р. Курбанова // Форум молодых учёных. – 2019. – № 5 (33). – С. 749–752.
9. Seising, R. Towards the future of fuzzy logic / R. Seising, E. Trillas, J. Kacprzyk. – New York : Springer, 2015. – 325 p.
10. Kahraman, C. Fuzzy Multi-criteria Decision Making: Theory and Applications with Recent Developments / C. Kahraman. – New York : Springer, 2008.
11. Альшрайдех, М. Анализ методов идентификации и ранжирования рисков на жизненном цикле АЭС / М. Альшрайдех, И. А. Енговатов, А. А. Морозенко // Строительство: наука и образование. – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 128–141.
12. Альшрайдех, М. Классификация рисков на стадиях жизненного цикла атомной электростанции / М. Альшрайдех, И. А. Енговатов // Вестник Евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 2. – Ст. 25. – URL: <https://esj.today/PDF/28SAVN223.pdf>.
13. Альшрайдех, М. Вопросы энергетической политики управления жизненным циклом АЭС / М. Альшрайдех, И. Енговатов, А. Морозенко // Энергетическая политика. – 2023. – № 1 (179). – С. 56–71.
14. Ashraideh, M. Risk management at the stages of the life cycle of NPP projects / M. Ashraideh, I. Engovatov // E3S Web of Conferences / International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) "Actual Problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution". – 2023. – Vol. 383. – Art. 04093.
15. Кузнецов, В. М. Вывод из эксплуатации объектов атомной энергетики / В. М. Кузнецов. – Москва, 2003. – 137 с. – URL: <http://www. seu. ru/programs/atomsafe/books/Kuzneцов/snytie.pdf>.
16. Jamshidi, M. Fuzzy Logic and Control: software and hardware applications / M. Jamshidi, N. Vadiee, T. J. Ross. – Englewood Cliffs, New Jersey : PTR Prentice Hall, 1993. – 424 p.
17. Bai, Y. Fundamentals of fuzzy logic control – fuzzy sets, fuzzy rules and defuzzifications / Y. Bai, D. Wang // Advanced fuzzy logic technologies in industrial applications. – 2006. – Pp. 17–36.
18. Альшрайдех, М. Структура и содержание платформы управления стадиями жизненного цикла атомной электростанции / М. Альшрайдех, И. Енговатов // Вестник Евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 2. – Ст. 25. – URL: <https://esj.today/PDF/28SAVN223.pdf>.

#### REFERENCES

1. Aruldoss, M. A survey on multi criteria decision making methods and its applications / M. Aruldoss, M. T. Lakshmi, V. P. Venkatesan // American Journal of Information Systems. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – Pp. 31–43.
2. Velasquez, M. An analysis of multi-criteria decision making methods / M. Velasquez, P. T. Hester // International Journal of Operations Research. – 2013. – Vol. 10. – Pp. 56–66.

ления стадиями жизненного цикла АЭС / М. Альшрайдех, И. А. Енговатов, А. А. Морозенко // Строительство: наука и образование. – 2024. – Т. 14, № 2. – С. 18–31.

19. Леготкина, Т. С. Модификация метода центроида / Т. С. Леготкина, Ю. Н. Хижняков // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2011. – № 1. – С. 122–125.

20. Management of Radioactive Waste after a Nuclear Power Plant Accident / Nuclear Energy Agency. – Paris, France, 2016. – 226 р.

21. Колбасов, Б. Н. 3-е техническое совещание МАГАТЭ по первому поколению термоядерных энергетических установок: проекты и технология (Вена, 13–15 июля 2009 г.) и 9-е техническое совещание МАГАТЭ по безопасности термоядерных энергетических установок (Вена, 15–17 июля 2009 г.) / Б. Н. Колбасов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2009. – № 3. – С. 70–78.

22. Классификация радиоактивных отходов в РФ и США / Д. Д. Десятов, И. С. Батаков, Д. А. Терентьев, А. А. Екидин // Ядерная физика и инженеринг. – 2020. – Т. 11, № 5. – С. 251–259.

23. Ротштейн, А. П. Влияние методов дефазификации на скорость настройки нечеткой модели / А. П. Ротштейн, С. Д. Штобва // Кибернетика и системный анализ. – 2002. – № 5. – С. 169–176.

24. Ho, W. Strategic sourcing: a combined QFD and AHP approach in manufacturing / W. Ho, P. K. Dey, M. Lockström // Supply Chain Management: An International Journal. – 2011. – Т. 16, № 6. – Pp. 446–461.

25. Jeffrey, C. S. Mega-project construction management: the Corps of Engineers and Bechtel Group in Saudi Arabia / C. S. Jeffrey. – US, 1991. – 302 р.

26. Кравчук, М. В. Разработка системы показателей безопасности АЭС / М. В. Кравчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 2, № 8 (56). – С. 4–11.

27. Theoretical aspects of multi-criteria decision-making (MCDM) methods / B. Uzun, I. Ozsahin, V. O. Agbor, D. U. Ozsahin // Applications of Multi-Criteria Decision-Making Theories in Healthcare and Biomedical Engineering. – Academic Press, 2021. – Pp. 3–40.

28. Siekelova, A. Analytic hierarchy process in multiple-criteria decision-making: a model example / A. Siekelova, I. Podhorska, J. J. Impolla // SHS web of conferences : International Conference on Entrepreneurial Competencies in a Changing World (ECCW 2020). – 2021. – Vol. 90. – Art. 01019.

29. Multi-criteria decision making for nuclear power plant selection using fuzzy AHP: Evidence from Indonesia / A. G. Abdullah, M. A. Shafii, S. Pramuditya, T. Setiadipura, K. Anzhar // Energy and AI. – 2023. – Vol. 14. – Art. 100263.

3. Shpenst, V. A. Ispol'zovanie metoda nechyotkogo analiza ierarkhii dlya vybora optimal'noj vetroehnergeticheskoy ustanovki [Using the Fuzzy Hierarchy Analysis Method to Select an Optimal Wind Power Plant] / V. A. Shpenst, V. S. Ermolovich // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Bulletin of Tula State University. Technical Sciences]. – 2023. – No. 12. – Pp. 368–373
4. Taherdoost, H. Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts / H. Taherdoost, M. Madanchian // Encyclopedia. – 2023. – Vol. 3, No. 1. – Pp. 77–87.
5. Metody mnogokriterial'nogo analiza reshenij [Methods of multicriteria decision analysis] / M. O. Petrosyan, P. V. Zelenkov, I. V. Kovalev, S. V. Efremova // Reshetnevskie chteniya [Reshetnev readings]. – 2016. – Vol. 2, No. 20. – Pp. 76–77.
6. Vaidya, O. S. Analytic hierarchy process: An overview of applications / O. S. Vaidya, S. Kumar // European Journal of operational research. – 2006. – Vol. 169, No. 1. – Pp. 1–29.
7. Saaty, T. L. The Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty. – New York ; London : McGraw-Hill, 1980. – 312 p.
8. Kurbanova E. R. Metod analiza ierarkhij: kharakteristika [Method of hierarchy analysis: characteristics] / E. R. Kurbanova // Forum molodyykh uchonykh [Forum of young scientists]. – 2019. – No. 5 (33). – Pp. 749–752.
9. Seising, R. Towards the future of fuzzy logic / R. Seising, E. Trillas, J. Kacprzyk. – New York : Springer, 2015. – 325 p.
10. Kahraman, C. Fuzzy Multi-criteria Decision Making: Theory and Applications with Recent Developments / C. Kahraman. – New York : Springer, 2008.
11. Alshraideh, M. Analiz metodov identifikatsii i ranzhirovaniye riskov na zhiznennom tsikle AEHS [Analysis of methods for identifying and ranking risks in the life cycle of nuclear power plants] / M. Alshraideh, I. A. Engovatov, A. A. Morozenco // Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: science and education]. – 2023. – Vol. 13, No. 4. – Pp. 128–141.
12. Alshraideh, M. Klassifikatsiya riskov na stadiyakh zhiznennogo tsikla atomnoj ehlektrostantsii [Classification of risks at the stages of the life cycle of a nuclear power plant] / M. Al shraideh, I. A. Engovatov // Vestnik Evrazijskoj nauki [Bulletin of Eurasian Science]. – 2023. – Vol. 15, No. 2. – Art. 25. – URL: <https://esj.today/PDF/28SAVN223.pdf>.
13. Alshraideh, M. Voprosy ehnergeticheskoy politiki upravleniya zhiznennym tsiklom AEHS [Issues of energy policy of NPP life-cycle management] / M. Alshraideh, I. Engovatov, A. Morozenko // Ehnergeticheskaya politika [Energy policy]. – 2023. – No. 1 (179). – Pp. 56–71.
14. Ashraideh, M. Risk management at the stages of the life cycle of NPP projects / M. Ashraideh, I. Engovatov // E3S Web of Conferences / International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) "Actual Problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution". – 2023. – Vol. 383. – Art. 04093.
15. Kuznetsov, V. M. Vyvod iz ehkspluatatsii ob'ektov atomnoj ehnergetiki [Decommissioning of nuclear power facilities] / V. M. Kuznetsov. – Moscow, 2003. – 137 p. – URL: <http://www.seu.ru/programs/atomsafe/books/Kuznetsov/snytie.pdf>.
16. Jamshidi, M. Fuzzy Logic and Control: software and hardware applications / M. Jamshidi, N. Vadiee, T. J. Ross. – Englewood Cliffs, New Jersey : PTR Prentice Hall, 1993. – 424 p.
17. Bai Y., Fundamentals of fuzzy logic control – fuzzy sets, fuzzy rules and defuzzifications / Y. Bai, D. Wang // Advanced fuzzy logic technologies in industrial applications. – 2006. – Pp. 17–36.
18. Alshraideh, M. Struktura i soderzhanie platformy upravleniya stadiyami zhiznennogo tsikla AEHS [Structure and content of the NPP life cycle management platform] / M. Alshraideh, I. A. Engovatov, A. A. Morozenko // Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: science and education]. – 2024. – Vol. 14, No. 2. – Pp. 18–31.
19. Legotkina, T. S. Modifikatsiya metoda tsentroida [Modification of the centroid method] / T. S. Legotkina, Yu. N. Khizhnyakov//
- Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Izhevsk State Technical University]. – 2011. – No. 1. – Pp. 122–125.
20. Management of Radioactive Waste after a Nuclear Power Plant Accident / Nuclear Energy Agency. – Paris, France, 2016. – 226 p.
21. Kolbasov, B. N. 3-e tekhnicheskoe soveshanie MAGATEH po pervomu pokoleniyu termoyadernykh ehnergeticheskikh ustanovok: proekty i tekhnologiya (Vena, 13–15 iyulya 2009 g.) i 9-e tekhnicheskoe soveshanie MAGATEH po bezopasnosti termoyadernykh ehnergeticheskikh ustanovok (Vena, 15–17 iyulya 2009 g.) [3rd IAEA Technical Meeting on First Generation Fusion Power Plants: Designs and Technology (Vienna, 13–15 July 2009) and 9th IAEA Technical Meeting on the Safety of Fusion Power Plants (Vienna, 15–17 July 2009)] / B. N. Kolbasov // Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyj sintez [Issues of Atomic Science and Technology. Series: Thermonuclear Fusion]. – 2009. – No. 3. – Pp. 70–78.
22. Klassifikatsiya radioaktivnykh otkhodov v RF i SSHA [Classification of Radioactive Waste in the Russian Federation and the USA] / D. D. Desyatov, I. S. Batakov, D. A. Terentier, A. A. Ekidin // Yadernaya fizika i inzhiniring [Nuclear Physics and Engineering]. – 2024. – Vol. 11. – No. 5. – Pp. 251–259.
23. Rotshteyn, A. P. Vliyanie metodov defazzifikatsii na skorost' nastrojki nechetkoj modeli [Influence of defuzzification methods on the speed of fuzzy model tuning] / A. P. Rotstein, S. D. Shtovba // Kibernetika i sistemy analiz [Cybernetics and systems analysis]. – 2002. – No. 5. – Pp. 169–176.
24. Ho, W. Strategic sourcing: a combined QFD and AHP approach in manufacturing / W. Ho, P. K. Dey, M. Lockström // Supply Chain Management: An International Journal. – 2011. – T. 16, No. 6. – Pp. 446–461.
25. Jeffrey, C. S. Mega-project construction management: the Corps of Engineers and Bechtel Group in Saudi Arabia / C. S. Jeffrey. – US, 1991. – 302 p.
26. Kravchuk, M. V. Razrabotka sistemy pokazatelej bezopasnosti AEHS [Development of a system of NPP safety indicators] / M. V. Kravchuk // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tekhnologij [Eastern European Journal of Advanced Technologies]. – 2012. – Vol. 2, No. 8 (56). – Pp. 4–11.
27. Theoretical aspects of multi-criteria decision-making (MCDM) methods / B. Uzun, I. Ozsahin, V. O. Agbor, D. U. Ozsahin // Applications of Multi-Criteria Decision-Making Theories in Healthcare and Biomedical Engineering. – Academic Press, 2021. – Pp. 3–40.
28. Siekelova, A. Analytic hierarchy process in multiple-criteria decision-making: a model example / A. Siekelova, I. Podhorska, J. J. Impolla // SHS web of conferences : International Conference on Entrepreneurial Competencies in a Changing World (ECCW 2020). – 2021. – Vol. 90. – Art. 01019.
29. Multi-criteria decision making for nuclear power plant selection using fuzzy AHP: Evidence from Indonesia / A. G. Abdullah, M. A. Shafii, S. Pramuditya, T. Setiadipura, K. Anzhar // Energy and AI. – 2023. – Vol. 14. – Art. 100263.
30. Knowledge-based consistency index for fuzzy pairwise comparison matrices / S. Kubler, W. J. E. Derigent, A. Voisin, J. Robert, Y. Le Traon // 2017 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Naples, Italy, 09–12 July 2017. – Italy, 2017. – Pp. 1–7.
31. Hopkin, P. Fundamentals of risk management: understanding, evaluating and implementing effective risk management / P. Hopkin. – New York, NY : Kogan Page Publishers, 2018. – 492 p.
32. Asuquo, D. E. A fuzzy AHP model for selection of university academic staff / D. E. Asuquo, F. E. Onuodu // International Journal of Computer Applications. – 2016. – Vol. 141, No. 1. – Pp. 19–26.
33. Nuclear power plant life management and longer-term operation / Nuclear Energy Agency. – Paris, France, 2006. – 60 p.

УДК 004.94

## Результаты применения метода верификации информационных моделей объектов капитального строительства на различных этапах их жизненного цикла

The Results of the Application of the Verification Method for Information Models of Capital Construction Facilities at Various Stages of their Life Cycle

**Железнов Максим Максимович**

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные системы, технологии и автоматизация в строительстве», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, zheleznovmm@mgsu.ru

Zheleznov Maksim Maksimovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, zheleznovmm@mgsu.ru

**Монахов Борис Евгеньевич**

Кандидат технических наук, доцент, директор Института дополнительного образования (ИДО), ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, monahov@mgsu.ru

Monakhov Boris Evgenievich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Additional Education, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, monahov@mgsu.ru

**Адамцевич Любовь Андреевна**

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные системы, технологии и автоматизация в строительстве», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, AdamtsevichLA@mgsu.ru

Adamtsevich Lyubov Andreyevna

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, AdamtsevichLA@mgsu.ru

**Осташев Роман Витальевич**

Аспирант кафедры «Информационные системы, технологии и автоматизация в строительстве», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, lemon-noman@yandex.ru

Ostashev Roman Vitalievich

Postgraduate student of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, lemon-noman@yandex.ru

**Феттер Матвей Гелаевич**

Аспирант кафедры «Информационные системы, технологии и автоматизация в строительстве», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, f3tter@ya.ru

Fetter Matvey Gelaevich

Postgraduate student of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, f3tter@ya.ru

**Аннотация.** Статья посвящена разработке и апробации методики динамической оценки коллизий в мультидисциплинарных цифровых информационных моделях объектов капитального строительства. Цель исследования – повышение точности верификации за счёт адаптивного анализа геометрических, статистических и семантических параметров элементов, а также сокращение времени обработки данных. Методология включает обработку IFC-файлов, тесселяцию геометрии с применением многопоточной обработки для оптимизации вычислений и систему динамических весов, учитывающих функциональную

значимость элементов и контекст проекта. Анализ выполнен на выборке из более чем 20 разнородных моделей, охватывающих архитектурные, конструктивные и инженерные разделы.

Результаты исследования выявили, что до 80 % конфликтов сосредоточено в ключевых конструктивных и инженерных элементах, что согласуется с их функциональной ролью в проектах. Применение многопоточной обработки позволило сократить время вычислений на 35–50 % в зависимости от сложности моделей. Установлены ограничения методики: зависимость от качества исходных данных и высокая ресурсоёмкость обработ-

ки сложных геометрий. Для дальнейшего развития предложены интеграция машинного обучения для прогнозирования коллизий на ранних этапах проектирования и использование облачных вычислений для масштабируемости.

Практическая значимость работы заключается в снижении проектных рисков за счёт автоматизации анализа и приоритизации критичных конфликтов. Результаты подтверждают эффективность адаптивных методов верификации в условиях

**Abstract.** The article is devoted to the development and testing of a dynamic collision assessment methodology in multidisciplinary digital information models of capital construction facilities. The aim of the study is to increase the accuracy of verification through adaptive analysis of geometric, statistical and semantic parameters of elements, as well as reducing data processing time. The methodology includes the processing of IFC files, geometry tessellation using multithreaded processing to optimize calculations, and a system of dynamic weights that take into account the functional significance of the elements and the context of the project. The analysis was performed on a sample of more than 20 heterogeneous models covering architectural, structural and engineering sections.

The results of the study revealed that up to 80 % of conflicts are concentrated in key structural and engineering elements, which is consistent with their functional role in projects. The use of multithreaded processing has reduced the calculation time by

## Введение

В условиях активного внедрения технологий информационного моделирования (ТИМ) в строительную отрасль, требования к качеству цифровых информационных моделей (ЦИМ) объектов капитального строительства (ОКС) становятся всё более строгими. Одной из ключевых задач на этапе верификации ЦИМ является обнаружение и устранение коллизий пересечения – конфликтов между геометрическими представлениями элементов различных инженерных систем и конструкций.

Несмотря на широкое использование специализированного программного обеспечения для автоматического обнаружения коллизий, такие инструменты часто ограничены статическими алгоритмами, которые не учитывают контекст проекта, специфику дисциплин и этапы жизненного цикла информационной модели [1; 2]. Это приводит к избыточному количеству ложноположительных результатов, что усложняет процесс анализа и повышает риски ошибок при принятии проектных решений [3; 4].

Современные исследования в области ТИМ подтверждают актуальность этой проблемы. Анализ существующих методов верификации показывает, что подходы, основанные на статических правилах, недостаточно эффективны для мультидисциплинарных моделей инфраструктурных объектов, где критичность коллизий зависит от функциональной роли элементов [5]. В ряде работ подчёркивается необходимость внедрения адаптивных метрик, которые учитывают эксплуатационные требования и контекст проекта для оценки значимости конфликтов. Кроме того, отмечается, что текущие решения часто не учитывают такие параметры, как детализация геометрии, сложность тесселяции и семантическая насыщенность данных, что негативно влияет на точность приоритизации [6; 7].

Целью исследования является апробация разработанной методики верификации на разнородных ЦИМ ОКС с последующей количественной оценкой эффективности.

Предложенный подход направлен на устранение ключевых недостатков существующих решений за счёт адаптивности и учёта проектного контекста, что соответ-

воста требований к качеству цифровых моделей. Исследование вносит вклад в развитие интеллектуальных инструментов анализа, направленных на минимизацию ошибок и оптимизацию процессов в строительной отрасли.

**Ключевые слова:** ТИМ; верификация; информационные модели; апробация; коллизии пересечений; IFC; машинное обучение.

35-50 %, depending on the complexity of the models. The limitations of the methodology are established: dependence on the quality of the source data and the high resource intensity of processing complex geometries. For further development, the integration of machine learning for predicting collisions in the early stages of design and the use of cloud computing for scalability are proposed.

The practical significance of the work lies in reducing project risks by automating the analysis and prioritization of critical conflicts. The results confirm the effectiveness of adaptive verification methods in the context of increasing demands on the quality of digital models. The research contributes to the development of intelligent analysis tools aimed at minimizing errors and optimizing processes in the construction industry.

**Keywords:** ТИМ; верификация; информационные модели; апробация; пересечения коллизий; IFC; машинное обучение.

стует принципам интеллектуального анализа данных в ТИМ [8].

## Материалы и методы

Методика, представленная в данной статье, основана на динамической оценке коллизий в цифровых информационных моделях, разработанной авторами ранее в предыдущих исследованиях. Основная цель методики – обеспечить многоуровневый анализ геометрических, статистических и семантических параметров для определения критичности коллизий пересечений в мультидисциплинарных ЦИМ ОКС [9].

Ключевым отличием предложенного подхода от традиционных методов верификации является его адаптивность, позволяющая учитывать контекст проекта, функциональную роль элементов и этапы жизненного цикла ЦИМ. Методика включает несколько этапов, начиная с предварительной обработки данных и заканчивая динамической оценкой значимости коллизий.

На первом этапе осуществляется загрузка и обработка IFC-файлов (от англ. Industry Foundation Classes – отраслевые базовые классы), которые служат основным источником данных для анализа. Для обработки геометрических данных применяется алгоритм тесселяции, преобразующий твёрдотельную геометрию элементов в упрощённые триангуляционные сетки. Это позволяет снизить вычислительную нагрузку, однако требует значительных ресурсов при работе с высокодетализированными моделями. Для оптимизации процесса используется многопоточная обработка, что, как показали результаты, сокращает время вычислений на 35–50 % в зависимости от геометрической сложности ЦИМ.

Для оценки критичности коллизий применяется система динамических весов, которая учитывает не только геометрические параметры, но и семантические атрибуты элементов. Например, коллизия между несущей стеной и воздуховодом будет иметь больший вес, чем конфликт между декоративной панелью и кабельной линией, так как первый случай напрямую влияет на устойчивость здания и функциональность инженерных систем. Веса

ID	IFC-класс	Количество элементов, шт.	Количество типов, шт.	Количество коллизий, шт.	Суммарный объём коллизий, м <sup>3</sup>
24.1	IfcAirToAirHeatRecovery	1	1	0	0,0
	IfcCoil	2	2	0	0,0
	IfcHumidifier	1	1	0	0,0
	IfcDamper	18	2	27	2,857
	IfcDuctFitting	538	8	68	2,28
	IfcFan	2	2	0	0,0
	IfcDuctSegment	594	3	105	24,894
	IfcAirTerminal	148	6	154	2,046
	IfcDuctSilencer	2	1	0	0,0
	IfcFilter	2	2	0	0,0
24.2	IfcInterceptor	1	1	0	0,0
	IfcBeam	14	1	0	0,0
	IfcBuildingElementProxy	150	17	91	4,318
	IfcColumn	62	2	20	3,093
	IfcCovering	38	1	167	6,279
	IfcCurtainWall	1	1	0	0,0
	IfcDoor	70	6	11	0,26
	IfcMember	80	5	34	2,689
	IfcPlate	25	2	5	0,075
	IfcRailing	13	2	24	5,025
	IfcRoof	3	2	0	0,0
	IfcSlab	24	11	313	35,693
	IfcStair	5	2	0	0,0
	IfcStairFlight	10	2	14	1,183
24.3	IfcWall	178	11	535	47,634
	IfcWindow	47	3	47	0,094
	IfcOpeningElement	248	1	0	0,0
	IfcUnitaryEquipment	16	1	8	0,056
	IfcFlowMeter	1	1	0	0,0
	IfcValve	3	3	2	0,004
	IfcPipeFitting	411	7	291	5,203
	IfcPipeSegment	506	3	250	14,487
24.4	IfcSanitaryTerminal	72	7	289	13,798
	IfcWasteTerminal	2	1	0	0,0
	IfcFilter	1	1	0	0,0
	IfcDuctSegment	100	10	100	1019,41
	IfcAirTerminal	10	10	10	122,88
	IfcBuildingElementProxy	10	10	10	25265,91
	IfcColumn	10	10	10	3977,60
	IfcCovering	10	10	10	67424,53
	IfcDoor	10	10	10	183,90
	IfcMember	10	10	10	5878,69
	IfcPlate	10	10	10	24,11
	IfcRailing	10	10	10	7754,58
24.5	IfcSlab	10	10	10	718353,75
	IfcStairFlight	10	10	10	1064,94
	IfcWall	10	10	10	1638633,42
	IfcWindow	10	10	10	284,08
	IfcUnitaryEquipment	10	10	10	44,67
	IfcValve	10	10	10	0,80
	IfcPipeFitting	10	10	10	150953,08
	IfcPipeSegment	10	10	10	361088,48
	IfcSanitaryTerminal	10	10	10	397565,91

**Табл. 1. Выкопировка из отчёта с расчётами для одного из проектов**

**Tab. 1. Copying from a report with calculations for one of the projects**

назначаются на основе экспертизы правил и адаптивных метрик, которые корректируются в зависимости от специфики проекта [10–14].

Важным аспектом методики является интеграция статистического анализа, позволяющего выявлять закономерности в распределении коллизий. Например, в ходе исследования было установлено, что наибольшее количество конфликтов возникает между стенами (IfcWall) и воздуховодами (IfcDuctSegment), что связано с их высокой плотностью в зонах пересечения инженерных систем. Эти данные используются для приоритизации задач по устранению коллизий.

Ограничения методики связаны с зависимостью от качества исходных IFC-файлов: некорректно экспортные данные или отсутствие семантической разметки могут снизить точность анализа. Кроме того, ресурсоёмкость тесселяции сложных геометрий остаётся узким местом, требующим дальнейшей оптимизации.

В перспективе планируется расширить функционал методики за счёт интеграции машинного обучения для прогнозирования коллизий на ранних этапах проектирования, а также использования облачных вычислений для распределённой обработки данных. Это позволит повысить точность и скорость верификации, снизив риски ошибок на этапе строительства.

Таким образом, предложенная методика сочетает в себе алгоритмическую строгость, адаптивность и практическую направленность, что делает её эффективным инструментом для повышения качества цифровых информационных моделей и минимизации проектных рисков.

## Результаты

Авторы ранее разработали метод и алгоритм, которые были успешно протестированы на выборке из более чем двух десятков разнообразных и междисциплинарных ЦИМ ОКС, доступных в открытых источниках в интернете. В таблицах 1 и 2 представлены небольшие выкопировки из отчёта с расчётами и отчёта с результатами соответственно.

В таблице 3 представлены результаты анализа компонентов раздела архитектурных решений. Анализ данных показывает, что в группе архитектурных решений и в общей выборке наиболее значимым элементом является «стена» (IfcWall). Это ожидаемо, ведь стены – это клю-

№ пп.	IFC-класс	Наименование	Ненормированный вес, у.е.
1	IfcDamper	Увлажнитель	30,08
2	IfcDuctFitting	Фитинг воздуховода	60,47
3	IfcDuctSegment	Сегмент воздуховода	1019,41
4	IfcAirTerminal	Воздухораспределитель	122,88
5	IfcBuildingElementProxy	Вспомогательный элемент здания	25265,91
6	IfcColumn	Колонка	3977,60
7	IfcCovering	Покрытие	67424,53
8	IfcDoor	Дверь	183,90
9	IfcMember	Несущий элемент	5878,69
10	IfcPlate	Пластина	24,11
11	IfcRailing	Перила	7754,58
12	IfcSlab	Перекрытие	718353,75
13	IfcStairFlight	Лестничный пролёт	1064,94
14	IfcWall	Стена	1638633,42
15	IfcWindow	Окно	284,08
16	IfcUnitaryEquipment	Оборудование	44,67
17	IfcValve	Вентиль	0,80
18	IfcPipeFitting	Фитинг для трубы	150953,08
19	IfcPipeSegment	Сегмент трубы	361088,48
20	IfcSanitaryTerminal	Санитарно-техническое оборудование	397565,91

№ пп.	Класс IFC	Наименование элемента	Ненорми- рованный вес, у. е.	Процент, %
1	IfcWall	Стена	8 004 816,56	81,54
2	IfcCovering	Отделка	1 247 709,39	12,7
3	IfcRoof	Кровля	244 245,81	2,49
4	IfcRamp	Пандус	112 599,58	1,15
5	IfcDoor	Дверь	84 702,58	0,86
6	IfcWindow	Окно	74 101,38	0,75
7	IfcWasteTerminal	Мусоросборник	22 848,44	0,23
8	IfcRailing	Перила	20 785,59	0,21
9	IfcStair	Лестница	4 810,50	0,05
10	IfcFurniture	Мебель	321,61	0,00

**Табл. 3. Веса элементов архитектурных решений**  
Tab. 3. Weights of elements of architectural solutions

чевые конструктивные элементы зданий и сооружений. Они не только обеспечивают устойчивость и прочность конструкции, но и служат основой для размещения инженерных коммуникаций, что делает их ключевыми в контексте проектирования.

На втором месте по значимости находится элемент «отделка» (IfcCovering), который представляет собой класс многослойных отделочных конструкций, включающих отделку стен, полов, фасадные системы и другие элементы. Этот элемент важен для создания эстетически привлекательного и функционального внешнего вида объектов капитального строительства, а также для улучшения их эксплуатационных характеристик.

Интересно отметить, что элемент «пандус» (IfcRamp) имеет более высокий приоритет, чем «лестница» (IfcStair). Несмотря на то, что в большинстве зданий количество лестниц значительно превышает количество пандусов, в данном наборе данных ЦИМ не было обнаружено значительного числа коллизий пересечения, связанных с лестницами.

В таблице 4 представлены компоненты конструктивных решений. В группе конструктивных элементов наибольший вес приходится на элемент «балка» (IfcBeam), который составляет почти половину от общего веса группы. Это связано с ключевой ролью балок в обеспечении жёсткости и прочности перекрытий. Балки располагаются под потолком, где также размещаются инженерные коммуникации. В условиях ограниченного пространства возникает необходимость пересечения с различными инженерными системами, что делает балки важным элементом для обеспечения функциональности и безопасности здания.

На втором и третьем местах по весу располагаются элементы «колонна» (IfcColumn) и «перекрытие» (IfcSlab) соответственно. Колонны выполняют функцию

№ пп.	Класс IFC	Наименование элемента	Ненорми- рованный вес, у. е.	Процент, %
1	IfcBeam	Балка	2 806 060,19	44,85
2	IfcColumn	Колонна	1 624 733,39	25,97
3	IfcSlab	Перекрытие	1 117 923,52	17,87
4	IfcFooting	Фундамент	420 760,67	6,73
5	IfcPlate	Пластина	286 799,45	4,58

**Табл. 4. Веса элементов конструктивных решений**  
Tab. 4. Weights of structural elements

вертикальных несущих элементов, которые обеспечивают устойчивость здания, в то время как перекрытия являются горизонтальными несущими элементами, распределяющими нагрузки от вышезаписанных конструкций. В современных технологиях строительства, особенно в монолитных зданиях, колонны и перекрытия играют важную роль, обеспечивая необходимую прочность, долговечность и устойчивость конструкций.

Наименьший вес имеет элемент «пластина» (IfcPlate). Пластины используются для моделирования узлов сопряжения металлических конструкций и требуют высокой детализации ЦИМ. При менее детализированных моделях моделирование пластин в узлах может быть нецелесообразным, что может привести к снижению точности и надёжности проектных решений.

В таблице 5 представлены ключевые элементы, относящиеся к разделам водоснабжения и канализации. В этой группе наибольшее значение имеет элемент «труба» (IfcPipeSegment). Он играет ключевую роль в инженерной системе водоснабжения и канализации (ВК). Трубы обеспечивают перемещение жидкостей и газов между различными компонентами системы, что делает их основой её функционирования.

На втором месте по значимости находится элемент «санитарно-техническое оборудование» (IfcSanitaryTerminal). Этот компонент включает в себя устройства, предназначенные для удовлетворения гигиенических и бытовых потребностей, такие как раковины, ванны, унитазы и другие. Санитарно-техническое оборудование напрямую связано с трубами, которые обеспечивают его подключение к системе водоснабжения и канализации.

Наименьший вес в этой группе приходится на элемент «вентиль» (IfcValve). Доля вентилей в общем весе группы составляет менее одной сотой процента. Это объясняется ограниченным количеством коллизий с этим элементом в выборке ЦИМ, использованной в исследовании. Вентили играют важную роль в регулировании потока жидкости и газа, но их разнообразие и количество в рассматриваемых моделях уступают другим элементам.

В таблице 6 приведены элементы, относящиеся к разделу систем отопления, вентиляции и кондиционирования (далее – ОВиК). В данной группе наибольший вес имеет компонент «воздуховод» (IfcDuctSegment), что аналогично предыдущему разделу систем вентиляции и кондиционирования. Воздуховоды играют важную роль в перемещении воздуха между инженерными системами, что объясняет их значительное присутствие в модели. Ко-

№ пп.	Класс IFC	Наименование элемента	Ненорми- рованный вес, у. е.	Процент, %
1	IfcDuctSegment	Воздуховод	798 973,27	80,57
2	IfcDuctFitting	Деталь воздуховода	125 277,66	12,63
3	IfcBoiler	Котёл	61 972,00	6,25
4	IfcAirTerminal	Воздухо- распределители	5 263,77	0,53
5	IfcDamper	Заслонка	60,49	0,01
6	IfcUnitaryEquipment	Вентиляционное оборудование	44,67	0,00
7	IfcSpaceHeater	Радиатор	36,60	0,00
8	IfcFan	Вентилятор	1,80	0,00
9	IfcDuctSilencer	Глушитель шума	0,50	0,00

**Табл. 6. Веса элементов раздела ОВиК**  
Tab. 6. Weights of the HVAC section elements

личество элементов воздуховода значительно превышает число других компонентов раздела ОВиК.

Элементы «вентиляционное оборудование» (IfcUnitaryEquipment), «радиатор» (IfcSpaceHeater), «вентилятор» (IfcFan) и «глушитель шума» (IfcDuctSilencer) имеют наименьший вес в структуре ОВиК и составляют менее одной сотой процента от общего числа элементов. Это связано с тем, что выборка цифровых информационных данных, использованных в исследовании, не включала в себя большое количество элементов этих типов.

В таблице 7 представлены ключевые составляющие раздела, посвящённого электрооборудованию и освещению.

Наибольшее значение в этой категории имеет элемент «кабельная линия» (IfcCableSegment). Кабельные линии выполняют функцию транспортировки, обеспечивая передачу электроэнергии и сигналов. Их количество значительно превышает количество других элементов в этой группе, что подчёркивает их важность для работы всей системы.

На втором месте по значимости находится элемент «светильник» (IfcLightFixture). Светильники – это неотъемлемая часть инженерных систем, они обеспечивают освещение помещений. Большинство светильников устанавливаются на потолке, что обусловлено их функцией. Однако высокая концентрация инженерных систем в этом пространстве может приводить к конфликтам и пересечениям, требующим тщательного анализа и оптимизации.

В таблице 8 представлена сводная таблица по всем разделам и всем элементам, присутствующим в изначаль-

№ пп.	Класс IFC	Наименование элемента	Ненорми- рованный вес, у. е.	Процент, %
1	IfcPipeSegment	Труба	266 310,61	64,16
2	IfcSanitaryTerminal	Санитарно- техническое оборудование	109 221,72	26,31
3	IfcPipeFitting	Деталь трубопровода	39 504,09	9,52
4	IfcPump	Насос	52,80	0,01
5	IfcValve	Вентиль	1,52	0,00

**Табл. 5. Веса элементов раздела водоснабжения и канализации**  
Tab. 5. Weights of the elements of the water supply and sewerage section

ной выборке ЦИМ. Таблица отсортирована по убыванию в зависимости от относительного веса каждого элемента (абсолютные и относительные веса по разделам представлены в таблицах 3–7).

На рисунке 1 представлена диаграмма по таблице 8: на горизонтальной оси отмечены порядковые номера элементов (первый столбец таблицы 8), на левой вертикальной оси указаны значения относительных весов (четвёртый столбец таблицы 8), на диаграмме также присутствует линия совокупных значений, которая на дополнительной правой вертикальной оси отображает процент от итоговой суммы.

Согласно принципу Парето, первые 20 % элементов имеют большее значение в контексте процесса исправления коллизий пересечения. Для имеющейся выборки ЦИМ это следующие элементы: стена (81,541), воздуховод (80,572), кабельная линия (65,707), труба (64,157), балка (44,857), светильник (33,121), санитарно-техническое оборудование (26,313) и колонна (25,970). Исправление коллизий пересечения с участием данных элементов в первую очередь позволит получить максимальный эффект от приоритизации коллизий пересечения в процессе управления коллизиями.

#### Обсуждение

Результаты исследования подтверждают, что предложенная методика динамической оценки коллизий позволяет эффективно выявлять и ранжировать конфликты в мультидисциплинарных ЦИМ ОКС. Выявленная концентрация коллизий вокруг стен (IfcWall), балок (IfcBeam) и воздуховодов (IfcDuctSegment) согласуется с данными предыдущих работ, где несущие конструкции и инженерные системы выделяются как ключевые источники междисциплинарных конфликтов [5; 15]. Это подчёркивает универсальность подхода, ориентированного на функциональную значимость элементов.

Успешное сокращение времени обработки данных на 35–50 % за счёт многопоточности демонстрирует потенциал алгоритмической оптимизации в условиях роста сложности ЦИМ ОКС. Однако ресурсоёмкость тесселяции сложных геометрий остаётся критическим ограничением, что коррелирует с выводами исследований, указывающими на зависимость точности анализа от детализации моделей [6; 9]. Для преодоления этого барьера перспективным направлением может стать гибридный подход, сочетающий упрощённые геометрические представления для предварительного анализа и детализацию только для критичных зон.

№ пп.	Класс IFC	Наименование элемента	Ненорми- рованный вес, у. е.	Процент, %
1	IfcCableSegment	Кабельная линия	1 069 806,70	65,71
2	IfcLightFixture	Светильник	539 257,82	33,12
3	IfcSwitchingDevice	Выключатель	15 712,93	0,97
4	IfcJunctionBox	Распределительная коробка	2 636,48	0,16
5	IfcElectricDistributionBoard	Электрический распределительный щит	447,30	0,03
6	IfcOutlet	Розетка	283,50	0,02

**Табл. 7. Веса элементов электрооборудования и освещения**  
Tab. 7. Weights of electrical equipment and lighting elements

№ пп.	Класс IFC	Наименование элемента	Относи- тельный вес, у.е.	Раздел
1	IfcWall	Стена	81,541	АР
2	IfcDuctSegment	Воздуховод	80,572	ОВиК
3	IfcCableSegment	Кабельная линия	65,707	ЭОМ
4	IfcPipeSegment	Труба	64,157	ВК
5	IfcBeam	Балка	44,852	КР
6	IfcLightFixture	Светильник	33,121	ЭОМ
7	IfcSanitaryTerminal	Сан.-тех. оборудование	26,313	ВК
8	IfcColumn	Колонна	25,970	КР
9	IfcSlab	Перекрытие	17,869	КР
10	IfcCovering	Отделка	12,710	АР
11	IfcDuctFitting	Деталь воздуховода	12,633	ОВиК
12	IfcPipeFitting	Деталь трубопровода	9,517	ВК
13	IfcFooting	Фундамент	6,725	КР
14	IfcBoiler	Котёл	6,250	ОВиК
15	IfcPlate	Пластина	4,584	КР
16	IfcRoof	Кровля	2,488	АР
17	IfcRamp	Пандус	1,147	АР
18	IfcSwitchingDevice	Выключатель	0,965	ЭОМ
19	IfcDoor	Дверь	0,863	АР
20	IfcWindow	Окно	0,755	АР
21	IfcAirTerminal	Воздухораспределители	0,531	ОВиК
22	IfcWasteTerminal	Мусоросборник	0,233	АР
23	IfcRailing	Перила	0,212	АР
24	IfcJunctionBox	Распределительная коробка	0,162	ЭОМ
25	IfcStair	Лестница	0,049	АР
26	IfcElectricDistributionBoard	Электрический щит	0,027	ЭОМ
27	IfcOutlet	Розетка	0,017	ЭОМ
28	IfcPump	Насос	0,013	ВК
29	IfcDamper	Заслонка	0,006	ОВиК
30	IfcUnitaryEquipment	Вент. оборудование	0,005	ОВиК
31	IfcSpaceHeater	Радиатор	0,004	ОВиК
32	IfcFurniture	Мебель	0,003	АР
33	IfcValve	Вентиль	0,000	ВК
34	IfcFan	Вентилятор	0,000	ОВиК
35	IfcDuctSilencer	Глушитель шума	0,000	ОВиК

**Табл. 8. Сводная таблица по всем элементам**  
Tab. 8 Summary table for all elements

Зависимость методики от качества исходных IFC-файлов, включая семантическую разметку, актуализирует проблему стандартизации данных в строительной отрасли. Как отмечается в работах [3; 7], отсутствие единых протоколов экспорта моделей приводит к ошибкам интерпретации, что требует разработки дополнительных инструментов валидации входных данных.

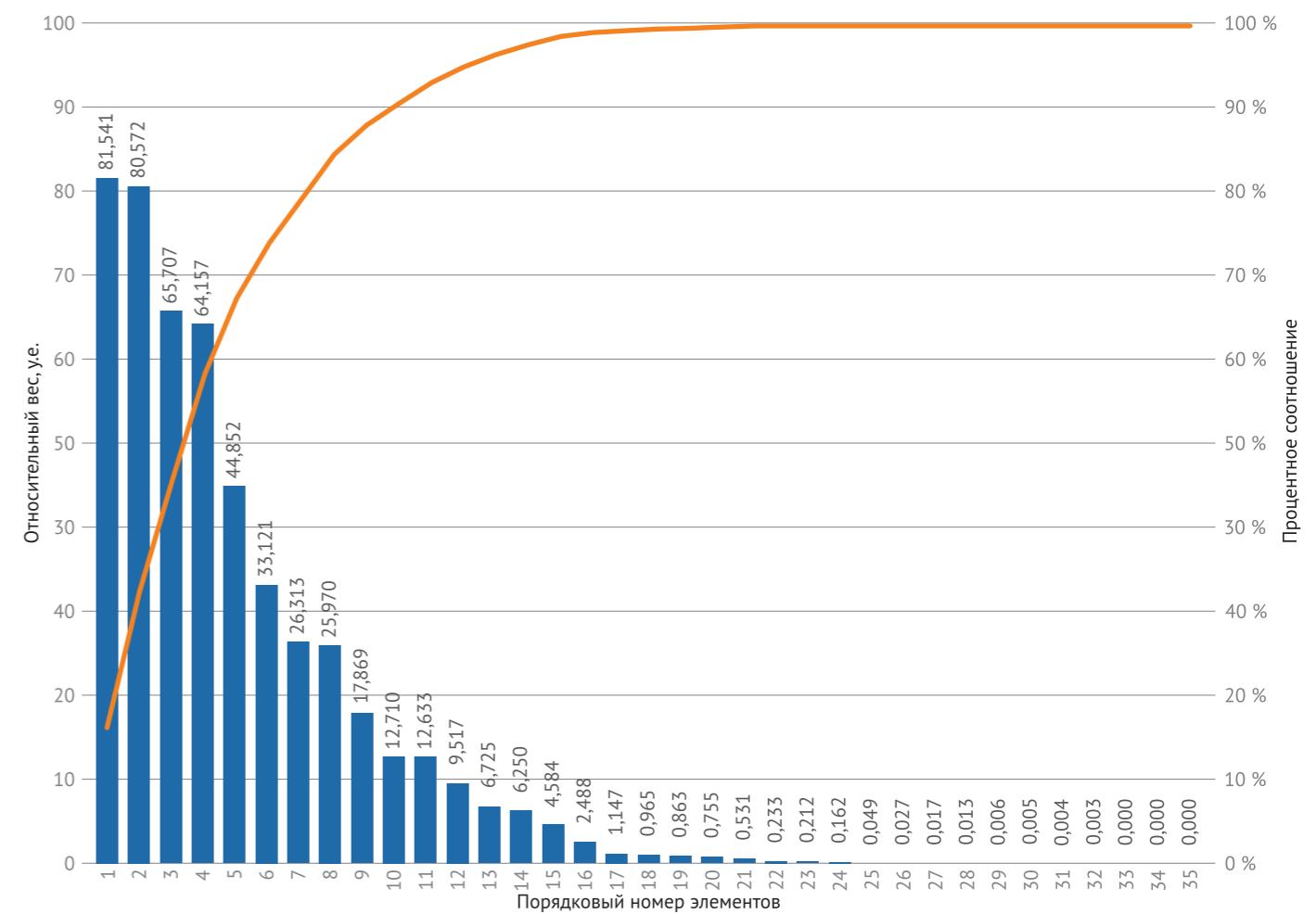
Перспективы интеграции машинного обучения, предложенные авторами, открывают возможности для прогнозирования коллизий на ранних этапах проектирования. Это могло бы снизить нагрузку на вычислительные ресурсы, перенося часть анализа на этап концептуального моделирования, как это реализовано в исследованиях по предиктивной аналитике [16].

Кроме того, использование облачных вычислений способно обеспечить масштабируемость методики, что

особенно актуально для крупных инфраструктурных проектов [14].

Практическая значимость работы заключается в снижении рисков ошибок проектирования за счёт приоритизации критических коллизий. Это напрямую влияет на сокращение сроков и затрат на устранение конфликтов на этапе строительства, что подтверждает экономическую эффективность аддитивных методов верификации. Однако для широкого внедрения методики необходима её адаптация к требованиям различных стандартов и интеграция в существующие инструменты для обработки ЦИМ.

Таким образом, исследование вносит вклад в развитие интеллектуальных методов анализа ТИМ, предлагая решения для повышения их надёжности и соответствия отраслевым требованиям. Дальнейшие работы должны



**Рис. 1. Диаграмма относительных весов элементов с линией совокупных значений**  
Fig. 1. A diagram of the relative weights of elements with a line of cumulative values

быть направлены на устранение выявленных ограничений и расширение функциональности за счёт инновационных технологий.

#### Заключение

Проведённое исследование подтвердило эффективность разработанной методики динамической оценки коллизий в мультидисциплинарных ТИМ-моделях. Основная цель – повышение точности верификации за счёт аддитивного анализа геометрических, статистических и семантических параметров – достигнута. Результаты апробации на выборке из более чем 20 ЦИМ продемонстрировали, что ключевыми источниками конфликтов являются элементы с высокой функциональной нагрузкой: стены (IfcWall), балки (IfcBeam) и воздуховоды (IfcDuctSegment).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Талапов, В. В. Основы BIM. Введение в информационное моделирование зданий / В. В. Талапов. – Саратов : Профобразование, 2017. – 392 с.
2. Информационные системы и технологии в строительстве : Учебное пособие / А. А. Волков, С. Н. Петрова, А. В. Гинзбург [и др.]. – Москва : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2015. – 424 с.
3. Совершенствование процесса строительства с использованием BIM-технологий / Л. Б. Зеленцов, К. А. Цапко, И. Ф. Беликова, Д. В. Пирко // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 3 (63). – С. 3.
4. Аминов, Р. Р. Нормативное регулирование BIM-технологий, прохождение Госэкспертизы / Р. Р. Аминов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 2 (74). – С. 20–28.
5. Дронов, Д. С. Проблемы внедрения BIM-технологий в России / Д. С. Дронов, Н. Р. Киметова, В. П. Ткаченко // Синергия Наук. – 2017. – № 10. – С. 529–549.
6. Буравлева, А. Ф. Внедрение BIM-технологий в процесс проектирования и строительства объектов недвижимости / А. Ф. Буравлева, Н. А. Клинина, М. О. Крутилова // Вестник научных конференций. – 2016. – № 10-3 (14). – С. 36–39.
7. Трудности поэтапного внедрения BIM / В. В. Шарманов, А. Е. Мамаев, А. С. Болейко, Ю. С. Золотова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 10 (37). – С. 108–120.
8. Технологии создания информационных моделей существующих сооружений на основе облаков точек, полученных пу-

- тём лазерного сканирования / В. Л. Баденко, Ю. В. Волкова, О. М. Каскелайнен, В. А. Земба // Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием : в 3 частях, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года / Ответственные редакторы: Н. Д. Беляев, В. В. Елистратов ; Инженерно-строительный институт. – Часть 1. – Санкт-Петербург : ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2019. – С. 255–257.
9. BIM-enabled construction innovation through collaboration: a mixed-methods systematic review / H. Liu, M. Skibniewski, Q. Ju, J. Li, H. Jiang. – DOI 10.1108/ECAM-03-2020-0181// Engineering Construction and Architectural Management. – 2020. – Vol. 28, Iss. 6. – Pp. 1541–1560.
10. Underground Engineering Orientated Data Mapping from Construction Information Models to Structural Analysis / N. Zhu, F. Lin, R. Scherer, P. Dohmen // Fangzheng Lin. – TU Dresden, Germany : Institute of Construction Informatics, 2020.
11. Xun, X. Multi-Information Fusion Based on BIM and Intuitionistic Fuzzy D-S Evidence Theory for Safety Risk Assessment of Undersea Tunnel Construction Projects / X. Xun, J. Zhang, Y. Yuan. 10.3390/buildings12111802 // Buildings. – 2022. – Vol. 12, Iss. 11. – P. 1802.

## REFERENCES

1. Talapov, V. V. Osnovy BIM. Vvedeniye v informatsionnoye modelirovaniye zdaniy [The basics of BIM. Introduction to Building Information Modeling] / V. V. Talapov. – Saratov : Profobrazovaniye, 2017. – 392 p.
2. Informatsionnye sistemy i tekhnologii v stroitel'stve : Uchebnoye posobie [Information systems and technologies in construction : A textbook] / A. A. Volkov, S. N. Petrova, A. V. Ginzburg [and others]. – Moscow : Moskovskiy gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet [Moscow State University of Civil Engineering], EBS ASV, 2015. – 424 p.
3. Sovershenstvovaniye protsessov stroitel'stva s ispol'zovaniye BIM-tehnologij [Improving the construction process using BIM technologies] / L. B. Zelentsov, K. A. Tsapko, I. F. Belikova, D. V. Pirko // Inzhenernyj vestnik Doma [Engineering Bulletin of the Don]. – 2020. – No. 3 (63). – P. 3.
4. Aminov, R. R. Normativnoye regulirovaniye BIM-tehnologij, prokhozhdeniye Gosehkspertizy [Regulatory regulation of BIM technologies, passing State Expertise] / R. R. Aminov // Inzhenernyj vestnik Doma [Engineering Bulletin of the Don]. – 2021. – No. 2 (74). – Pp. 20–28.
5. Dronov, D. S. Problemy vnedreniya BIM-tehnologij v Rossii [Problems of BIM technology implementation in Russia] / D. S. Dronov, N. R. Kimetova, V. P. Tkachenko // Sinergiya Nauk [Synergy of Sciences]. – 2017. – No. 10. – Pp. 529–549.
6. Buravleva, A. F. Vnedreniye BIM-tehnologij v protsess proyektirovaniya i stroitel'stva ob'yektov nedvizhimosti [The introduction of BIM technologies in the process of design and construction of real estate] / A. F. Buravleva, N. A. Klipina, M. O. Krutilova // Vestnik nauchnykh konferentsij [Bulletin of scientific conferences]. – 2016. – No. 10-3 (14). – Pp. 36–39.
7. Trudnosti poehtapnogo vnedreniya BIM [Difficulties of phased BIM implementation] / V. V. Sharmanov, A. Ye. Mamayev, A. S. Boleyko, Yu. S. Zolotova // Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenij [Construction of unique buildings and structures]. – 2015. – No. 10 (37). – Pp. 108–120.
8. Tekhnologii sozdaniya informatsionnykh modelej sushhestvuyushhih sooruzhenij na osnove oblakov tochek, poluchennykh put'jom lazernogo skanirovaniya [Technologies for creating information models of existing structures based on point clouds obtained by laser scanning] / V. L. Badenko, Yu. V. Volkova, O. M. Kaskelainen, V. A. Zemba // Nedelya nauki SPbPU : Materialy nauchnoj konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem : v 3 chastyakh, Sankt-Peterburg, 18–23 noyabrya 2019 goda [SPbPU Science Week : Proceedings of a scientific conference with international participation : In 3 parts, St. Pe-
- tersburg, November 18–23, 2019] / Otvetstvennye redaktory: N. D. Belyayev, V. V. Yelistratov ; Inzhenerno-stroitel'nyj institut [Institute of Civil Engineering]. – Chast' 1. – Saint-Petersburg : FGAOU VO "Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet Petra Velikogo" [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University], 2019. – Pp. 255–257.
9. BIM-enabled construction innovation through collaboration: a mixed-methods systematic review / H. Liu, M. Skibniewski, Q. Ju, J. Li, H. Jiang. – DOI 10.1108/ECAM-03-2020-0181// Engineering Construction and Architectural Management. – 2020. – Vol. 28, Iss. 6. – Pp. 1541–1560.
10. Underground Engineering Orientated Data Mapping from Construction Information Models to Structural Analysis / N. Zhu, F. Lin, R. Scherer, P. Dohmen // Fangzheng Lin. – TU Dresden, Germany : Institute of Construction Informatics, 2020.
11. Xun, X. Multi-Information Fusion Based on BIM and Intuitionistic Fuzzy D-S Evidence Theory for Safety Risk Assessment of Undersea Tunnel Construction Projects / X. Xun, J. Zhang, Y. Yuan. 10.3390/buildings12111802 // Buildings. – 2022. – Vol. 12, Iss. 11. – P. 1802.
12. BIM in facilities management applications: a case study of a large university complex / M. Kassem, G. Kelly, N. Dawood, M. Serginson, S. Lockley. – DOI 10.1108/BEPAM-02-2014-0011 // Built Environment Project and Asset Management. – 2015. – Vol. 5, Iss. 3. – Pp. 261–277.
13. Williams, T. P. Predicting construction cost overruns using text mining, numerical data and ensemble classifiers / T. P. Williams, J. Gong. – DOI 10.1016/j.autcon.2014.02.014 // Automation in Construction. – 2014. – Vol. 43. – Pp. 23–29.
14. A review of cloud-based BIM technology in the construction sector / J. Wong, X. Wang, H. Li, G. Chan, H. Li // Journal of Information Technology in Construction. – 2014. – Vol. 19. – Pp. 281–291.
15. Kagan, P. B. Analiticheskiye issledovaniya bol'shikh massivov dannykh v stroitel'stve [Analytical studies of large amounts of data in construction] / P. B. Kagan // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [Industrial and civil engineering]. – 2018. – No. 3. – Pp. 80–84.
16. Ehkonomicheskaya effektivnost' primeneniya iskusstvennogo intellekta v stroitel'stve [Economic efficiency of the use of artificial intelligence in construction] / M. I. Shmidt, Ye. A. Tsapikova, P. M. Lopatina [et al.]. – DOI 10.34925/EIP.2021.128.3.281 // Ehkonomika i predprinimatel'stvo [Economics and entrepreneurship]. – 2021. – No. 3 (128). – Pp. 1385–1389.

## УДК 696

## Оценка факторов, влияющих на эффективность реализации проектов строительства складской инфраструктуры

Evaluation of Factors Affecting the Efficiency of Warehouse Infrastructure Construction Project Implementation

## Лапидус Азарий Абрамович

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, lapidus58@mail.ru

## Lapidus Azariy Abramovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, lapidus58@mail.ru

## Кардава Александр Мерабиевич

Аспирант кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, alkardava@gmail.com

## Kardava Alexander Merabievich

Postgraduate student of the Department of Technologies and Organisation of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), 129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, alkardava@gmail.com

**Аннотация.** В условиях высокого уровня конкуренции за потребителя и влияния технологических новаций создание объектов складской инфраструктуры становится всё более сложным и многогранным процессом, который требует учёта множества факторов. Современные склады воспринимаются не как простые помещения для хранения товаров, а как высокотехнологичные комплексы, которые являются основной сложных процессов логистики и хранения товаров. Поэтому компании, занимающиеся реализацией проектов строительства объектов данного профиля, вынуждены осуществлять деятельность с учётом строгих стандартов производительности, энергоэффективности, экологичности и экономической целесообразности.

В этой связи особую **актуальность** представляют анализ факторов, влияющих на эффективность реализации проектов строительства складской инфраструктуры, а также формирование мультипликатора, методики расчёта которого позволяют оценить и повысить эффективность создания объектов складской инфраструктуры.

**Объектом** исследования настоящей работы является процесс создания складской инфраструктуры. В свою очередь, **предметом** исследования выступают факторы, влияющие на эффективность создания объектов складской инфраструктуры, а также методы их оценки и оптимизации.

**Abstract.** In conditions of high level of competition for consumers and the impact of technological innovations, the creation of warehouse infrastructure facilities is becoming an increasingly complex and multifaceted process that requires consideration of many factors. Modern warehouses are perceived not as simple premises for storage of goods, but as high-tech complexes, which are the main complex processes of logistics and storage of goods. In this regard, companies engaged in the implementation of projects for the construction of facilities of this profile are forced to operate with strict standards of performance, energy efficiency, environmental friendliness and economic feasibility.

In this regard, of particular relevance is the analysis of factors affecting the efficiency of warehouse infrastructure construction projects, as well as the formation of a multiplier, the calculation methodology of which will allow to assess and improve the efficiency of the creation of warehouse infrastructure facilities.

The object of research of this paper is the process of creating warehouse infrastructure. In turn, the subject of the study are

Для реализации поставленной цели применяются системный подход, а также **методы** качественного и количественного анализа. **Теоретическая часть** исследования базируется на системном подходе, который предполагает рассмотрение проекта строительства складской инфраструктуры как сложной системы, состоящей из взаимосвязанных элементов. **Практическая часть** исследования направлена на разработку и апробацию мультипликатора эффективности, который позволяет количественно оценить вклад каждого фактора в успех проекта.

На основе **результатов** исследования сформированы практические рекомендации по повышению эффективности проекта, включая внедрение современных технологий, оптимизацию логистики и учёт социальной ответственности. Таким образом, комплексный подход и использование мультипликатора обеспечивают сбалансированное управление проектом, что способствует его долгосрочной устойчивости.

Проведённый анализ позволяет сделать **вывод**, что успешная реализация проекта по созданию складской инфраструктуры требует учёта множества факторов, тогда как разработанный мультипликатор позволяет количественно оценить влияние каждого фактора и выявить слабые места проекта.

**Ключевые слова:** складские объекты; инфраструктура; мультипликатор; логистика; факторы эффективности.

the factors affecting the efficiency of the creation of warehouse infrastructure facilities, as well as methods of their evaluation and optimisation.

For the realisation of the set goal the system approach, as well as methods of qualitative and quantitative analysis are used. In order to realise the set goal, the system approach, as well as methods of qualitative and quantitative analysis are used. The theoretical part of the study is based on the system approach, which involves considering the warehouse infrastructure construction project as a complex system consisting of interrelated elements. The practical part of the research is aimed at developing and testing the efficiency multiplier, which allows quantifying the contribution of each factor to the success of the project.

Based on the results of the study, practical recommendations for improving project efficiency are formed, including the introduction of modern technologies, optimisation of logistics and consideration of social responsibility. Thus, the integrated approach and the use of the multiplier ensure balanced management of the

project, which contributes to its long-term sustainability.

The analysis allows us to conclude that the successful implementation of a warehouse infrastructure project requires the consideration of many factors, while the developed multiplier al-

## Введение

Процесс создания объектов складской инфраструктуры основывается на множестве взаимосвязанных аспектов, которые могут быть соотнесены с несколькими категориями: технические, экономические, организационные, внешние, а также экологические и социальные факторы. Фактор каждой категории играет особую роль в успехе реализации проекта, от чего игнорирование каждого из них чревато увеличением затрат, задержками в сроках, снижением качества объекта или даже провалом всего проекта.

Так, технические факторы определяют то, насколько современным и функциональным будет склад, в связи с чем перечень таких составляющих включает вопросы выбора технологий строительства, установления уровня автоматизации и оценки готовности инфраструктуры.

Экономические факторы связаны с финансовой стороной проекта – бюджетным обеспечением, сроками окупаемости и операционными затратами.

Организационные факторы охватывают круг вопросов, связанных с управлением проектом, система которого зависит от квалификации персонала и структуры логистики, что напрямую влияет на сроки и качество выполнения работ.

В свою очередь, внешние факторы, такие как рыночные условия, регуляторная среда и географическое расположение, определяют контекст, в котором реализуется проект.

Наконец, экологические и социальные факторы, которые становятся всё более важными в условиях глобального тренда на устойчивое развитие, определяют то, насколько процесс выполнения проекта соотносится с принципами социальной ответственности бизнеса.

Учёт вышеперечисленных категорий позволяет не только минимизировать риски, но и повысить конкурентоспособность объекта, а именно сделать его более привлекательным для арендаторов и инвесторов. Тем не менее, для реализации сбалансированного проекта с учётом описанных нюансов важно не только понимать значимость факторов, но и уметь количественно и качественно оценивать их влияние на проект, для чего может использоваться соответствующий мультиплексор – инструмент, функционал которого позволяет взвесить каждый фактор и определить общую эффективность проекта.

**Объектом исследования** настоящей работы является процесс создания складской инфраструктуры. В свою очередь, **предметом исследования** выступают факторы, влияющие на эффективность создания объектов складской инфраструктуры, а также методы их оценки и оптимизации.

Для анализа факторов, влияющих на эффективность создания объектов складской инфраструктуры, использовались следующие **методы**:

- системный подход, заключающийся в рассмотрении проекта строительства как сложной системы, состоящей из взаимосвязанных элементов (техни-

- ческих, экономических, организационных и других факторов);
- качественный анализ, представленный мерами по описанию каждого фактора, его роли и значимости в процессе создания складской инфраструктуры;
- количественный анализ, результатом которого является присвоение весов и оценок факторам на основе их значимости и состояния;
- сравнительный анализ, в рамках которого осуществляется сопоставление различных подходов к реализации проектов складской инфраструктуры;
- практическое применение, характеризующееся разработкой рекомендаций по улучшению мажорных факторов на основе анализа мультиплексора и предложением инструментов для оптимизации ресурсов и минимизации рисков.

## Методы

В представленной статье используется комплексный подход, сочетающий теоретический анализ и практическое применение, для оценки факторов, влияющих на эффективность реализации проектов строительства складской инфраструктуры. Теоретическая часть исследования основана на систематизации существующих научных знаний, а практическая часть включает разработку методики количественной оценки эффективности с использованием мультиплексора.

Теоретическая часть исследования базируется на системном подходе, который предполагает рассмотрение проекта строительства складской инфраструктуры как сложной системы, состоящей из взаимосвязанных элементов. Вместе с тем выделяются пять ключевых категорий факторов: технические, экономические, организационные, внешние, а также экологические и социальные. Для анализа этих факторов применяется качественный метод, включающий описание каждого фактора, его роли и значимости в контексте проекта. Кроме того, проводится сравнительный анализ современных исследований, как отечественных, так и зарубежных, что позволяет выявить пробелы в существующих подходах и обосновать актуальность разработки новой методики. Теоретическая часть также опирается на критический обзор литературы, где особое внимание уделяется технологическим инновациям (например, BIM-моделированию, автоматизации), экономическим аспектам (бюджетному планированию, срокам окупаемости) и организационным подходам (Agile-управлению, системам WMS и TMS).

Практическая часть исследования направлена на разработку и апробацию мультиплексора эффективности, который позволяет количественно оценить вклад каждого фактора в успех проекта. Методика создания мультиплексора включает несколько этапов. На первом этапе определяются веса факторов на основе их значимости для проекта, что обеспечивает объективность оценки. Далее проводится количественный анализ, в рамках которого каждому фактору присваивается оценка в зависимости от его состояния в конкретном проекте. Расчёт мультиплексора осуществляется по формуле взвешенной суммы

lows us to quantify the impact of each factor and identify the weaknesses of the project.

**Keywords:** warehouse facilities; infrastructure; multiplier; logistics; efficiency factors.

оценок, что позволяет получить интегральный показатель эффективности. Для демонстрации работы методики приводится пример оценки реального проекта, где наглядно показано, как мультиплексор выявляет слабые места и формирует рекомендации для их устранения. Практическая часть также включает интерпретацию результатов, где низкие оценки факторов становятся основой для разработки конкретных мер по улучшению, таких как внедрение модульных конструкций, расширение использования RFID-технологий или оптимизация системы отчётности.

В результате сочетание теоретического анализа и практического инструментария обеспечивает целостность исследования. Теоретическая часть создаёт научную основу для понимания ключевых факторов, а практическая часть предлагает конкретный механизм их оценки и оптимизации. Такой подход не только заполняет пробел в существующих исследованиях, но и предоставляет компаниям-девелоперам действенный инструмент для повышения эффективности проектов строительства складской инфраструктуры в условиях высокой конкуренции и динамично меняющейся среды.

## Обзор литературы

Современные исследования в области проектирования и эксплуатации складской инфраструктуры демонстрируют возрастающую сложность управленческих и технологических задач, стоящих перед разработчиками подобных проектов. В контексте глобализации экономических процессов и цифровой трансформации логистических систем складские комплексы эволюционировали от традиционных хранилищ товарных запасов до высокотехнологичных центров распределения, интегрированных в сложные цепочки поставок [1–2].

Технологические инновации в складской инфраструктуре активно исследуются как в отечественной, так и в зарубежной литературе. Так, работы Сборщикова и Лазаревой подчёркивают важность BIM-моделирования и модульного строительства, что согласуется с выводами зарубежных авторов, таких как Azhar, который рассматривает BIM как ключевой инструмент оптимизации строительных процессов [3–4]. Исследования Musgrave дополняют этот дискурс, демонстрируя, как автоматизация складов с помощью роботизированных систем (например, Amazon Robotics) повышает эффективность логистических операций [5].

Экономическая эффективность складских проектов анализируется в работах Мури, а также Николаевой и Банникова, где особое внимание уделяется бюджетному планированию и срокам окупаемости [6–7]. В свою очередь, зарубежные исследования, такие как работы Rushton, расширяют понимание экономических аспектов, вводя концепцию Total Cost of Ownership (TCO) для оценки долгосрочных затрат на эксплуатацию складских объектов. Кроме того, Christopher подчёркивает роль гибкости складских систем в условиях нестабильности спроса, что особенно актуально в постпандемийный период [8–9].

Вопросы управления складскими проектами рассматриваются в работах Бидова и Топчего, где анализируются методы контроля качества и адаптации объектов к изменяющимся условиям [10–11]. В данном контексте зарубежные авторы пошли дальше с предложением методик

Agile-управления в логистике, что позволяет сократить сроки реализации проектов и повысить их гибкость [12]. Например, исследование Frazelle фокусируется на оптимизации складских операций через внедрение систем WMS и TMS, что коррелирует с выводами российских учёных о важности цифровизации логистики [13–14].

Экологические аспекты складской инфраструктуры исследуются Комаровым и Пупенцовой, которые предлагаю модели устойчивого управления [15]. Международные работы, такие как исследования McKinnon, дополняют данный подход, анализируя влияние «зелёных» технологий (солнечные панели, системы рекуперации энергии) на снижение углеродного следа складов [16]. Социальная ответственность бизнеса в контексте складской логистики рассматривается в работах Carter & Rogers, где авторы обосновывают необходимость интеграции ESG-принципов в стратегии развития логистических компаний [17].

Непосредственной разработкой инструментов для оценки эффективности проектов строительства складских комплексов занимались Ягольницер и Кузнецова [18–19]. Вместе с тем их зарубежные коллеги, такие как Waters и Rinsler, предлагают KPI-системы для измерения производительности складов, включая метрики оборачиваемости запасов и точности выполнения заказов. В дополнение к ним исследование Gunasekaran вводит концепцию «умных складов» (Smart Warehousing), где ключевыми критериями эффективности становятся уровень автоматизации и интеграция с IoT-платформами [20–21].

Проведённый анализ литературы позволяет констатировать, что, несмотря на значительное количество исследований, посвящённых отдельным аспектам складской инфраструктуры, существует дефицит комплексных методик, объединяющих технологические (BIM, автоматизация, IoT), экономические (TCO, ROI, гибкость бюджетирования) и организационные (Agile, WMS, управление рисками) факторы в единую систему оценки.

Настоящее исследование направлено на заполнение этого пробела путём разработки мультиплексора эффективности, который позволяет количественно оценивать вклад каждого фактора, а также формирует основу для практических рекомендаций по оптимизации проектов.

Последующее изложение будет посвящено детальной презентации предложенной методики и её апробации на реальных кейсах.

## Результаты

Цель настоящего исследования заключается в определении ключевых факторов, влияющих на эффективность создания объектов складской инфраструктуры, а также в разработке инструмента для их оценки и оптимизации, который позволит повысить успешность реализации подобных проектов. В этой связи следует более подробно рассмотреть каждый из факторов, влияющих на эффективность создания объектов складской инфраструктуры, что позволит понять их значимость и специфику влияния на проект:

1. Технические факторы, связанные с технологическими аспектами строительства и эксплуатации склада:
  - технологичность строительства. Речь идёт об использовании современных строительных технологий, материалов и методов, которые ускоря-

- ют процесс строительства и повышают качество объекта. В качестве примеров можно рассмотреть модульное строительство, использование лёгких и прочных материалов, BIM-технологии (информационное моделирование зданий), что способствует снижению сроков строительства, повышению долговечности и надёжности объекта;
- инфраструктурная готовность. В данном случае подразумевается наличие необходимой инфраструктуры для подключения склада к коммуникациям (электричество, вода, канализация, газ) и транспортным сетям – состояние, которое достигается близостью к автомагистралям, железнодорожным узлам, наличием подъездных путей. Такие факторы сказываются на величине издержек подключения и эксплуатации объекта, степени доступности объекта для клиентов;
  - автоматизация склада. Особенно актуальный фактор, характеризующийся уровнем внедрения автоматизированных систем управления складскими процессами, например, WMS (Warehouse Management System), RFID-технологий, роботизированных погрузчиков, автоматических стеллажей и других. Следование технологическим веяниям позволяет повысить точность учёта, снизить трудозатраты, а также увеличить скорость обработки грузов.
2. Экономические факторы, связанные с финансовой стороной проекта, а именно:
- бюджет проекта, который характеризуется величиной финансирования и структурой его распределения между этапами строительства и эксплуатации;
  - сроки окупаемости, то есть время, необходимое для возврата вложенных средств за счёт доходов от эксплуатации склада. Например, долгие сроки окупаемости могут сделать проект менее привлекательным для инвесторов;
  - операционные затраты, под которыми следует понимать расходы на эксплуатацию склада, включая энергопотребление, обслуживание оборудования, зарплату персонала.
3. Организационные факторы, которые связаны с управлением проектом и персоналом и включают следующие категории:
- система управления проектом. Управление начинается с того, насколько качественно выстроена система планирования, координации и контроля за выполнением работ. На данном этапе используются различные методологии управления проектами (например, Agile, Waterfall), которые позволяют снизить риски срыва сроков и превышения бюджета;
  - квалификация персонала;
  - логистика. При реализации проектов особую важность представляет оптимизация процессов доставки, хранения и распределения грузов. В настоящее время основу таких мероприятий составляют система управления транспортом (TMS), а также решения, направленные на оптимизацию маршрутов.
4. Внешние факторы, связанные с внешней средой, в которой реализуется проект, включают:
- рыночные условия. При определении целесообразности строительства анализируются рынок недвижимости и потребности потенциальных клиентов, учитываются спрос на складские площади, уровень конкуренции и арендные ставки;
  - регуляторная среда. В условиях динамичной среды, в том числе нормативно-правовой, компании уделяют особое внимание законодательным требованиям, разрешительной документации и экологическим нормам;
  - географическое расположение.
5. Экологические и социальные факторы. Факторы, на которое заинтересованные стороны стали обращать повышенное внимание, связаны с устойчивостью проекта и его влиянием на общество. В частности, потребителей и иных субъектов общественных отношений заботят следующие нюансы:
- энергоэффективность. Речь идёт о том, насколько предприятие активно используют энергосберегающие технологии для снижения потребления ресурсов, это, например, солнечные панели, LED-освещение и системы рекуперации тепла;
  - экологическая безопасность. Минимизация воздействия на окружающую среду (выбросы, отходы, шум) становится не только модным трендом, но и нормативной обязанностью любого предприятия, в том числе того, что занимается строительством объектов складской инфраструктуры, такие как модульность комплекса, степень роботизированности операций и другие. Методика расчёта такого показателя включает ряд этапов:

Группа факторов	Конкретный фактор	Параметры оценки	Вес
Технологические	Технологичность строительства	Информационное моделирование зданий (BIM-моделирование) (2) Модульные конструкции (2) Мониторинг стройки (2) Энергоэффективные материалы (2)	0,25
	Автоматизация склада	Система управления складом (WMS) (3) Автоматическая идентификация объектов (RFID) / компьютерное зрение (2) Роботизированные операции (3) Интеграция с системой автоматизации бизнес-процессов (ERP) (2)	0,2
Организационные	Управление проектом	Календарный план (2) Контроль бюджета (2) Частота отчётности (2) Платформы управления проектами (2) Risk-менеджмент (2)	0,15
	Квалификация команды	Сертификаты персонала (3) Опыт работы с автоматизированными складами (4) Программа обучения (3)	0,1

**Табл. 1. Распределение весов каждого из факторов в структуре мультиликатора для оценки эффективности проекта**  
**Tab. 1. Distribution of weights of each factor in the multiplier structure to assess project efficiency**

нении групп и их составляющих, может использоваться для оценки проектов строительства не только складской инфраструктуры. Впрочем, в случае рассматриваемого примера учитываются нюансы, в значительной степени характерные для современных тенденций строительства складской инфраструктуры, такие как модульность комплекса, степень роботизированности операций и другие. Методика расчёта такого показателя включает ряд этапов:

### 1. Определение весов факторов.

Каждому фактору в зависимости от его значимости для проекта присваивается вес. Пример оптимального распределения весов представлен в таблице 1.

В качестве примера можно разобрать проект, обладающий следующими характеристиками (таблица 2).

### 2. Расчёт мультиликатора.

Мультиликатор имеет следующий вид:

$$\text{Мультиликатор} = \sum (\text{вес фактора} \times \text{оценка фактора}).$$

Согласно предложенным выше показателям веса и оценки каждого фактора, расчёт будет иметь следующий вид:

Технологичность строительства:  $0,25 \times (6/8 \times 10)$ .

Автоматизация склада:  $0,20 \times 7$ .

Управление проектом:  $0,20 \times 8$ .

Квалификация команды:  $0,15 \times 6$ .

$$\text{Итоговый мультиликатор} = 1,875 + 1,4 + 1,6 + 0,9 = 5,775/10.$$

### 3. Интерпретация результата.

В случае максимальной оценки каждого фактора значение мультиликатора может быть равно 10. В свою очередь, целевым ориентиром может являться показатель в 7–8 баллов. Так, в вышеописанном примере мультиликатор равен 5,775, то есть результат близок к целевому значению, однако указывает на необходимость улучшения некоторых факторов. В частности, для более эффективной реализации важно обратить внимание на следующие нюансы:

- по линии технологичности строительства заметен недобор баллов за модульность и мониторинг;
- в вопросах автоматизации выделяются низкий уровень роботизации и лишь локальное применение RFID;
- в рамках управления проектом следует перейти к еженедельной отчётности;
- квалификация работников может быть выше, для чего следует ввести регулярное, полноценное обучение.

В рамках данного примера было бы целесообразно рекомендовать следующие шаги:

1. Внедрить полномодульные конструкции (+1 балл и +0,31 к мультиликатору);
2. Расширить RFID на весь склад (+1 балл и +0,20 к итоговому показателю);
3. Ввести еженедельные отчёты (+1 балл и +0,20 к сумме оценок).

Группа факторов	Конкретный фактор	Параметры оценки	Вес
Технологические	Технологичность строительства	Полноценное внедрение BIM (+2) Частичные модульные конструкции (+1) Базовый мониторинг (+1) Акцент на энергоэффективных материалах (+2)	6/8
	Автоматизация склада	Полное WMS (+3) RFID в пилотном режиме (+1) 20 % роботизации (+1) Полная интеграция с ERP (+2)	7/10
Организационные	Управление проектом	Календарный план полный (+2) Контроль бюджета регулярный (+2) Отчётность ежемесячная (+1) Применение Jira (+2) Базовый risk-менеджмент (+1)	8/10
	Квалификация команды	Сертифицированных работников более 50 % (+2) Опыт частичный (+3) Обучение разовыми курсами (+1)	6/10

**Табл. 2. Пример оценки проекта в структуре мультиликатора**  
**Tab. 2. Example of project valuation in the multiplier structure**

В таком случае эффект от точечных улучшений ( $5,775 + 0,31 + 0,20 + 0,20 = 6,485$ ) позволит прибавить 12,3 % к эффективности проекта, благодаря чему уже на этапе строительства и базовой эксплуатации оператор сможет получить конкурентное преимущество перед другими участниками рынка.

## Выводы

Результатом настоящего исследования являются анализ факторов, определяющих эффективность создания объектов складской инфраструктуры, а также методика их оценки, основанная на использовании мультиплексора.

Полученные результаты имеют важное практическое значение: поскольку современный складской комплекс является сложной системой, которая должна соответствовать рыночным условиям и отвечать высоким требованиям функциональности, экономической эффективности и экологичности, использование мультиплексора способствует не только получению качественной оценки влияния каждого отдельного фактора и их совокупности, в том числе для последующего выявления аспектов, которые требуют улучшения. Разработанная методика способна помочь в принятии обоснованных решений по вопросам технологии и организации строительства, оптимизировать ресурсы и минимизировать риски: если мультиплексор демонстрирует низкие оценки, то исполнитель по-

лучает чёткий сигнал о том, что необходимо пересмотреть подходы к технологическому обеспечению или исправить недочёты управленческого характера.

Следует понимать, что успех проекта нельзя сводить к строительству типовой физической инфраструктуры – условия высочайшей конкуренции предполагают создание комплексного решения, которое будет отвечать потребностям рынка, требованиям клиентов и стандартам устойчивого развития. Как следствие, лишь с помощью основательного подхода к реализации проекта, характеризующегося учётом всех факторов и получением синергетического эффекта от их сбалансированного действия, компания-разработчик может достичь долгосрочного успеха проекта.

Таким образом, учёт всех факторов и использование инструментов, таких как мультиплексор, не только повышает шансы на успешную реализацию проекта, но и делает его более конкурентоспособным, соответствующим современным требованиям рынка.

Работа в данном направлении особенно важна в условиях быстро меняющейся экономической и экологической среды, поэтому только гибкие и продуманные решения смогут обеспечить компаниям основу для будущей востребованности и конкурентоспособности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ползунова, Н. Н. Современные инновационные технологии и решения в складской логистике / Н. Н. Ползунова, Д. М. Дроздова, А. Э. К. Гаджиева // Журнал прикладных исследований. – 2021. – Т. 1, № 4. – С. 40–46.
2. Richards, G. Warehouse management: A complete guide to improving efficiency and minimizing costs in the modern warehouse / G. Richards. – 2nd ed. – London : Kogan Page Limited, 2014. – 454 p.
3. Сборщиков, С. Б. Реинжиниринг процессов материально-технического обеспечения как основа формирования логистических центров / С. Б. Сборщиков, Н. В. Лазарева // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 1. – С. 102–115.
4. Azhar, S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry / S. Azhar // Leadership and Management in Engineering. – 2011. – Vol. 11, No. 3. – Pp. 241–252.
5. The future of work in automated warehouse from the perspective of the employees / P. Batys, P. Buła, D. Dziedzic, M. Uznańska // Contemporary organisation and management. Challenges and trends. – 2020. – Pp. 267–281.
6. Муря, В. А. Оптимизация организации процесса возведения конструктивных элементов монолитных зданий на основе комплексного показателя качества организационно-технических решений : дис. ... канд. тех. наук : специальность 05.02.22 «Организация производства (по отраслям)» / Муря Вадим Александрович ; Московский государственный строительный университет. – Москва, 2022. – 192 с. – Библиогр.: с. 168–186.
7. Николаева, Е. В. Логистические центры в российской экономике / Е. В. Николаева, С. А. Банников // Вестник ЧелГУ. – 2021. – № 3 (449). – С. 253–257.
8. Rushton, A. The handbook of logistics / A. Rushton, P. Croucher, P. Baker. – 6th ed. – London : Kogan Page, 2022. – 876 p.
9. Christopher, M. Logistics and supply chain management / M. Christopher. – 5th ed. – London : Pearson, 2016. – 328 p.
10. Бидов, Т. Х. Повышение эффективности системы контроля качества монолитных конструкций неразрушающими методами при организации строительства жилых зданий : дис. ... канд. тех. наук : специальность 05.02.22 «Организация производства (по отраслям)» / Бидов Тембот Хасанбекович ; Ивановский государственный политехнический университет [Ivanovo State Polytechnic University]. – Ivanovo, 2020. – 145 p. – Bibliogr.: pp. 131–140.
11. Топчий, Д. В. Анализ и реализация производственных процессов при строительстве объектов изменяемого назначения : дис. ... докт. тех. наук : специальность 05.02.22 «Организация производства (по отраслям)» / Топчий Дмитрий Владимирович ; Ивановский государственный политехнический университет. – Иваново, 2021. – 375 p. – Bibliogr.: pp. 331–360.
12. Slack, N. Operations management / N. Slack, A. Brandon-Jones, R. Johnston. – 9th ed. – London : Pearson, 2021. – 728 p.
13. Frazelle, E. H. Supply chain strategy / E. H. Frazelle. – New York : McGraw-Hill, 2020. – 320 p.
14. Novakovskiy, A. A. Formirovaniye skladskoj infrastruktury [Formation of warehouse infrastructure] / A. A. Novakovskiy, V. M. Korneev // Nauka bez granits [Science without borders]. – 2021. – No. 4 (56). – Pp. 53–56.
15. Komarov, G. A. Ehkologicheski otvetstvennoe upravlenie skladskimi sistemami [Environmentally responsible management of warehouse systems] / G. A. Komarov, S. V. Pupentsova // Organizator proizvodstva [Production organizer]. – 2021. – Vol. 29, No. 4. – Pp. 177–190.
16. McKinnon, A. Decarbonizing logistics / A. McKinnon. – London : Kogan Page, 2018. – 280 p.
17. Carter, C. R. A Framework of Sustainable Supply Chain Management: Moving Toward New Theory / C. R. Carter, D. S. Rogers // International Journal of Physical Distribution. – 2008. – Vol. 38, No. 5. – Pp. 360–387.
18. Yagolnitzer, M. A. Sinergiya investitsionnykh proektor [Synergy of investment projects] / M. A. Yagolnitzer, M. A. Ovsyannikova, A. V. Kostin // Mir ehkonomiki [The world of economics]. – 2022. – Vol. 22, No. 3. – Pp. 51–65.
19. Kuznetsova, A. S. Metody otseki robotizatsii skladov [Methods for evaluating warehouse robotization] / A. S. Kuznetsova ; edited by S. A. Belozerov. – Moscow, 2022. – 249 p.
20. Waters, D. Global logistics / D. Waters, S. Rinsler. – London : Kogan Page, 2014. – 520 p.
21. Gunasekaran, A. Supply chain resilience: role of complexities and strategies / A. Gunasekaran, N. Subramanian, S. Rahman // International Journal of Production Research. – 2015. – Vol. 53, No. 22. – Pp. 6809–6819.

## REFERENCES

1. Polzunova, N. N. Sovremennye innovatsionnye tekhnologii i resheniya v skladskoj logistike [Modern innovative technologies in warehouse logistics] / N. N. Polzunova, D. M. Dzordzova, A. E. K. Gadzhieva // Zhurnal prikladnykh issledovanij [Journal of Applied Research]. – 2021. – Vol. 1, No. 4. – Pp. 40–46.
2. Richards, G. Warehouse management: A complete guide to improving efficiency and minimizing costs in the modern warehouse / G. Richards. – 2nd ed. – London : Kogan Page Limited, 2014. – 454 p.
3. Sbornshchikov, S. B. Rezhhiniring protsessov material'no-tehnicheskogo obespecheniya kak osnova formirovaniya logisticheskikh tsentrov [Reengineering of material support processes] / S. B. Assemblers, N. V. Lazareva // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. – 2023. – Vol. 18, No. 1. – Pp. 102–115.
4. Azhar, S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry / S. Azhar // Leadership and Management in Engineering. – 2011. – Vol. 11, No. 3. – Pp. 241–252.
5. The future of work in automated warehouse from the perspective of the employees / P. Batys, P. Buła, D. Dziedzic, M. Uznańska // Contemporary organisation and management. Challenges and trends. – 2020. – Pp. 267–281.
6. Murya, V. A. Optimizatsiya organizatsii protsessa vozvedeniya konstruktivnykh ehlementov monolitnykh zdaniy na osnove kompleksnogo pokazatelya kachestva organizatsionno-tehnicheskikh reshenij [Optimization of the organization of the process of erecting structural elements of monolithic buildings based on a comprehensive quality indicator of organizational and technical solutions] : dis. ... kand. tekhn. nauk : spetsial'nost' 05.02.22 «Organizatsiya proizvodstva (po otраслям)» / V. A. Murya Vadim Alexandrovich ; Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet [Moscow State University of Civil Engineering]. – Moscow, 2022. – 192 p. – Bibliogr.: pp. 168–186.
7. Nikolaeva, E. V. Logisticheskie tsentry v rossijskoj ehkonomike [Logistics centers in Russian economy] / E. V. Nikolaeva, S. A. Bannikov // Vestnik Chelyabinskogo universiteta [Bulletin of ChelSU]. – 2021. – No. 3 (449). – Pp. 253–257.
8. Rushton, A. The handbook of logistics / A. Rushton, P. Croucher, P. Baker. – 6th ed. – London : Kogan Page, 2022. – 876 p.
9. Christopher, M. Logistics and supply chain management / M. Christopher. – 5th ed. – London : Pearson, 2016. – 328 p.
10. Bidov, T. H. Povyshenie effektivnosti sistemy kontrolya kachestva monolitnykh konstruktsij nerazrushayushimi metodami pri organizatsii stroitel'stva zhilykh zdaniy [Improving the efficiency of the quality control system of monolithic structures by non-destructive methods in the organization of the construction of residential buildings] : dis. ... kand. tekhn. nauk : spetsial'nost' 05.02.22 «Organizatsiya proizvodstva (po otраслям)» / T. H. Bidov Tembot Khasanbekovich ; Ivanovskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet [Ivanovo State Polytechnic University]. – Ivanovo, 2020. – 145 p. – Bibliogr.: pp. 131–140.
11. Topchij, D. V. Analiz i realizatsiya proizvodstvennykh protsessov pri stroitel'stve ob'ektorov izmenyaemogo naznacheniya [Analysis and implementation of production processes in the construction of objects of variable purpose] : dis. ... dokt. tekhn. nauk : spetsial'nost' 05.02.22 «Organizatsiya proizvodstva (po otраслям)» / Topchij Dmitry Vladimirovich ; Ivanovskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet [Ivanovo State Polytechnic University]. – Ivanovo, 2021. – 375 p. – Bibliogr.: pp. 331–360.
12. Slack, N. Operations management / N. Slack, A. Brandon-Jones, R. Johnston. – 9th ed. – London : Pearson, 2021. – 728 p.
13. Frazelle, E. H. Supply chain strategy / E. H. Frazelle. – New York : McGraw-Hill, 2020. – 320 p.
14. Novakovskiy, A. A. Formirovaniye skladskoj infrastruktury [Formation of warehouse infrastructure] / A. A. Novakovskiy, V. M. Korneev // Nauka bez granits [Science without borders]. – 2021. – No. 4 (56). – Pp. 53–56.
15. Komarov, G. A. Ehkologicheski otvetstvennoe upravlenie skladskimi sistemami [Environmentally responsible management of warehouse systems] / G. A. Komarov, S. V. Pupentsova // Organizator proizvodstva [Production organizer]. – 2021. – Vol. 29, No. 4. – Pp. 177–190.
16. McKinnon, A. Decarbonizing logistics / A. McKinnon. – London : Kogan Page, 2018. – 280 p.
17. Carter, C. R. A Framework of Sustainable Supply Chain Management: Moving Toward New Theory / C. R. Carter, D. S. Rogers // International Journal of Physical Distribution. – 2008. – Vol. 38, No. 5. – Pp. 360–387.
18. Yagolnitzer, M. A. Sinergiya investitsionnykh proektor [Synergy of investment projects] / M. A. Yagolnitzer, M. A. Ovsyannikova, A. V. Kostin // Mir ehkonomiki [The world of economics]. – 2022. – Vol. 22, No. 3. – Pp. 51–65.
19. Kuznetsova, A. S. Metody otseki robotizatsii skladov [Methods for evaluating warehouse robotization] / A. S. Kuznetsova ; edited by S. A. Belozerov. – Moscow, 2022. – 249 p.
20. Waters, D. Global logistics / D. Waters, S. Rinsler. – London : Kogan Page, 2014. – 520 p.
21. Gunasekaran, A. Supply chain resilience: role of complexities and strategies / A. Gunasekaran, N. Subramanian, S. Rahman // International Journal of Production Research. – 2015. – Vol. 53, No. 22. – Pp. 6809–6819.

## УДК 69.05

## Адаптация бережливого строительства для проектов высотного строительства в России

Adaptation of Lean Construction for High-Rise Projects in Russia

### Огидан Оламипе Тимоти

Преподаватель кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, ogidano@gmail.com

### Ogidan Olamipe Timothy

Lecturer of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, ogidano@gmail.com

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_45

otraslyam» [dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : specialty 05.02.22 "Organization of production (by industry)"] / Bidov Tembot Khasanbeyev ; Ivanovskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet [Ivanovo State Polytechnic University]. – Ivanovo, 2020. – 145 p. – Bibliogr.: pp. 131–140.

11. Topchij, D. V. Analiz i realizatsiya proizvodstvennykh protsessov pri stroitel'stve ob'ektorov izmenyaemogo naznacheniya [Analysis and implementation of production processes in the construction of objects of variable purpose] : dis. ... dokt. tekhn. nauk : spetsial'nost' 05.02.22 «Organizatsiya proizvodstva (by industry)» / Topchij Dmitry Vladimirovich ; Ivanovskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet [Ivanovo State Polytechnic University]. – Ivanovo, 2021. – 375 p. – Bibliogr.: pp. 331–360.

12. Slack, N. Operations management / N. Slack, A. Brandon-Jones, R. Johnston. – 9th ed. – London : Pearson, 2021. – 728 p.

13. Frazelle, E. H. Supply chain strategy / E. H. Frazelle. – New York : McGraw-Hill, 2020. – 320 p.

14. Novakovskiy, A. A. Formirovaniye skladskoj infrastruktury [Formation of warehouse infrastructure] / A. A. Novakovskiy, V. M. Korneev // Nauka bez granits [Science without borders]. – 2021. – No. 4 (56). – Pp. 53–56.

15. Komarov, G. A. Ehkologicheski otvetstvennoe upravlenie skladskimi sistemami [Environmentally responsible management of warehouse systems] / G. A. Komarov, S. V. Pupentsova // Organizator proizvodstva [Production organizer]. – 2021. – Vol. 29, No. 4. – Pp. 177–190.

16. McKinnon, A. Decarbonizing logistics / A. McKinnon. – London : Kogan Page, 2018. – 280 p.

17. Carter, C. R. A Framework of Sustainable Supply Chain Management: Moving Toward New Theory / C. R. Carter, D. S. Rogers // International Journal of Physical Distribution. – 2008. – Vol. 38, No. 5. – Pp. 360–387.

18. Yagolnitzer, M. A. Sinergiya investitsionnykh proektor [Synergy of investment projects] / M. A. Yagolnitzer, M. A. Ovsyannikova, A. V. Kostin // Mir ehkonomiki [The world of economics]. – 2022. – Vol. 22, No. 3. – Pp. 51–65.

19. Kuznetsova, A. S. Metody otseki robotizatsii skladov [Methods for evaluating warehouse robotization] / A. S. Kuznetsova ; edited by S. A. Belozerov. – Moscow, 2022. – 249 p.

20. Waters, D. Global logistics / D. Waters, S. Rinsler. – London : Kogan Page, 2014. – 520 p.

21. Gunasekaran, A. Supply chain resilience: role of complexities and strategies / A. Gunasekaran, N. Subramanian, S. Rahman // International Journal of Production Research. – 2015. – Vol. 53, No. 22. – Pp. 6809–6819.

**Аннотация.** Современные условия реализации строительных проектов, особенно в сегменте высотных зданий, требуют не только соблюдения нормативных требований, но и поиска новых организационных решений, направленных на повышение эффективности процессов. В связи с этим особую актуальность приобретает внедрение бережливых методов управления строительством, основанных на минимизации потерь и повышении ценности создаваемого продукта.

В данной статье рассматривается возможность применения и локализации инструментов бережливого строительства в российской практике на примере высотных объектов. Анализируются такие методики, как система последнего планировщика (Last Planner System), Just-in-Time и картирование потока создания ценности (Value Stream Mapping), с учётом специфики организационно-технологических условий российских строительных площадок.

Методологической основой исследования является сравни-

**Abstract.** The dynamic conditions of modern construction, particularly in the high-rise building sector, demand not only compliance with regulatory standards but also the pursuit of new organizational solutions aimed at improving operational efficiency. In this context, the application of lean construction methods – which emphasize waste minimization and value generation – becomes increasingly relevant.

This article investigates the feasibility of implementing and localizing lean construction tools within Russian practice, specifically in high-rise building projects. Techniques such as the Last Planner System (LPS), Just-in-Time (JIT), and Value Stream Mapping (VSM) are examined in relation to the organizational and technological characteristics of Russian construction sites. The research is based on a comparative analysis of key performance

## Введение

Современное высотное строительство предъявляет всё более высокие требования к организации строительных процессов. Увеличение плотности застройки в крупных городах, ужесточение нормативных требований, рост стоимости строительных ресурсов и потребность в ускоренном вводе объектов в эксплуатацию обостряют необходимость пересмотра традиционных подходов к управлению проектами. В этих условиях ключевыми факторами успешной реализации строительства становятся соблюдение сроков и бюджетов, рациональное использование ресурсов и повышение производительности труда [1].

Бережливое строительство (англ. lean construction) представляет собой инновационный подход к организации строительного производства, ориентированный на минимизацию потерь, улучшение потоков работ и повышение ценности для всех участников проекта. Принципы бережливого производства были адаптированы для строительной отрасли в конце XX века и с тех пор активно развиваются. К числу наиболее известных инструментов бережливого строительства относится система последнего планировщика (англ. Last Planner System, LPS), доставка точно вовремя (англ. Just-in-Time, JIT), картирование потока создания ценности (англ. Value Stream Mapping, VSM), визуальное управление и стандартизация операций.

Международная практика подтверждает эффективность применения бережливых технологий, особенно на крупных и сложных строительных объектах. Однако их внедрение в российских условиях сталкивается с рядом специфических вызовов. К ним можно отнести: климатические ограничения, многоуровневую систему управления проектами, специфику трудовых ресурсов, уст-

ольный анализ показателей результативности внедрения lean-подходов на объектах в России, Латинской Америке и странах Африки к югу от Сахары. Уделено внимание роли климатических, кадровых и логистических факторов при адаптации методов.

Научная новизна работы заключается в обосновании подходов к локализации бережливых технологий в контексте высотного строительства. Полученные результаты могут быть использованы в качестве основы для формирования стратегий цифровизации и повышения производительности в строительстве. Материалы статьи представляют интерес для научного и инженерного сообщества, а также для специалистов, занимающихся управлением строительными проектами.

**Ключевые слова:** бережливое строительство; высотные здания; управление проектами; сроки строительства; оптимизация затрат; производительность труда; Last Planner System; локализация методов; цифровизация строительства; JIT.

indicators in lean-driven projects across Russia, Latin America, and Sub-Saharan Africa. Special attention is given to how climatic, workforce, and logistical factors affect the localization process.

The scientific novelty of the work lies in identifying effective approaches for adapting lean strategies to Russian high-rise construction. The findings may contribute to the development of digitalization strategies and productivity enhancements in the construction sector. The article is of interest to the academic and engineering communities, as well as to professionals involved in construction project management.

**Keywords:** lean construction; high-rise buildings; project management; construction timelines; cost optimization; labor productivity; Last Planner System; method localization; construction digitization; Just-in-Time.

явшиеся производственные процессы и низкий уровень цифровизации [2]. Именно поэтому важнейшим направлением развития является адаптация (локализация) бережливых методов с учётом отечественной строительной практики [3].

Особую актуальность данная тема приобретает применительно к высотному строительству, которое характеризуется высокой степенью технической и организационной сложности. Здесь особенно остро проявляются проблемы координации работ, логистики, взаимодействия между подрядными организациями и соблюдения сроков. Применение бережливых технологий в таком контексте может стать эффективным инструментом для оптимизации процессов, снижения затрат и повышения качества.

Настоящее исследование направлено на анализ возможностей применения и адаптации бережливых методов управления строительством к условиям проектов высотного строительства в России. Основное внимание уделяется выявлению факторов, влияющих на эффективность таких подходов, и формированию предложений по их практическому использованию на строительных площадках.

Понятие бережливого строительства возникло на стыке производственного инжиниринга и строительного менеджмента в 1990-х годах в попытке адаптировать принципы бережливого производства Toyota к условиям строительной отрасли. Основное внимание в таких подходах уделяется созданию непрерывного потока работ, исключению потерь (временных, материальных, трудовых), снижению неопределенности и увеличению ценности конечного продукта для заказчика [4].

К числу основных инструментов бережливого строительства относится система последнего планировщика

(LPS), обеспечивающая повышение точности и надёжности оперативного планирования; принцип поставок точно в срок (JIT), направленный на исключение избыточных запасов на строительной площадке; а также картографирование потока создания ценности (VSM), которое позволяет проводить визуальный анализ всех стадий строительного процесса с целью исключения операций, не создающих ценности.

В предыдущих работах [5–7] подчёркивалось положительное влияние бережливых подходов на ключевые показатели проектов: сокращение сроков, рост производительности труда и снижение затрат. Тем не менее, эти подходы разрабатывались преимущественно в условиях развитых рынков, где высокая степень стандартизации, автоматизации и зрелости строительной культуры способствует их успешному внедрению.

Исследования в странах Латинской Америки [8] и Африки к югу от Сахары [9–10] указывают на необходимость адаптации методов бережливого строительства под местные условия. В этих регионах успешное применение бережливых практик стало возможным лишь после учёта культурных, логистических и организационных факторов [11]. Например, в Чили успешная реализация LPS сопровождалась дополнительным обучением персонала и адаптацией инструментария к специфике локального управления. В Гане и ЮАР внимание уделялось не только инструментам, но и способам повышения мотивации рабочих через вовлечение их в планирование.

Российская научная литература также обращается к теме бережливого строительства, особенно в контексте высотного и промышленного строительства. Так, авторы [12] подчёркивают необходимость гибкой интеграции бережливых инструментов в российской строительной системе, особенно в условиях сезонных климатических колебаний и многоступенчатой системы субподряда. Авторы [13–14] отмечают, что сочетание методов бережливого строительства с BIM-моделированием позволяет оптимизировать логистику, улучшить контроль сроков и снизить объёмы строительного мусора. Однако они подчёркивают, что без подготовки персонала и пересмотра организационной структуры внедрение новых подходов может привести к обратному эффекту [15].

Таким образом, современная научная и прикладная литература подчёркивает, что эффективность бережливого строительства напрямую зависит от уровня локализации методов, глубины анализа контекста проекта и наличия подготовленных команд на местах. Особенно это актуально для высотного строительства, где ошибки в логистике и планировании могут приводить к каскадным сбоям и значительным убыткам.

## Материалы и методы

Методологической основой настоящего исследования является сравнительный анализ реализованных проектов

высотного строительства в различных географических условиях, в которых применялись бережливые методы управления. Рассмотрены три региона: Россия, Латинская Америка и страны Африки к югу от Сахары. Отбор проектов производился по следующим критериям:

- объект относится к категории высотного строительства ( $\geq 12$  этажей);
- в рамках реализации применялись элементы бережливых технологий (LPS, JIT, VSM и др.);
- доступны данные о результатах внедрения бережливых подходов (сроки, затраты, производительность, уровень отходов);
- присутствует описание или зафиксирован факт адаптации методов под местные условия (язык, климат, логистика, кадровый состав).

Для количественной оценки результатов внедрения использовались следующие ключевые показатели:

- Индекс выполнения графика (SPI):

$$SP = \frac{EV}{PV}, \quad (1)$$

где  $EV$  – заработанная стоимость,  $PV$  – плановая стоимость.  $SP > 1$  означает опережение графика.

- Индекс затрат (CPI):

$$CPI = \frac{EV}{AC}, \quad (2)$$

где  $AC$  – фактические затраты.  $CPI > 1$  означает выполнение работ с экономией бюджета.

- Уровень снижения отходов (WRR, %):

$$WRR = \frac{W_{\text{до}} - W_{\text{после}}}{W_{\text{до}}} * 100, \quad (3)$$

где  $W_{\text{до}}$  и  $W_{\text{после}}$  – объём строительных отходов до и после внедрения.

- Рост производительности труда (PIR, %):

$$PIR = \frac{P_{\text{до}} - P_{\text{после}}}{P_{\text{до}}} * 100, \quad (4)$$

где  $P_{\text{до}}$  и  $P_{\text{после}}$  – объём выполненных работ на одного рабочего в день до и после внедрения.

Для сопоставления эффективности внедрения бережливых методов в разных регионах использовались показатели SPI, CPI, уровень снижения отходов и прирост производительности труда, приведённые в таблице 1 ниже.

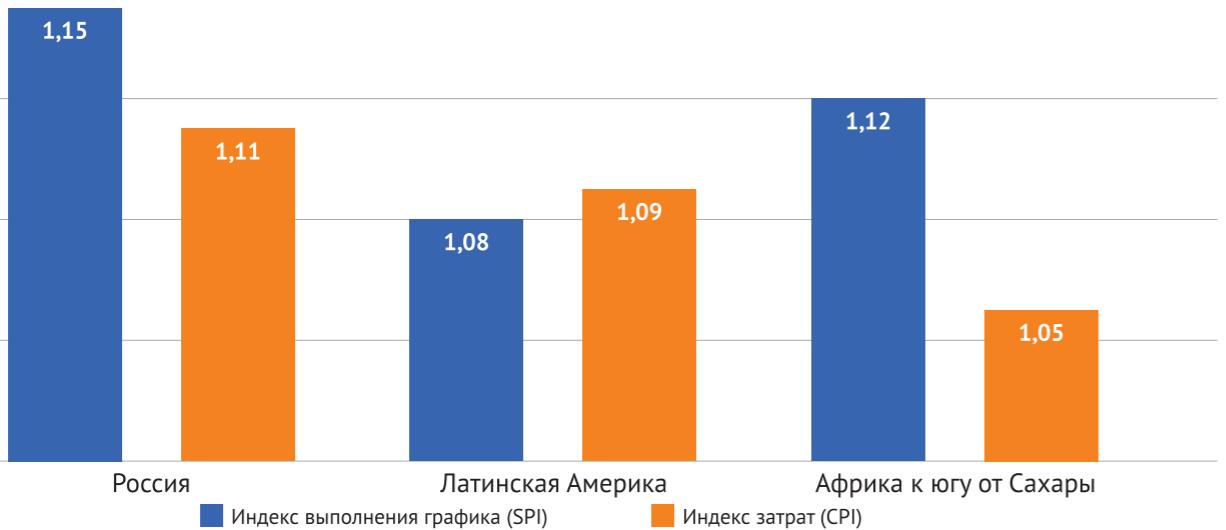
## Результаты

Анализ внедрения локализованных бережливых методов на объектах высотного строительства в России, Латинской Америке и странах Африки к югу от Сахары позволил выявить общие закономерности и региональные особенности влияния на сроки реализации, затраты, объёмы отходов и производительность труда.

Регион / Region	Индекс SPI / SPI Index	Индекс CPI / CPI Index	Снижение отходов (%) / Waste Reduction (%)	Рост производительности (%) / Productivity Increase (%)
Россия / Russia	1,15	1,11	24,1	20,2
Латинская Америка / Latin America	1,08	1,09	19,7	15,6
Африка к югу от Сахары / Sub-Saharan Africa	1,12	1,05	22,5	18,3

*Примечание. Показатели рассчитаны на основании анализа выполненных высотных проектов с применением локализованных бережливых методов.*  
*Note. Indicators are based on the analysis of high-rise construction projects using localized lean methods.*

Табл. 1. Сравнительные показатели эффективности внедрения бережливых методов  
 Tab. 1. Comparative Performance Indicators of Lean Methods Implementation



**Рис. 1. Сравнительный анализ индексов выполнения графика (SPI) и освоения затрат (CPI)**  
**Fig. 1. Comparative Analysis of Schedule Performance Index (SPI) and Cost Performance Index (CPI)**

Величины индексов SPI во всех трёх регионах превышают единицу, что свидетельствует о завершении проектов с опережением первоначально запланированных сроков. Наибольшее значение SPI отмечено в российских проектах (1,15), что связано с успешной интеграцией цифровых инструментов управления работами и адаптацией системы последнего планировщика к местным условиям. Показатель SPI в Африке к югу от Сахары составил 1,12, что подтверждает эффективность упрощённых подходов к оперативному планированию с учётом специфики локальных трудовых ресурсов. В Латинской Америке данный индекс составил 1,08.

Анализ индекса затрат (CPI) показал, что применение бережливых методов также способствовало экономии средств. Наиболее высокое значение CPI зафиксировано в России (1,11), что отражает эффективное использование принципов Just-in-Time в условиях ограниченных складских площадок и сложной логистики на строительных площадках мегаполисов. В Латинской Америке индекс CPI составил 1,09, в то время как в Африке к югу от Сахары он оказался несколько ниже – 1,05.

Показатели снижения строительных отходов оказались наиболее высокими в российских проектах (24,1 %), где активно применялись методы картографирования потока создания ценности и оптимизации логистических маршрутов. В странах Африки к югу от Сахары снижение отходов составило 22,5 %, а в Латинской Америке – 19,7 %. Такой результат свидетельствует о высокой чувствительности процессов управления материалами к уровню их локализации.

Повышение производительности труда также демонстрирует положительную динамику при использовании адаптированных бережливых технологий. Наибольший прирост зафиксирован в России (20,2 %), что связано с активной цифровизацией процессов контроля, использованием визуального управления и внедрением стандартных процедур выполнения работ. В Африке и Латинской Америке показатели роста составили соответственно 18,3 % и 15,6 %.

Таким образом, результаты анализа подтверждают гипотезу о том, что применение бережливых методов в строительстве высотных зданий позволяет значительно

оптимизировать сроки и затраты при условии адаптации этих методов к локальным условиям проекта. Успешная локализация инструментов бережливого строительства требует учёта следующих факторов:

- уровня квалификации рабочих кадров;
- состояния инфраструктуры и логистики;
- климатических особенностей строительной площадки;
- организационной структуры управления проектом.

Реализация этих условий обеспечивает высокую эффективность бережливых технологий на практике.

### Заключение

Результаты проведённого исследования подтвердили, что внедрение бережливых методов управления строительством способствует значительной оптимизации сроков выполнения и затрат в проектах высотного строительства. Однако эффективность таких методов напрямую зависит от их адаптации к конкретным условиям реализации проекта, включая особенности организационной структуры, квалификацию персонала, климатические факторы и уровень развития логистической инфраструктуры.

На примере проектов, реализованных в России, Латинской Америке и странах Африки к югу от Сахары, было установлено, что локализация инструментов бережливого строительства позволяет добиться опережения графиков выполнения работ, снизить фактические затраты по сравнению с плановыми, а также существенно сократить количество строительных отходов и повысить производительность труда. Особенно высокий эффект отмечен в проектах, где внедрение бережливых технологий сопровождалось цифровизацией процессов планирования и оперативного контроля.

Практическая ценность проведённого анализа заключается в формулировании рекомендаций по адаптации бережливых методов для повышения эффективности реализации высотных проектов в российских условиях. Для успешного внедрения бережливого строительства целесообразно:

- проводить обучение рабочих и инженерно-технического персонала специфике бережливых технологий;

- интегрировать цифровые инструменты управления проектами (BIM, мобильные приложения контроля выполнения работ);
- учитывать сезонные климатические риски при разработке графиков и логистических планов;
- адаптировать методы планирования поставок материалов под особенности локальных поставщиков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огидан, О. Т. Индексная система для формирования комплексного показателя качества высотных зданий в Африке / О. Т. Огидан, А. М. Кардава // Строительное производство. – 2023. – № 3. – С. 19–23.
2. Маилян, Л. Д. Концепция создания цифровой информационной системы управления инвестиционными проектами строительства объектов промышленного назначения / Л. Д. Маилян, Л. Б. Зеленцов, Д. В. Пирко, Д. В. Свitenko, К. В. Тузлуков // Строительное производство. – 2023. – № 4. – С. 117–122.
3. Sidawi, B. The Use of Advanced Computer Based Management Systems by Large Saudi Companies for Managing Remote Construction Projects / B. Sidawi, A. A. Al-Sudairi. – DOI 10.1016/j.proeng.2014.07.013 // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 77. – Pp. 161–169.
4. Кулаков, К. Ю. Цепочки создания ценности в строительстве на основе концепции бережливого производства в условиях цифровой трансформации / К. Ю. Кулаков, А. К. Орлов, В. С. Канхва // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 10. – С. 1647–1660.
5. Ballard, G. Lean project management / G. Ballard, G. Howell // Building Research & Information. – 2003. – Vol. 31. – No. 2. – Pp. 94–100.
6. Koskela, L. An exploration towards a production theory and its application to construction : dis. ... doct. Philosophy / Koskela Lauri J.; Tallinn University of Technology. – 2000. – 296 p.
7. Site implementation and assessment of lean construction techniques / O. Salem, J. Solomon, A. Genaidy, M. Luebring // Lean Construction Journal. – 2005. – No. 2. – Pp. 1–21.
8. Assessing the impact of implementing lean construction / L. F. Alarcón, S. Diethelm, O. Rojo, R. Calderón // Revista Ingeniería de Construcción. – 2005. – Vol. 23, No. 1. – Pp. 125–137.
9. Allu-Kangkum, E. L. A. Emuze, F. Advancing Lean Implementation for Improving Sustainability in Sub-Saharan Africa: A Literature Review / E. L. A. Allu-Kangkum, F. Emuze. – DOI 10.1089/sus.2018.0003 // Sustainability: The Journal of Record. – 2018. – Vol. 11, No. 3. – Pp. 127–135.
10. Towards a net-zero carbon economy: A sustainability performance assessment of innovative prefabricated construction methods for affordable housing in Southern Africa / A. Moghayed, B. Awuzie. – DOI 10.1016/j.scs.2023.104907 // Sustainable Cities and Society. – 2023. – Vol. 99. – Art. 104907.
11. Лапидус, А. А. Повышение эффективности организационно-технических решений в условиях повышенного риска / А. А. Лапидус, О. Т. Огидан // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – № 6 (84). – С. 68–73.
12. Смирнов, С. А. Применение бережливого производства в российских компаниях / С. А. Смирнов, Г. С. Сорокин // Евразийская интеграция: экономика, право, политика. – 2022. – № 4 (42). – С. 55–67.
13. Козлов, Р. Н. Интеграция бережливого производства и BIM-технологий как основа эффективного проектного управления и организации производственных процессов на этапе строительства / Р. Н. Козлов, А. В. Пешков // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2023. – № 2 (45). – С. 271–284.
14. Коротеев, Д. Д. Перспективы внедрения принципов бережливого строительства / Д. Д. Коротеев, А. О. Васютин, А. А. Ким // Инженерный Вестник Дона. – 2024. – № 4.
15. Automated vision-based construction progress monitoring in built environment through digital twin / A. Pal, J. J. Lin, Sh.-H. Hsieh, M. Golparvar-Fard. – DOI 10.1016/j.dibe.2023.100247 // Developments in the Built Environment. – 2023. – Vol. 16. – Art. 100247.

Vestnik MGSU [Bulletin of Moscow State University]. – 2023. – No. 10. – Pp. 1647–1660.

5. Ballard, G. Lean project management / G. Ballard, G. Howell // Building Research & Information. – 2003. – Vol. 31. – No. 2. – Pp. 94–100.

6. Koskela, L. An exploration towards a production theory and its application to construction : dis. ... doct. Philosophy / Koskela Lauri J.; Tallinn University of Technology. – 2000. – 296 p.

7. Site implementation and assessment of lean construction techniques / O. Salem, J. Solomon, A. Genaidy, M. Luebring // Lean Construction Journal. – 2005. – No. 2. – Pp. 1–21.

8. Assessing the impact of implementing lean construction / L. F. Alarcón, S. Diethelm, O. Rojo, R. Calderón // Revista Ingeniería de Construcción. – 2005. – Vol. 23, No. 1. – Pp. 125–137.

9. Allu-Kangkum, E. L. A. Emuze, F. Advancing Lean Implementation for Improving Sustainability in Sub-Saharan Africa: A Literature Review / E. L. A. Allu-Kangkum, F. Emuze. – DOI 10.1089/sus.2018.0003 // Sustainability: The Journal of Record. – 2018. – Vol. 11, No. 3. – Pp. 127–135.

10. Towards a net-zero carbon economy: A sustainability performance assessment of innovative prefabricated construction methods for affordable housing in Southern Africa / A. Moghayed, B. Awuzie. – DOI 10.1016/j.scs.2023.104907 // Sustainable Cities and Society. – 2023. – Vol. 99. – Art. 104907.

11. Lapidus, A. A. Povysenie effektivnosti organizatsionno-tehnicheskikh reshenij v usloviyah povyshennogo riska / A. A. Lapidus, O. T. Ogidjan // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – № 6 (84). – С. 68–73.

- nicheskikh reshenij v usloviyakh povyshennogo riska [Improving the efficiency of organizational and technical solutions under increased risk conditions] // Components of Scientific and Technological Progress [Components of Scientific and Technological Progress]. – 2023. – No. 6. – Pp. 68–73.
12. Smirnov, S. A. Primenenie berezhlivogo proizvodstva v rossiskikh kompaniyakh [Application of lean production in Russian companies] / S. A. Smirnov, G. S. Sorokin // Evrazijskaya integratsiya: ekonomika, pravo, politika [Eurasian integration: Economics, Law, Politics]. – 2022. – No. 4 (42). – Pp. 55–67.
13. Kozlov, R. N. Integratsiya berezhlivogo proizvodstva i BIM-tehnologij kak osnova effektivnogo proektnogo upravleniya i organizatsii proizvodstvennykh protsessov na etape stroitel'stva [Integration of lean manufacturing and BIM technologies as the basis for effective project management

УДК 658.2:692

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_50

## Научные подходы к выбору монтажной блочности здания реактора АЭС с ВВЭР

Scientific Approaches to Selecting the Assembly Block Configuration for VVER NPP Reactor Buildings

**Морозенко Андрей Александрович**

Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство объектов тепловой и атомной энергетики», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, morozenkoaa@mgsu.ru

**Morozenko Andrey Aleksandrovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Energy Facilities, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, morozenkoaa@mgsu.ru

**Баукин Андрей Владимирович**

Аспирант кафедры «Строительство объектов тепловой и атомной энергетики», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, a\_baukin@mail.ru

**Baukin Andrey Vladimirovich**

Graduate student of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Energy Facilities, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, a\_baukin@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрено текущее положение дел в атомной отрасли в вопросе выбора монтажной блочности строительных конструкций здания реактора АЭС с реакторной установкой ВВЭР. Приводятся позитивные аспекты применения индустриальных методов строительства: сокращение продолжительности строительства, возможность выполнения параллельных процессов, повышение качества и др. Также отмечаются и создающие сложности моменты: повышенные требования к инфраструктуре, необходимость в строительных кадрах более высокой квалификации, повышенные требования к основному монтажному крану и др.

Отмечается необходимость исследования других технологических и организационных факторов, влияющих на выбор монтажной блочности на предпроектном и проектном этапах жизненного цикла. Отмечается отсутствие методик для выбо-

**Abstract.** The article considers the current situation in the nuclear industry in the issue of selecting the assembly block type of building structures for the reactor building of NPPs with a WWER reactor plant. Positive aspects of using industrial construction methods are given: reduced construction time, the possibility of performing parallel processes, improved quality, etc. Also, aspects that create difficulties are noted: increased requirements for infrastructure, the need for construction personnel with higher qualifications, increased requirements for the main assembly crane, etc.

The need to study other technological and organizational factors that affect the selection of assembly block type at the pre-

design and design stages of the life cycle is noted. The absence of methods for selecting assembly block type, as well as the lack of coordination and general motivation of the project implementation participants in the issue under consideration are noted. Using the example of implemented domestic and foreign NPPs (nuclear power plants), a tendency towards a decrease in construction time with an increase in the average weight of reinforcement and formwork blocks is demonstrated. It is proposed to develop a methodology that establishes, using a mathematical model, the relationship between the mass and size characteristics of blocks and the duration of construction for the justified adoption of or-

ganizational and technical decisions on the choice of assembly block structure.

**Keywords:** assembly block type; industrial construction meth-

### Введение

Индустриальные методы строительства характеризуются монтажной блочностью. Монтажная блочность – это степень укрупнения конструкций в блоки, которую можно представить отношением общей массы сборных элементов к их количеству, таким образом, оценивая среднюю массу укрупнённых элементов. Следовательно, одной из характеристик монтажной блочности являются усреднённые массогабаритные показатели арматурно-опалубочных блоков (средняя масса блоков), из которых собирается рассматриваемая конструктивная часть здания или здание в целом. Средняя масса блоков определяется расчётыным образом после разбивки рассматриваемых конструкций на блоки и вычисляется исходя из массовых характеристик составных частей и элементов, используемых при производстве блоков.

Применение индустриальных методов строительства и крупноблочного монтажа вместо штучного армирования приводит к снижению трудозатрат на строительной площадке, что было продемонстрировано в ряде научных работ [1; 2; 3]. Существует зависимость между размерами арматурно-опалубочных блоков и сроками строительства: чем больше размеры арматурно-опалубочных блоков, тем меньше трудозатрат при их монтаже, следовательно, меньше сроки строительства.

Однако при значительном укрупнении появляется ряд проблем, требующих внимания как с точки зрения технологических, так и организационных процессов, также варьируются требования к строительной инфраструктуре и подъёмно-транспортным механизмам. По сравнению с штучным армированием происходит перенос значительного объёма работ по монтажу арматуры, закладных деталей, технологических проходов и опалубки в заводские условия.

В своей статье Шашков А. А. указывает, что использование конструкций высокой степени заводской готовности позволит воспользоваться преимуществами конвейерного производства, такими как высокая степень контроля качества продукции, применение высокоточного оборудования, возможность организации параллельных процессов, снижение себестоимости единицы изделия за счёт повторяемости процессов и т. п. [4]. Вместе с тем в научной работе Шашкова А. А. обозначается необходимость высокой квалификации рабочих на заводских производствах, выше 5-6 разряда, что является проблемой [3]. Вопросы квалификации строительного персонала и укомплектованности ими объектов строительства АЭС также поднимает в своей научной работе Швец Н. С. и показывает, что это является фактором, влияющим на результаты производственной деятельности строительного предприятия [5]. Таким образом, применение индустриальных методов строительства обуславливает количественное и качественное перераспределение трудовых ресурсов между стройплощадкой и цехом по производству и укрупнению арматурно-опалубочных блоков, что может быть фактором, влияющим на выбор монтажной блочности.

Научные проработки, рассматривающие вопросы повышения эффективности строительства реакторных зда-

ний АЭС, уже проводились в отечественной практике, так, схожими вопросами в своих научных работах занимались Бернхт А., Темишин Р. Р., Шашков А. А. [1; 2; 3].

Диссертация Бернхта А. посвящена оптимизации разбивки на блоки конструкций реакторного отделения АЭС с реакторной установкой ВВЭР-1000. Исследование включает анализ существующих решений, математическое моделирование оптимальных размеров и расположения блоков, а также технико-экономическое обоснование предложенных вариантов. Работа посвящена обоснованию экономической эффективности и позволяет добиться снижения трудозатрат при применении крупноблочной технологии строительства.

В работе Темишина Р. Р. отмечается, что выявить оптимальную организационно-технологическую схему строительства, опираясь на традиционные методы определения трудозатрат, невозможно вследствие очень большого количества возможных вариантов, трудоёмкости калькулирования, а также недостатка исходных данных. Особенность это актуально на предпроектном и проектном этапах.

Цель исследования – разработка методов оптимизации выбора способов монтажа главных корпусов АЭС с ВВЭР-1000 на основе экономических критериев при неполной информации. Автор анализирует трудозатраты на монтаж арматурных блоков, разрабатывает методы расчёта удельных показателей и алгоритмы оценки трудоёмкости. Выводы подчёркивают критичность трудозатрат для оценки экономической эффективности строительства АЭС. Предложенный метод позволяет производить оценку трудозатрат на ранних стадиях без необходимости вариантов проектирования.

В диссертации Шашкова А. А. разработан метод определения трудозатрат для проекта АЭС-2006 с учётом крупноблочного метода и степени укрупнения армоблоков, включающий анализ граничных условий проекта. Предложена методика формирования организационной структуры, адаптируемая к выбранной технологии и требованиям проекта. Ключевым элементом является сведение трудозатрат к единому показателю (человеко-часы/куб. м), обеспечивающему стандартизацию оценки и адаптацию организационной структуры к изменяющимся условиям.

Таким образом, предложенные методы и подходы направлены на оптимизацию процессов планирования и управления трудозатратами при строительстве АЭС, что в итоге способствует повышению эффективности.

Базируясь на выводах этих научных работ, приходим к выводу, что величина трудозатрат зависит от монтажной блочности, или степени укрупнения, и влияет на ход строительства, являясь важным фактором эффективности проекта. Также отмечаем значимость выбора организационной структуры, соответствующей выбранной технологии строительства. Однако в этих работах отсутствует оптимизация технологии, степени укрупнения и организационной структуры по критерию времени (с приведением математических зависимостей), другими словами, по продолжительности строительства.

С развитием технологий возведения и расширением масштабов проектов в мировой практике наблюдается

тенденция к использованию более крупных блоков. Это требует соответствующего подхода при выборе технологии монтажа и подъёмно-транспортного оборудования.

#### Материалы и методы

На текущий момент в российской атомной отрасли на предпроектном и проектных этапах решения по выбору монтажной блочности строительных конструкций принимаются без применения какой-либо методики. На этапе проектирования и строительства выбор осуществляется исходя из субъективных подходов, конъюнктуры в российской атомной отрасли и за рубежом, а также исходя из наличия основного монтажного крана и его характеристик. Кроме того, отсутствует согласованность и координация участников проектирования и строительства [6], а также единая мотивация для всех участников строительного процесса, направленная на сокращение сроков строительства.

В отечественной практике обычно учитываются средняя масса и максимальная масса как характеристики массогабаритных показателей арматурно-опалубочных блоков, обусловленные доступностью основного крана для их монтажа. При этом максимальная грузоподъёмность используется для единичных подъёмов и касается в основном монтажа оборудования: ловушки расплава, парогенераторов, корпуса реактора. При монтаже строительных конструкций максимальная грузоподъёмность используется при установке фрагментов купола защитных оболочек. Разрезка на блоки осуществляется таким образом, чтобы их конфигурация была приближена к прямой линии, что позволяет сократить или исключить необходимость использования дополнительных металлических конструкций для обеспечения пространственной жёсткости блоков. По той же причине объединение блоков в объёмные фрагменты не применяется.

В рамках проводимого исследования предполагается выработка подходов по выбору монтажной блочности, которые позволяют, используя математическую модель, увязать технологические решения и продолжительность строительства. Таким образом, принятие организационно-технологических решений на предпроектном и проектном этапах будет обосновано в контексте возможного сокращения продолжительности строительства. При этом одной из задач является расчёт трудозатрат с привязкой к квалификации рабочих в цеху и на строительной площадке, с последующим приведением к единице строительной продукции в зависимости от различной степени укрупнения.

Методика должна учитывать максимально возможное количество факторов, что позволит принимать обоснованные решения и избежать ряда проблем, связанных с чрезмерным укрупнением. Первоочередной задачей является выявление и анализ технических и организационных факторов с оценкой степени их влияния на выбор монтажной блочности на различных этапах жизненного цикла, таких как объём материалов и работ, территориальные условия, размер рабочей зоны, организационно-управленческая структура. Например, площадь рабочей зоны ограничивает количество рабочих, задействованных на выполнении тех или иных работ. При перенасыщении рабочей зоны рабочими они начинают создавать помехи друг другу, что ведёт к снижению производительности [7].

На основании сказанного можно заключить, что основными проблемными факторами при сооружении отечественных АЭС современного дизайна с реакторной установкой ВВЭР являются необходимость повышения индустриальности процессов сооружения строительных конструкций, повышение эффективности управления на основе научно обоснованных методов.

#### Существующие методы укрупнения монтажных блоков

Возможные варианты укрупнения строительных конструкций АЭС лежат в широком диапазоне. В отечественной практике арматурно-опалубочные блоки использовались ещё в унифицированном проекте АЭС с РУ ВВЭР-1000. Применение этих конструкций обусловило достижение рекордно коротких сроков строительства. В унифицированном проекте применялись плоские монтажные фрагменты (ПМФ) массой от 10 до 12 т (номенклатура указана в [8]), которые потом на строительных площадках объединялись в объёмные монтажные фрагменты массой до 330 т, в соответствии с возможностями основного монтажного крана [9].

В настоящее время в отечественной практике получил распространение способ монтажа с применением арматурно-опалубочных блоков с рабочей стержневой арматурой и с несъёмной стальной опалубкой. Такие блоки использовались на НВАЭС-2, также предусмотрены в проекте Курской АЭС-2 (ВВЭР-ТОИ). При этом средняя масса блоков – 4 и 14 т соответственно.

Зарубежные атомные станции с реакторами ABWR-1350 (Hitachi), APR-1400 (Korea Hydro & Nuclear Power) и AP-1000 (Westinghouse Electric) [10] возводятся с применением технологии со сталебетонными конструкциями. Наибольшее распространение имеют сталебетонные конструкции (СБК), в которых отсутствует или сведена к минимуму стержневая арматура. Из таких конструкций собираются объёмные монтажные блоки – в виде блок-комнат или целых конструктивных элементов, например, бассейн выдержки. Масса блоков достигает 750 тонн.

Для демонстрации зависимости сроков строительства от монтажной блочности в таблице 1 приведено сопоставление показателей АЭС российских проектов АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ: НВАЭС-2, ЛАЭС-2, Курская АЭС-2. Также в таблице 2 для сравнения представлены иностранные АЭС

Проект	АЭС-2006		ВВЭР-ТОИ	
	ЛАЭС-2	НВАЭС-2	Курская АЭС-2	
Площадка	1	2	1	2
Номер блока	90,6	118,3	71,9	86,9
Продолжительность строительства, мес.	63,9			
Технология армирования конструкций: арматурные блоки / несъёмная опалубка				
Фундаментная плита	-/-	-/-	+/-	
Цокольная часть	-/-	-/-	+/-	
Стены ЗЛА	-/-	+/-	+/-	
Перекрытия ЗЛА	-/-	-/-	+/-	
ВЗО	+/-	+/-	+/-	
НЗО	-/-	+/-	+/-	
Средняя масса блоков ЗЛА, т	-	3	14	

Табл. 1. Продолжительность строительных работ отечественных АЭС

Tab. 1. Duration of construction works of domestic nuclear power plants

Проект	AP1000			
	Sanmen 1&2		Haiyang 1&2	
Номер блока	1	2	1	2
Продолжительность строительства, мес.	61	72,7	56,6	65,9
Средняя масса блоков ЗЛА, т	215			

Табл. 2. Продолжительность строительных работ AP1000

Tab. 2. Duration of construction works AP1000

AP1000: Sanmen 1&2, Haiyang 1&2. Рассматривалась продолжительность строительных работ от первого бетона до завершения бетонирования НЗО. Фактические даты ключевых событий взяты из открытых источников, пресс-релизов и т. п.

Как видно на примере описанных вариантов, масса арматурно-опалубочных блоков колеблется от 3-5 т до 750 т, как в случае с AP1000. Средняя масса доходит до 215 т. При этом прослеживается тенденция, свидетельствующая о том, что применение индустриальных способов строительства позволяет сократить продолжительность работ.

#### Заключение

В качестве выводов нужно отметить, что принятие решения о применении крупноблочного монтажа формиру-

ет основы для проектирования и строительства. Решения, принятые относительно применения традиционных или крупноблочных методов при строительстве реакторного здания АЭС, имеют прямое влияние на его технико-экономические показатели и конкурентоспособность, в частности на сокращение продолжительности строительства.

Существующие научные проработки не определяют возможные интервалы продолжительности строительства при той или иной степени укрупнения, а касаются изменения трудозатрат или степени применения арматурно-опалубочных блоков. Используемые в отрасли подходы к выбору монтажной блочности строительных конструкций не подкрепляются расчётом и анализом вариантов укрупнения по затрачиваемым ресурсам и обоснованными прогнозами продолжительности строительства. Таким образом, существует необходимость разработки методики выбора монтажной блочности с общей мотивацией для всех участников строительного процесса, которая повысит согласованность и координацию участников проекта и позволит на предпроектных и проектных этапах жизненного цикла осуществлять обоснованный выбор наилучшей эффективной технологии возведения, направленной на сокращение продолжительности строительства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Бернхт, А. Определение рациональной блочности конструкций реакторного отделения АЭС с реакторами ВВЭР-1000 : дис. ... канд. тех. наук : 05.23.08 / Бернхт Андреас ; Москва, 1985. – 315 с.
- 2 Темишиев Р. Р. Прогнозирование трудовых затрат при монтаже строительных конструкций АЭС : автореферат дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Темишиев Руслан Рамзанович ; МГСУ. – Москва, 1995. – 18 с.
- 3 Шашков, А. А. Формирование организационной структуры проекта при крупноблочном возведении АЭС : дис. ... канд. тех. наук: 2.1.14 / Шашков Алексей Андреевич ; МГСУ. – Москва, 2023. – 197 с.
- 4 Шашков, А. А. Организационно-технологические аспекты крупноблочного возведения атомных электростанций / А. А. Морозенко, А. А. Шашков // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – № 5 (95). – С. 28–33.
- 5 Швец, Н. С. Повышение кадрового потенциала строительных предприятий Росатома на основе динамической модели подготовки кадров: для сооружения АЭС за рубежом : автореферат дис. ... канд. тех. наук : 2.1.14 / Швец Наталья Сергеевна ; МГСУ. – Москва, 2024. – 232 с.
- 6 Альшрайдех, М. Вопросы управления жизненным циклом
- 7 Ундоузеров В. А. Организация производственных процессов в условиях высокого насыщения фронта работ трудовыми ресурсами (на примере строительства атомных электростанций) : дис... канд. тех. наук : 05.02.22 / Ундоузеров Вадим Андреевич ; МГСУ. – Москва, 2019. – 166 с.
- 8 Организация поточного строительства энергоблоков на одной строительной площадке. Раздел 2. Технология и механизация строительно-монтажных работ : ОТП-86. Том II : Обязательные технологические правила строительства атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. В 8 т. : утверждены Минэнерго СССР 18.08.87 : введены в действие с 01.01.88. – Москва : ЦНТИ по энергетике и электрификации, 1988. – 38 с.
- 9 Анализ методов сооружения реакторных отделений АЭС с ВВЭР-1000 / Л. А. Толкачев, О. В. Колтун, А. С. Павлов, В. В. Шишкин // Энергетическое строительство. – 1989. – № 2. – С. 9–18.
- 10 Development of the SC Module Construction for Nuclear Power Plants / H. C. Kim. – Korea : Korea Hydro & Nuclear Power Co, Ltd. – 2009.
4. Morozenko, A. A. Organizational-technological aspects of large-block construction of nuclear power plants // Nauka i biznes: puti razvitiya [Science and Business: Development Paths]. – 2019. – No. 5 (95). – Pp. 28–33.
5. Shvets, N. S. Povysenie kadrovogo potentsiala stroitel'nykh predpriyatiy Rosatom na osnove dinamicheskoy modeli podgotovki kadrov: dlya sooruzheniya AEHS za rubezhom [Increasing the human resources potential of Rosatom's construction enterprises based on a dynamic training model: for the construction of nuclear power plants abroad] : avtoref. dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk : 2.1.14 [Abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences : 2.1.14] / Shvets Natalia Sergeevna ; MGSU. – Moscow, 2024. – 232 p.
6. Alshraideh, M. Voprosy upravleniya zhiznennym tsiklom AES [Issues of NPP lifecycle management] / M. Alshraideh, I. Engovatov, A. Morozenko // Ehnergeticheskaya politika [Energy Policy]. – 2023. – No. 1 (179). – Pp. 56–71.

7. Undozerov, V. A. Organizatsiya proizvodstvennykh protsessov v usloviyakh vysokogo nasyshheniya fronta rabot trudovymi resursami (na primere stroitel'stva atomnykh ehlektrostantsij) [Organization of production processes under conditions of high labor resource saturation (on the example of a nuclear power plant construction)] Dissertatsiya na soiskanie uchebnoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk dis... kand. tekhn. nauk : 05.02.22 [Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.02.22] / Undozerov Vadim Andreevich ; MGCU. – Moscow, 2019. – 166 p.
8. Organizatsiya potochnogo stroitel'stva ehnergoblokov na odnoj stroitel'noj ploshchadke. Razdel 2. Tekhnologiya i mekhanizatsiya stroitel'no-montazhnykh rabot [Organization of on-line construction of power units at one construction site. Section 2. Technology and mechanization of construction and installation works] : OTP-86. Tom II : Obyazatel'nye tekhnologicheskie pravila stroitel'stva atomnykh ehlektrostantsij s reaktorami VVER-1000. V 8 t. [OTP-86. Volume II : Mandatory technological rules for the construction of nuclear power plants with VVER-1000 reactors. In 8 volumes] : utverzhdeny Minehenergo SSSR 18.08.87 : vvedeny v dejstvie s 01.01.88 [approved by the Ministry of Energy of the USSR on 08/18/87 : put into effect on 01/01/88]. – Moscow : TSNTI po ehnergetike i ehlektrifikatsii [Central Research Institute for Energy and Electrification], 1988. – 38 p.
9. Analiz metodov sooruzheniya reaktornykh otdelenij AEHS s VVER-1000 [Analysis of methods of construction of reactor departments of nuclear power plants with VVER-1000] / L. A. Tolmachev, O. V. Koltun, A. S. Pavlov, V. V. Shishkin // Ehnergeticheskoe stroitel'stvo [Energy construction]. – 1989. – No. 2. – Pp. 9–18.
10. Development of the SC Module Construction for Nuclear Power Plants / H. C. Kim. – Korea : Korea Hydro & Nuclear Power Co, Ltd. – 2009.

УДК 692

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_54

## Актуальность дальнейшего повышения эффективности производства строительно-монтажных работ по устройству НФС на современном этапе развития российской и мировой экономики

The Relevance of Further Improving Efficiency of Construction and Installation Processes Using Large-Format Products for Ventilated Facade Systems at the Current Stage of Development of Russian and World Economy

**Топчий Дмитрий Владимирович**

Доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой «Испытания сооружений», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, TopchiyDV@mgsu.ru

Topchiy Dmitry Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Head of the Department of Testing of Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, TopchiyDV@mgsu.ru

**Гришин Константин Сергеевич**

Аспирант кафедры «Испытания сооружений», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, grishin\_ks@dsinv.ru

Grishin Konstantin Sergeevich

Graduate student of the Department of Testing of Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, grishin\_ks@dsinv.ru

**Аннотация.** В настоящий период времени на территории Российской Федерации ежегодная потребность в применении навесных фасадных систем (НФС) составляет 54 млн м<sup>2</sup>, увеличиваясь ежегодно в среднем на 5 % в год. При этом появляются и развиваются новые архитектурные решения для НФС, в том числе всё более существенную часть применяемых материалов занимают крупноформатные изделия (более 1 м<sup>2</sup> площади каждого изделия), с ежегодным приростом в среднем 9 %. При этом существующие технологические решения для крупноформатных изделий, как правило, не отличаются от мелкоштучных изделий и не учитывают особенности работы с крупноформатными изделиями, а именно особенности используемого инструмента, оборудования, требования к последовательности производства работ, обоснования применения средств механизации,

**Abstract.** Currently, in the Russian Federation, the annual need for the use of Ventilated facade systems (VFS) is 54 million m<sup>2</sup>, increasing annually by an average of 5% per year, while new architectural solutions for VF appear and develop, including large-format products (more than 1 m<sup>2</sup>), which became significant part of the materials used, with an average annual increase of 9%. At the same time, existing Technological solutions for large-format products, as a rule, do not differ from small-piece products and do

отсутствуют расчёты производительности труда монтажных бригад. Отсутствие данных исследований приводит к системным ошибкам в части расчёта стоимости и продолжительности производства работ. Эффективный и технологически правильный монтаж НФС позволяет добиться более высокого качества установки навесных вентилируемых фасадов. Это включает правильное выравнивание и крепление элементов фасада, обеспечение надёжности и долговечности конструкций, а также предотвращение возможных проблем, таких как протечки или повреждения.

**Ключевые слова:** организация строительства; технологические решения; механизация процессов; трудоёмкость работ; проект; качество работ; производственные ресурсы.

not take into account the specifics of working with large-format products, namely, the features of the tools used, equipment, requirements for the sequence of work, justification for the use of mechanization tools, there are no calculations of labor productivity of installation teams. The lack of research data leads to system errors in the calculation of the cost and duration of work. Efficient and technologically correct installation of VFS allows you to achieve a higher quality of installation of hinged ventilated fa-

cades. This includes the correct alignment and fastening of facade elements, ensuring the reliability and durability of the structure, as well as preventing possible problems such as leaks or damage.

### Введение

Основными тенденциями инновационной научной мысли в строительной индустрии являются оптимизация технологических процессов и усовершенствование проектных работ. Для решения этих проблем применяются новейшие технологии, в том числе с применением искусственного интеллекта. В этой работе рассматривается методика, направленная, прежде всего, на поиск новых технологических решений и способов, которые могут позволить сократить сроки строительных процессов и уменьшить физические и материальные затраты, что является актуальной задачей особенно в текущий момент. Применяя данные результаты, строительные компании могут значительно полнее реализовать возможность уменьшения сроков строительства, при этом повышая эффективность и, как следствие, конкурентоспособность своих проектов. Важным фактором последних лет являются условия увеличения дефицита рабочей силы и стремительный рост зарплат специалистов рабочих специальностей, что отрицательно влияет на экономику проектов в целом и на увеличение сметной стоимости НФС при строительстве и реконструкции зданий в частности.

Основной целью данной работы является анализ развития технологических решений в области НФС и влияния современных трендов развития строительной отрасли и архитектуры на себестоимость проектов и качество монтажных работ в части НФС. Стоит отметить, что требования и действующие правила и стандарты не успевают своевременно адаптироваться к динамично изменяющемуся рынку строительной продукции и развитию технологий в части автоматизации процессов. Во многом и существующие методы оценки эффективности строительного производства не учитывают эти изменения, поэтому для правильной оценки строительных процессов требуется введение новых критериев, таких как уровень автоматизации процессов и оценка условий и производительности труда рабочих при монтаже подсистемы и облицовочных материалов для НФС.

Технологически правильный монтаж НФС позволяет добиться более высокого качества установки навесных вентилируемых фасадов, а также позволяет сократить время и ресурсы, необходимые для их установки. Это может включать оптимизацию процесса установки, использование специализированного оборудования и технологий, а также улучшение методов работы. Кроме того, включает правильное выравнивание и крепление элементов фасада, обеспечение надёжности и долговечности конструкции, а также предотвращение возможных проблем, таких как протечки или повреждения.

Расчёты энергоэффективности зданий с НФС показывают, что использование конструктива с НФС позволяет снизить энергопотребление здания. Однако для достижения максимальной эффективности важно правильно соблюсти все технологии монтажа и учсть при проектировании и выполнении работ все теплотехнические требования. Эффективный монтаж обеспечивает правильную установку и герметизацию фасадов, что позволяет достичь максимальной энергоэффективности. Как показывают исследования энергоэффективности зданий

**Keywords:** organization of construction, technological solutions, mechanization of processes, labor intensity of work; project; quality of work; production resources.

в разных странах и климатических условиях, правильно спроектированный и корректно смонтированный НФС позволяет на 20–30 % повысить энергоэффективность зданий, особенно в странах с жарким климатом, где постоянно требуется принудительное охлаждение воздуха для поддержания комфортной температуры [1]. Ощущаемая потребность в энергии охлаждения классифицируется как теплопотери, поскольку она работает для отвода тепла из здания в окружающую среду таким образом, чтобы температура внутреннего воздуха здания соответствовала её заданному значению [2].

Также повышение эффективности технологических решений при монтаже НФС позволяет снизить риски и повысить безопасность рабочих при установке НФС. Это включает обеспечение правильного использования защитного оборудования, обучение рабочих безопасным методам работы и предотвращение потенциальных аварийных ситуаций.

Дополнительными факторами, влияющими на необходимость развития подходов в части совершенствования методов монтажа крупноформатных материалов, являются изменения видения архитекторов облика современных зданий и стремительное развитие технологий в части новых материалов. Алюминиевые композитные панели, фасадные кассеты из алюминия, натуральный камень, фиброкерамические панели, керамогранит, HPL-панели, фасадная терракота, стеклофибробетон, линеарные панели, модульные фасадные панели – рынок и технологии всех этих видов облицовки получил активное развитие за последние 20 лет. Современное производственное оборудование позволяет выпускать панели и модули размером до 25 м<sup>2</sup> и весом до нескольких тонн. Сегодня крупноформатные материалы тяжелее в несколько раз мелкоштучных изделий, которые были распространены 20–30 лет назад. Удельный же вес изделия 1 м<sup>2</sup> из стеклофибробетона, плит из керамогранита и натурального камня достигает до 30–35 кг/м<sup>2</sup>. При этом подходы, применяемые при монтаже данных изделий в части многих процессов, остаются прежними.

Рост благосостояния населения во многих крупных городах также сформировал дополнительный запрос на изменение облика фасадов современных домов и внедрение архитектурных «излишеств», таких как капители, пилястры, арки, порталы, колонны и полуколонны. Всё это требует увеличения числа квалифицированных проектировщиков НФС и рабочей силы.

Сметные расчёты застройщиков по премиальным проектам показывают, что стоимость фасадов таких зданий может доходить до 30–40 % от всего бюджета проекта. При этом стоимость устранения замечаний при некачественном выполнении монтажных работ или ошибок в проектировании зданий может доходить до 80 % стоимости всех работ по устранению замечаний перед получением комплексного акта проекта.

Основными проблемами при некачественном выполнении фасадных работ являются промерзание наружных стен и протечки фасадов. Выполнение некачественных примыканий фасадов и ошибки производственного персонала в ходе выполнения монтажных работ являются

одним из существенных факторов появления данных проблем.

В сложившейся ситуации организация контроля качества проектирования и монтажа навесных вентилируемых фасадов является насущной проблемой, а разработка методов повышения эффективности организационных работ инструментального контроля эксплуатационного качества навесных фасадов – актуальной задачей.

#### Материалы и методы

При социалистическом методе хозяйствования обычно применялась оценка производительности технологических процессов в промышленности по наиболее важному интегральному показателю – удельным приведённым расходам [3]. После перехода к рыночной экономике в связи со структурными экономическими реформами, когда принципиально изменились способы финансирования, а также с учётом трудностей сравнения показателей разнообразных производственных процессов, применение подобной оценки стало затруднительно, если вообще возможно. В связи с этим она была принципиально видоизменена, а показатель производительности представили как «модифицированные приведённые затраты». Эта методика была использована, например, в работе [4], а затем отменена после согласования и принятия новой редакции «Методических рекомендаций по оценке эффективности инвестиционных проектов» [5].

Важным отличием рыночной экономики от плановой, с точки зрения хозяйствующего субъекта, является первоочередная цель хозяйственной деятельности в определении рентабельности проекта и получения прибыли от предпринимательской деятельности. После появления переводных изданий иностранных авторов новый толчок в развитии получили фундаментальная теория управления проектами и оценка их эффективности [6]. Можно рассматривать не только стоимостные, но и иные показатели: удельные расходы энергии и материалов, трудоёмкость, износ оборудования и другие [7].

Общемировым трендом после 3-й и во время 4-й промышленных революций является повсеместная замена физического труда на интеллектуальный труд. Область

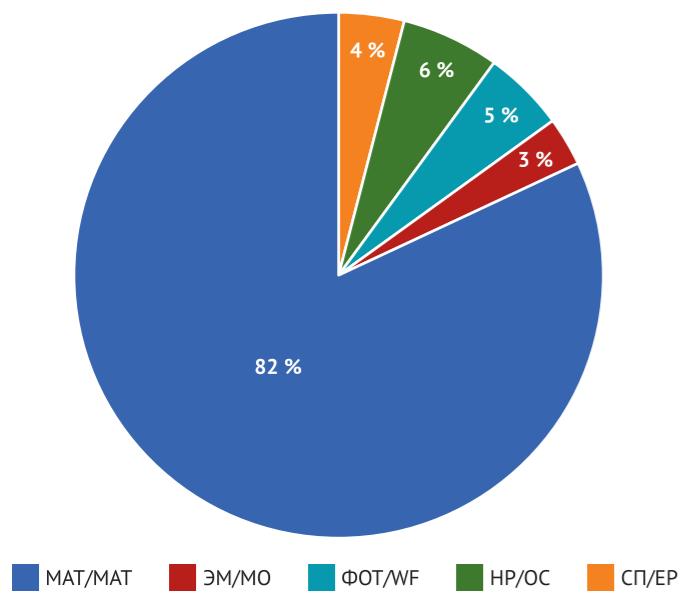


Рис. 1. Себестоимость единицы строительной продукции на уровне цен по состоянию на 2000 г.

Fig. 1. The cost of a unit of construction products in the price level 2000

строительного производства при этом одна из последних впитывает в себя новинки в части механизации и применения новейших средств производства работ. Во многих смежных отраслях последние 10 лет происходит новый технологический переход, связанный с внедрением роботизированной техники и дальнейшей автоматизации рабочих процессов. Всё это, помимо улучшения экономики процессов, увеличения скорости работ, также положительно влияет на безопасность производства работ и сокращение числа производственных травм. Это является основным вектором развития большинства индустриально развитых стран в мире.

Все вышеупомянутые факторы позволяют в основу оценки эффективности строительного производства, в том числе работ с крупноформатными изделиями при устройстве НФС, поставить его себестоимость или прямые затраты в денежном выражении. Предлагаемым решением по обоснованию целесообразности дальнейшего повышения эффективности производства строительно-монтажных работ при устройстве НФС являются учёт условий организации труда рабочих и исследование закономерности между привычными показателями конкурентоспособности строительных технологий (трудозатраты, стоимость) и условиями организации труда с последующим обоснованным совершенствованием наиболее тяжёлых операций путём внедрения разработанных средств малой механизации.

#### Результаты

Последние 25 лет, в связи с переходом к капиталистическим методам хозяйствования, в нашей стране наблюдается устойчивая тенденция к увеличению доли фонда оплаты труда по сравнению с сопутствующими затратами на использование материалов, машин, механизмов и др.

Как отмечается в [10], «согласно сборникам индексов пересчёта стоимости строительства, публикуемым ежеквартально Министерством строительства Российской Федерации, при строительстве административного здания стоимость оплаты труда относительно уровня цен 2000 года (рисунок 1) выросла в 43,88 раз (рисунок 2), а стоимость материалов и машин с механизмами – в

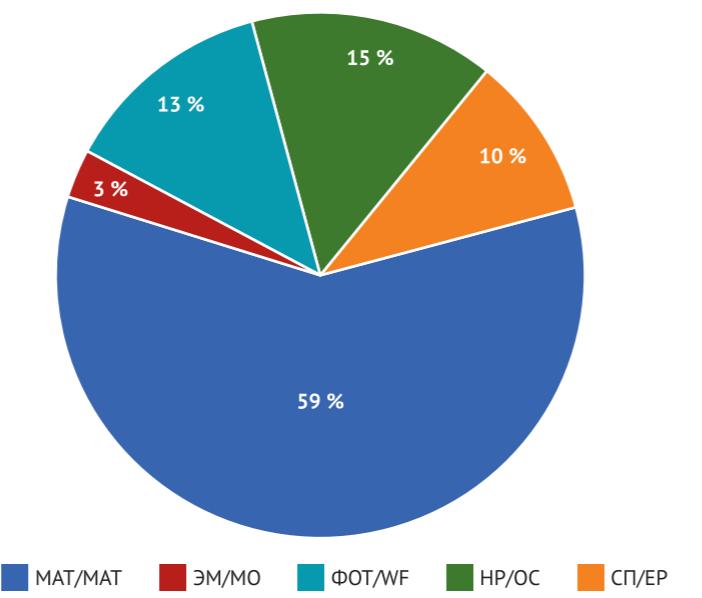


Рис. 2. Себестоимость единицы строительной продукции на уровне цен по состоянию на 2022 г.

Fig. 2. The cost of a unit of construction products in the price level 2022

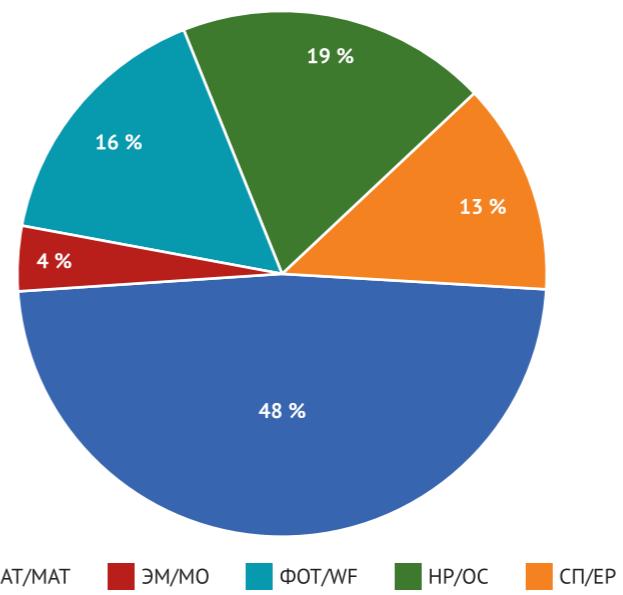


Рис. 3. Структура себестоимости единицы строительной продукции на 2030 г.

Fig. 3. The cost structure of a unit of construction products for 2030

7,48 раза и в 13,36 соответственно (письмо Минстроя РФ от 20.09.2022 № 48203-ИФ/09) [8].

Если рассматривать изменения себестоимости строительной продукции на протяжении длительного времени развития ценообразования, можно заметить достаточно устойчивую тенденцию увеличения доли оплаты труда по сравнению с остальными расходами [9]. Таким обра-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andarini, R. The role of building thermal simulation for energy efficient building design / R. Andarini. – DOI 10.1016/j.egypro.2014.01.217 // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 47. – Pp. 217–226.
2. Streicher, W. Energy efficient buildings : Lecture Note / W. Streicher ; Institut of Thermal Engineering. – Austria : TU Graz, 2007.
3. Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений : СН 509-78 : утверждена постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 13 декабря 1978 г. № 229 / Госстрой СССР. – Москва : Стройиздат, 1979. – 64 с.
4. Олейник, П. П. Научно-технический прогресс в строительном производстве : Монография / П. П. Олейник ; МГСУ. – Москва : Издательство АСВ, 2019. – 442 с.
5. Эргономика : Учебное пособие для вузов / В. В. Адамчук, Т. П. Варна, В. В. Воротникова и др. ; Под ред. В. В. Адамчука. – Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 1999. – 254 с.
6. Молодин, В. В. Контроль реализации проектов изменяемого назначения / В. В. Молодин // Строительное производство. – 2021. – № 2. – С. 13–19.
7. Решке, Х. Мир управления проектами / Х. Решке, Х. Шелле. – Пер. с англ. – Москва : Аланс, 1993. – 304 с.
8. Строительство / Федеральная служба государственной статистики : [официальный сайт]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/14458>.
9. Динамика и структура ВВП России : Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики / Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – 2019. – № 48. – 27 с.
10. Леоненко, К. А. Повышение эффективности производства каменных конструкций на основе прогрессивных методов организации труда рабочих : дис. ... канд. тех. наук : 2.1.7 / Леоненко Кирилл Алексеевич ; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – Москва, 2023. – 137 с.

#### REFERENCES

1. Andarini, R. The role of building thermal simulation for energy efficient building design / R. Andarini. – DOI 10.1016/j.egypro.2014.01.217 // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 47. – Pp. 217–226.
2. Streicher, W. Energy efficient buildings : Lecture Note / W. Streicher ; Institut of Thermal Engineering. – Austria : TU Graz, 2007.
3. Instruktsiya po opredeleniyu ehkonomicheskoy effektivnosti ispol'zovaniya v stroitel'stve novoj tekhniki, izobretenij i racionalisatorskikh predlozhenij : SN 509-78 [Instructions for determining the economic efficiency of using new equipment, inventions and innovation proposals in construction : CH 509-78] : utverzhdena postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po delam stroitel'stva ot 13 dekabrya 1978 g. – Moscow : Stroyizdat, 1979. – 64 p.
4. Oleinik, P. P. Nauchno-tehnicheskij progress v stroitel'nom proizvodstve : Monografiya [Scientific and technical progress in construction production : A monograph] / P. P. Oleinik ; MGSU. – Moscow : ACU Publishing House, 2019. – 442 p.
5. Ehrgonomika : Uchebnoe posobie dlya vuzov [Ergonomics : A textbook for universities] / V. V. Adamchuk, T. P. Varna, V. V. Vоротникова and others ; Edited by V. V. Adamchuk. – Moscow : UNITY-DANA Publ., 1999. – 254 p.
6. Molodin, V. V. Kontrol' realizatsii projektov izmenyaemogo naznacheniya [Control of the implementation of projects of variable purpose] / V. V. Molodin // Stroitel'noe proizvodstvo

зом, исследования, направленные на уменьшение доли оплаты труда в строительстве, со временем становятся всё более злободневными, учитывая требования инвесторов и часто недостаток рабочей силы. Тогда можно использовать методику линейной экстраполяции для определения года, когда доля оплаты труда превысит долю других расходов в себестоимости единицы строительной продукции. Это произойдёт примерно к 2028 году, так как для 2030 года (рисунок 3) индекс заработной платы составит 59,47; индекс материалов составит 9,84; индекс машин и механизмов – 17,85 [10].

Исходя из полученных результатов, уменьшение числа рабочей силы при монтаже НФС, совершенствование их методов труда, дополнительный инструментальный контроль при монтаже и приёмке, а также включение в рабочий процесс машин и механизмов малой механизации говорят о целесообразности дальнейших исследований в данном направлении.

#### Заключение

В современных условиях поиск решений по совершенствованию оценки эффективности строительного производства, в том числе технологий проектирования и монтажа НФС, является актуальной задачей. С учётом всё большего количества новейших строительных материалов для облицовки фасадов, совершенствование подходов и нормативной базы является важным аспектом развития научной мысли в строительной отрасли. Производство фасадных работ так же, как и многие другие области строительного производства, нуждается в большей автоматизации рабочих процессов и средств контроля.

Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 1999. – 254 с.

6. Молодин, В. В. Контроль реализации проектов изменяемого назначения / В. В. Молодин // Строительное производство. – 2021. – № 2. – С. 13–19.

7. Решке, Х. Мир управления проектами / Х. Решке, Х. Шелле. – Пер. с англ. – Москва : Аланс, 1993. – 304 с.

8. Строительство / Федеральная служба государственной статистики : [официальный сайт]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/14458>.

9. Динамика и структура ВВП России : Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики / Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – 2019. – № 48. – 27 с.

10. Леоненко, К. А. Повышение эффективности производства каменных конструкций на основе прогрессивных методов организации труда рабочих : дис. ... канд. тех. наук : 2.1.7 / Леоненко Кирилл Алексеевич ; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – Москва, 2023. – 137 с.

№ 229 [approved by Resolution No. 229 of the USSR State Committee for Construction dated December 13, 1978] / Gosstroy SSSR [Gosstroy of the USSR]. – Moscow : Stroyizdat, 1979. – 64 p.

4. Oleinik, P. P. Nauchno-tehnicheskij progress v stroitel'nom proizvodstve : Monografiya [Scientific and technical progress in construction production : A monograph] / P. P. Oleinik ; MGSU. – Moscow : ACU Publishing House, 2019. – 442 p.

5. Ehrgonomika : Uchebnoe posobie dlya vuzov [Ergonomics : A textbook for universities] / V. V. Adamchuk, T. P. Varna, V. V. Vоротникова and others ; Edited by V. V. Adamchuk. – Moscow : UNITY-DANA Publ., 1999. – 254 p.

6. Molodin, V. V. Kontrol' realizatsii projektov izmenyaemogo naznacheniya [Control of the implementation of projects of variable purpose] / V. V. Molodin // Stroitel'noe proizvodstvo

- [Construction production]. – 2021. – No. 2. – Pp. 13–19.
7. Reschke, H. Mir upravleniya proektami [The world of project management] / H. Reschke, H. Schelle. – Translated from English – Moscow : Alans, 1993. – 304 p.
8. Stroitel'stvo [Construction] / Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki [Federal State Statistics Service] : [official website]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/14458>.
9. Dinamika i struktura VVP Rossii : Byulleten' o tekushchikh tendentsiyakh rossijskoj ekonomiki [Dynamics and structure of Russia's GDP : Bulletin on Current Trends in the Russian Economy] / Analiticheskij tsentr pri Pravitel'stve Rossijskoj Federatsii [Analytical Center under the Government of the Russian Federation]. – Moscow, 2023. – 137 p.
- Federation. – 2019. – No. 48. – 27 p.
10. Leonenko, K. A. Povyshenie effektivnosti proizvodstva kamennykh konstruktsij na osnove progressivnykh metodov organizatsii truda rabochikh : dis. ... kand. tekh. nauk : 2.1.7 [Improving the efficiency of production of stone structures based on progressive methods of labor organization of workers : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 2.1.7] / Kirill Alekseevich Leonenko ; Natsional'nyj issledovatel'skij Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet [National Research Moscow State University of Civil Engineering]. – Moscow, 2023. – 137 p.

УДК 69.04

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_58

## Пути экономической оценки проектов разработки нефтегазовых месторождений

Ways of Economic Assessment of Oil and Gas Development Projects

**Грахов Валерий Павлович**

Доктор экономических наук, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство», ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова» (ИжГТУ имени М. Т. Калашникова), Россия, 426069, Удмуртская Республика, Ижевск, улица Студенческая, 7, pgs@istu.ru

**Grakhov Valery Pavlovich**

Doctor of Economic Sciences, Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov (IzhSTU named after M. T. Kalashnikov), Russia, 426069, Udmurt Republic, Izhevsk, ulitsa Studencheskaya, 7, pgs@istu.ru

**Ворона Вадим Геннадьевич**

Аспирант кафедры «Промышленное и гражданское строительство», ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова» (ИжГТУ имени М. Т. Калашникова), Россия, 426069, Удмуртская Республика, Ижевск, улица Студенческая, 7, vadim37@bk.ru

**Vorona Vadim Gennadievich**

Postgraduate student of the Department of Industrial and Civil Engineering, Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov (IzhSTU named after M. T. Kalashnikov), Russia, 426069, Udmurt Republic, Izhevsk, ulitsa Studencheskaya, 7, vadim37@bk.ru

**Аннотация.**

**Цель:** на основе анализа подходов, предложенных различными отечественными исследователями, определить методы (направления) экономической оценки проектов нефтегазовых месторождений, описать методики геолого-экономической оценки инвестиционных проектов и определить нерешённые аспекты.

**Методы:** теоретические методы исследования – обзор и анализ российской инженерной практики в области экономической оценки проектов разработки месторождений в нефтегазовой отрасли.

**Результаты:** выявлены основные направления (методы) экономической оценки проектов разработки нефтегазовых месторождений, оценены некоторые подходы, предложенные отечественными исследователями в аспекте экономической оценки проектов разработки нефтяных месторождений, описаны методики геолого-экономической оценки инвестиционных проектов и определены нерешённые аспекты. Выявлено, что

**Abstract.**

**Object:** based on the analysis of approaches proposed by various domestic researchers, determine the methods (directions) of economic evaluation of oil and gas field projects, describe the methods of geological and economic evaluation of investment projects and identify unresolved aspects.

**Methods:** theoretical research methods: review and analysis of Russian engineering practice in the field of economic evaluation of field development projects in the oil and gas industry.

**Findings:** the main directions (methods) of economic eval-

подсчёт интегрального показателя даёт возможность оценить нефтегазовые месторождения и определить неэффективность их разработки.

**Выходы:** методы экономической оценки проектов разработки нефтегазовых месторождений постоянно улучшаются за счёт внедрения риск-анализа, компьютерного моделирования углеводородного потенциала, а также использования экспертных систем и программных инструментов для анализа сложных факторов неопределенности. Однако федеральные нормативные акты не всегда учитывают специфические особенности добычи углеводородов, что требует создания специализированных методических рекомендаций. В научной среде разработано множество концептуальных моделей и подходов, направленных на повышение точности оценки экономической эффективности инвестиций в строительство скважин.

**Ключевые слова:** разработка месторождений; нефтегазовая отрасль; экономическая оценка; подходы к оценке; инвестиционные проекты; геологическая изученность; ресурсы.

ation of oil and gas field development projects were identified, some approaches proposed by domestic researchers in terms of economic evaluation of oil field development projects were evaluated, the methods of geological and economic evaluation of investment projects were described and unresolved aspects were determined. It was revealed that the calculation of the integral indicator makes it possible to evaluate oil and gas fields and determine the inefficiency of their development.

**Conclusions:** the main directions (methods) of economic evaluation of oil and gas field development projects were identified,

some approaches proposed by domestic researchers in terms of economic evaluation of oil field development projects were assessed, methods of geological and economic evaluation of investment projects were described, and unresolved aspects were identified. It was revealed that the calculation of the integral indicator

makes it possible to evaluate oil and gas fields and determine the inefficiency of their development.

**Keywords:** field development; oil and gas industry; economic evaluation; approaches to evaluation; investment projects; geological exploration; resources.

ким направлениям (методам), которые обобщены автором на рисунке 1.

Результатом экономической оценки является определение наиболее оптимального способа разработки месторождения. Этот вариант должен обеспечивать максимальную экономическую эффективность при условии полного извлечения запасов нефти из пластов, одновременно соблюдая экологические требования и нормы охраны недр и окружающей среды.

**Результаты**

Для того, чтобы определить основные пути экономической оценки проектов нефтяных и газовых месторождений, были проанализированы подходы, предложенные различными отечественными исследователями.

Подход К. Л. Пожарицкого [3] отражён на схеме (рисунок 2). Однако при этом подходе не берутся в учёт капитальные инвестиции для освоения месторождения.

Далее рассмотрен подход, предложенный авторами В. И. Ботвинниковым и В. М. Цепляевым [4], при котором с помощью трёх этапов определяются территории максимальной прибыли от добычи сырья (рисунок 3).

Данная методика позволяет комплексно экономически оценить рентабельность разработки перспективных нефтегазовых месторождений. Она помогает определить наилучшие стратегические решения для освоения углеводородных ресурсов с учётом транспортно-логистических затрат, потенциальной ценности запасов, доступности целевых рынков сбыта и итогового экономического эффекта от реализации проекта.

В работе В. В. Щербакова [5] представлена модель вероятностной экономической оценки месторождения, в которой стоимость участка рассчитывается на основе товарной стоимости извлекаемых полезных ископаемых (см. рисунок 4).

**Обсуждение**

Коллектив специалистов из СНИИГГ и МСа под руководством А. А. Герта разработал программный комплекс «Стратегия» [6], ориентированный на количественное моделирование оценки стоимости месторождений, запасов и прогнозных структур с учётом специфики финанс-



Рис. 1. Основные направления (методы) экономической оценки проектов разработки нефтегазовых месторождений  
Fig. 1. Main directions (methods) of economic evaluation of oil and gas field development projects

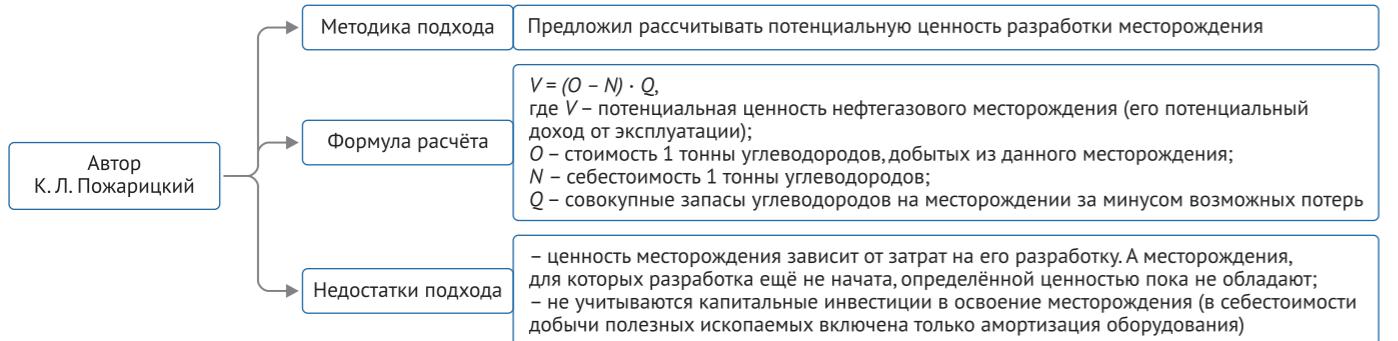


Рис. 2. Подход К. Л. Пожарицкого к оценке проектов разработки нефтегазовых месторождений  
Fig. 2. K. L. Pozharitsky's approach to assessing oil and gas field development projects

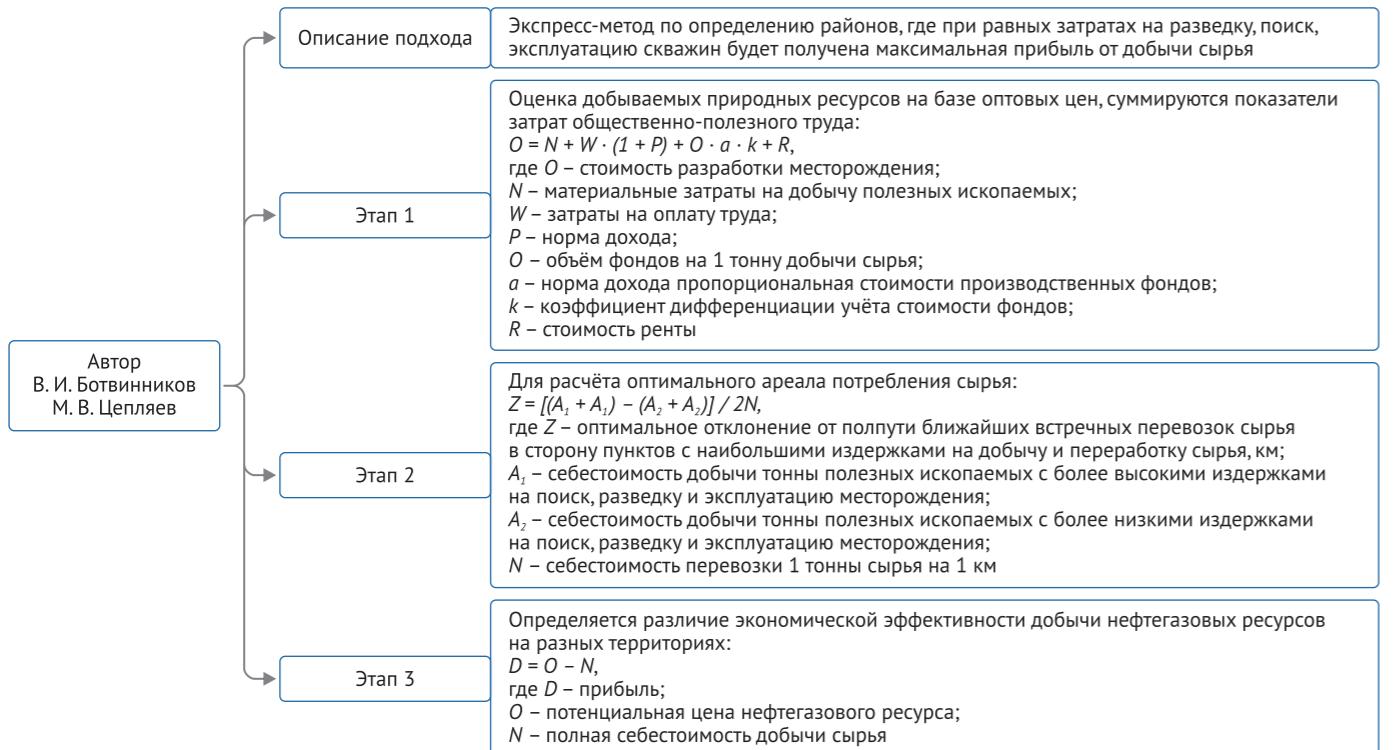


Рис. 3. Подход В. И. Ботвинникова и В. М. Цепляева к оценке проектов разработки нефтегазовых месторождений  
Fig. 3. The approach of V. I. Botvinnikov and V. M. Tsepelyaev to the assessment of oil and gas field development projects

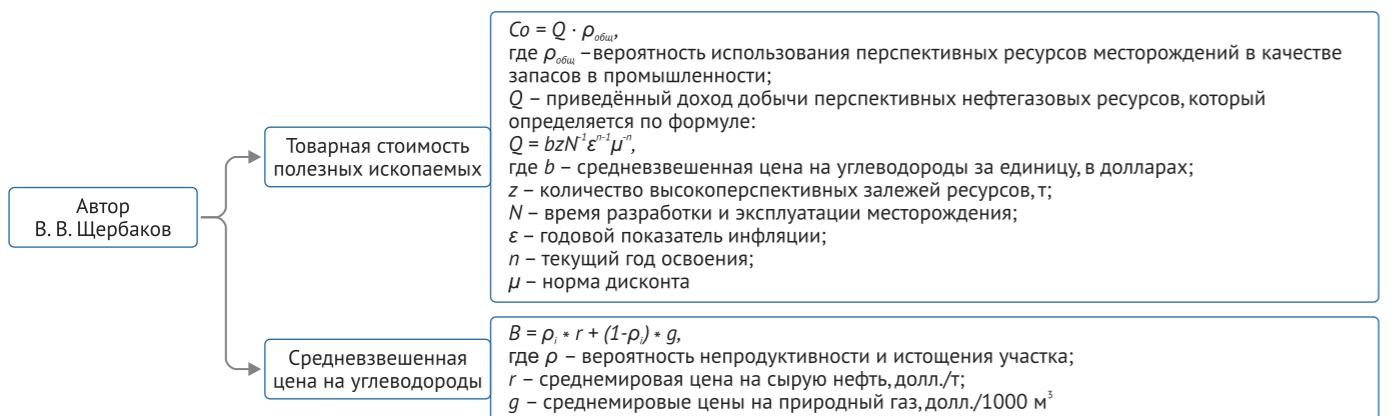


Рис. 4. Подход В. В. Щербакова к оценке проектов разработки нефтегазовых месторождений  
Fig. 4. V. V. Shcherbakov's approach to assessing oil and gas field development projects

сирования геологоразведочных мероприятий. Данный программный продукт обеспечивает анализ запасов углеводородов, прогнозирование эксплуатационных показателей сырьевой базы и вычисление вероятностных параметров ключевых инвестиционных проектов [7–8].

Для повышения точности экономической оценки интегрирован метод Монте-Карло, реализуемый в соот-

ветствии с международными стандартами нефтегазовой отрасли. Этот стохастический инструмент позволяет проводить вероятностный анализ запасов и формировать комплексные экономико-технологические модели разработки месторождений [9–12].

Оценка запасов осуществляется по трём уровням критериям вероятности – оптимистическому ( $P = 10\%$ ),

наиболее вероятному ( $P = 50\%$ ) и пессимистическому ( $P = 90\%$ ) – с генерализацией геологических рисков. Такой подход обеспечивает статистическую обоснованность прогноза и позволяет формировать сценарно-ориентированные разработки углеводородных залежей, базируясь на эмпирических данных [13–15].

Основные направления совершенствования методик геолого-экономического анализа инвестиционных проектов по бурению нефтегазовых скважин включают:

- внедрение современных математических моделей и вычислительных алгоритмов для оптимизации оценки экономической эффективности;
- разграничение геологических и экономических параметров оценки;
- расширение применения количественных методов для анализа инвестиционной привлекательности.

В настоящем времени методы экономической оценки углеводородных ресурсов России постепенно синхронизируются с международными стандартами. Основным нормативным актом является утверждённая Минэкономразвития и Минфином РФ методика (Приказ № 139/82н от 23.05.2006), используемая для технико-экономического обоснования проектов, проведения экспертизы, а также обоснования государственных мер поддержки [16].

В упомянутой методике критерии эффективности систематизированы в три группы:

- бюджетная эффективность;
- прогнозируемая экономическая эффективность;
- финансовая эффективность инвестиционных проектов.

Для количественной оценки используются модели дисконтированных денежных потоков (DCF), включающие показатели внутренней нормы доходности (IRR), чистой приведённой стоимости (NPV) и прогнозируемого срока окупаемости. Бюджетная эффективность характеризует совокупный вклад проекта в доходы консолидированного бюджета с учётом налоговой и иной фискальной нагрузки [17].

В рамках количественной оценки применяются следующие ключевые показатели [18]:

- BCF (бюджетный дисконтированный денежный поток) – дисконтированный объём поступлений в государственный бюджет, учитывающий ставку дисконта, отражающую требуемую норму доходности;
- PIB (коэффициент доходности инвестиций) – отношение BCF к объёму капитальных вложений; проект считается экономически целесообразным при значении PIB > 1.

Примеры экономической оценки пяти нефтяных месторождений на основе интегральной оценки отражены на рисунке 5: нефтегазовое месторождение 1 и нефтегазовое месторождение 4 имеют низкую интегральную оценку (по шкале Харрингтона) [19–20].

Подсчёт интегрального показателя даёт возможность оценить нефтегазовые месторождения и определить неэффективность их разработки.

Данная методика является ключевым инструментом при разработке проектов, ориентированных на получе-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тасмуханова, А. Е. Оценка рисков при разработке нефтегазовых месторождений / А. Е. Тасмуханова, А. А. Маренюк // Энергия: экономика, техника, экология. – 2023. – № 6. –

Месторождение 1	0,33
Месторождение 2	0,65
Месторождение 3	0,58
Месторождение 4	0,31
Месторождение 5	0,62

Рис. 5. Примеры экономической оценки нефтяных месторождений на основе интегральной оценки  
Fig. 5. Examples of economic assessment of oil fields based on integrated assessment

ние государственной поддержки, с акцентом на бюджетно-экономическую эффективность. Её основная особенность – комплексный анализ эффективности. Вместе с тем высокая сложность применяемых методов приводит к возникновению ряда нерешённых научно-технических задач:

- значительные изменения проектных показателей во времени и сложность их достоверного прогнозирования ограничивают временной горизонт анализа; это повышает неопределённость исходных параметров на стадии проектирования и увеличивает требования к инвестиционной привлекательности для снижения рисков;
- ключевые экономические параметры, такие как индекс цен на инвестиционные ресурсы, уровень инфляции и мультипликатор доходности, не включены непосредственно в аналитические модели, а используются как прогнозные допущения, что снижает точность оценки;
- многие факторы, влияющие на итоговый результат проекта, нуждаются в чёткой количественной formalизации, однако методики для анализа и подтверждения этих факторов пока недостаточно разработаны и требуют дальнейших исследований;
- необходимость полного учёта выявленных рисков при отсутствии чётких процедур и алгоритмов для их количественной и качественной интеграции в систему оценки.

#### Заключение

Методы экономической оценки проектов разработки нефтегазовых месторождений постоянно улучшаются за счёт внедрения риск-анализа, компьютерного моделирования углеводородного потенциала, а также использования экспертизных систем и программных инструментов для анализа сложных факторов неопределённости. Однако федеральные нормативные акты не всегда учитывают специфические особенности добычи углеводородов, что требует создания специализированных методических рекомендаций. В научной среде разработано множество концептуальных моделей и подходов, направленных на повышение точности оценки экономической эффективности инвестиций в строительство скважин.

С. 32–37.

2. Kurniawan, A. General dictionary of geology / A. Kurniawan, J. Mc. Kenzie, J. A. Putri ; Department of Environmental Geography, Gadjah Mada University. – Yogyakarta, 2024. – 60 p.

3. Пожарицкий, К. Л. Пути увеличения эффективности геологоразведочных работ и борьба с излишествами в них / К. Л. Пожарицкий // Советская геология. – 1958. – № 1. – С. 128–144.
4. Ботвинников, В. И. Метод экономической оценки и выбора первоочередных районов освоения нефтегазоносных областей / В. И. Ботвинников, В. М. Цепляев // Геология нефти и газа. – 1968. – № 8. – С. 5–9.
5. Щербаков, В. В. Оперативная геолого-экономическая оценка перспективных ресурсов нефти и газа в условиях лицензирования недропользования / В. В. Щербаков // Геология нефти и газа. – 1996. – № 8. – С. 25–31.
6. Васильев, Ю. Н. Методические аспекты оценки технико-экономического потенциала разработки морских нефтегазовых месторождений Арктики / Ю. Н. Васильев, Г. А. Стройков // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2021. – № 4. – С. 35–40.
7. Оценка технико-экономической эффективности инвестиционных проектов разработки нефтегазовых месторождений на основе применения методов нечёткой логики / А. Н. Дмитриевский, Н. А. Еремин, Ю. Г. Богаткина, О. Н. Сарданашвили // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 4. – С. 340–352.
8. Бухарбаева, Л. Я. Модель оценки экономической эффективности инвестиционных проектов разработки нефтегазовых месторождений / Л. Я. Бухарбаева, Э. Р. Кудратова // Управление экономикой: методы, модели, технологии : Материалы XVII Международной научной конференции, посвящённой 85-летию Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа – Павловка, 26–28 октября 2017 года ; Уфимский государственный авиационный технический университет. – Уфа : УГАТУ, 2017. – С. 287–291.
9. Бездудная, А. Г. Исследование путей развития нефтегазового сектора: региональные, экологические и информационные аспекты / А. Г. Бездудная, Р. В. Смирнов, М. Г. Трейман // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2022. – № 9 (1). – С. 31–38.
10. Совершенствование нефтегазового сервиса на месторождениях Западной Сибири / Д. А. Шаталов, Д. А. Небогин, Д. А. Семенов и др. // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2021. – № 8. – С. 4–7.
11. Шабалов, М. Ю. Применение дополнительных методов технико-экономической оценки проектов разработки нефтегазовых месторождений / М. Ю. Шабалов, Е. Р. Макаров- ская // Студент года 2019 : Сборник статей IX Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 15 мая 2019 года. – Отв. ред. Г. Ю. Гуляев. – Пенза : Наука и Просвещение. – 2023. – С. 56–59.
12. Ramesh, T. Life cycle energy analysis of buildings: An overview / T. Ramesh, R. Prakash, K. Shukla. – DOI 10.1016/j.enbuild.2010.05.007 // Energy and Buildings. – 2022. – Vol. 42, Iss. 10. – Pp. 1592–1600.
13. Павловская, А. В. Методология оценки эффективности участия предприятий в инвестиционных проектах разработки нефтегазовых месторождений / А. В. Павловская, О. В. Андрушкова // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2023. – № 11. – С. 4–9.
14. Хафизова, А. У. Оценка эффективности разработки нефтегазовых месторождений с помощью экспертных методов / А. У. Хафизова, В. А. Латыпова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – Т. 10, № 2 (37).
15. Dieterle, M. Bridging product life cycle gaps in LCA & LCC towards a circular economy / M. Dieterle, T. Viere. – DOI 10.1016/j.procir.2021.01.116 // Procedia CIRP. – 2021. – Vol. 98. – Pp. 354–357.
16. Эдилсултанова Л. А. Разработка модели оценки эффективности финансирования новых нефтегазовых месторождений / Л. А. Эдилсултанова // Научный альманах Центрально-Черноземья. – 2022. – № 2-7. – С. 288–294.
17. Юровский, А. А. Принцип «три Э» – современный подход к оценке затрат на разработку нефтегазовых месторождений / А. А. Юровский // Наука и образование сегодня. – 2024. – № 6 (17). – С. 57–60.
18. Gao, H. Building information modelling based building energy modelling: A review / H. Gao, C. Koch, Y. Wu. – DOI 10.1016/j.apenergy.2019.01.032 // Applied Energy. – 2019. – Vol. 238. – Pp. 320–343.
19. Polishchuk, A. I. Evolution of the foundation design methods for multi-storey and high-rise buildings in seismic regions / A. I. Polishchuk, M. B. Marinichev, I. G. Tkachev // Smart Geotechnics for Smart Societies : 17th Asian Regional Conference on Geotechnical Engineering. – Kazakhstan : Kazakhstan Geotechnical Society, 2023. – Pp. 2358–2364.
20. Buyle, M. Life cycle assessment in the construction sector: A review / M. Buyle, J. Braet, A. Audenaert. – DOI 10.1016/j.rser.2013.05.001 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2023. – Vol. 26. – Pp. 379–388.
- of investment projects for the development of oil and gas fields] / L. Ya. Bukharbayeva, E. R. Kudratova // Управление экономикой: методы, модели, технологии : Материалы XVII Международной научной конференции, посвящённой 85-летию Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа – Павловка, 26–28 октября 2017 года ; Уфимский государственный авиационный технический университет [Economic management: methods, models, technologies : Materials of the XVII International Scientific Conference dedicated to the 85th anniversary of Ufa State Aviation Technical University, Ufa – Pavlovka, October 26–28, 2017 ; Ufa State Aviation Technical University]. – Уфа : УГАТУ, 2017. – Pp. 287–291.
9. Bezdudnaya, A. G. Исследование путей развития нефтегазового сектора: региональные, экологические и информационные аспекты [Research of development paths of the oil and gas sector: regional, environmental and information aspects] / A. G. Bezdudnaya, R. V. Smirnov, M. G. Treyman // Vestnik Altayskoj akademii ekonomiki i prava [Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law]. – 2022. – № 9 (1). – Pp. 31–38.
10. Sovershenstvovanie neftegazovogo servisa na mestorozhdeniyakh Zapadnoy Sibiri [Improving oil and gas services at Western Siberian fields] / D. A. Shatalov, D. A. Nebogin, D. A. Semenov and others // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом [Problems of economics and management of the oil and gas complex]. – 2021. – № 8. – Pp. 4–7.
11. Shabalov, M. Yu. Применение дополнительных методов технико-экономической оценки проектов разработки нефтегазовых месторождений [Application of additional methods of technical and economic assessment of oil and gas field development projects] / M. Yu. Shabalov, E. R. Makarovskaya // Студент года 2019 : Сборник статей IX Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 15 мая 2019 года [Student of the Year 2019 : Collection of articles of the IX International Scientific Research Competition, Penza, May 15, 2019]. – Ed. by G. Y. Gulyaev. – Пенза : Нauka i Prosveshchenie, 2023. – Pp. 56–59.
12. Ramesh, T. Life cycle energy analysis of buildings: An overview / T. Ramesh, R. Prakash, K. Shukla. – DOI 10.1016/j.enbuild.2010.05.007 // Energy and Buildings. – 2022. – Vol. 42, Iss. 10. – Pp. 1592–1600.
13. Pavlovskaya, A. V. Metodologiya otsenki effektivnosti uchastiya predpriyatiy v investitsionnykh proektakh razrabotki neftegazovykh mestorozhdenij [Methodology for assessing the ef-

## REFERENCES

1. Tasmukhanova, A. E. Otsenka riskov pri razrabotke neftegazovykh mestorozhdenij [Risk assessment in oil and gas field development] / A. E. Tasmukhanova, A. A. Maren'yuk // Ehnergiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya [Energy: economics, technology, ecology]. – 2023. – № 6. – Pp. 32–37.
2. Kurniawan, A. General dictionary of geology / A. Kurniawan, J. Mc. Kenzie, J. A. Putri ; Department of Environmental Geography, Gadjah Mada University. – Yogyakarta, 2024. – 60 p.
3. Pozharitsky, K. L. Puti uvelicheniya effektivnosti geologorazvedochnykh rabot i bor'ba s izlishestvami v nich [Ways to increase the efficiency of geological exploration and combat excesses in them] / K. L. Pozharitsky // Sovetskaya geologiya [Soviet Geology]. – 1958. – № 1. – Pp. 128–144.
4. Botvinnikov, V. I. Metod ekonomicheskoy otsenki i vybora perovochednykh rajonov osvoeniya neftegazonosnykh oblastej [Method of economic evaluation and selection of priority areas for development of oil and gas bearing regions] / V. I. Botvinnikov, V. M. Tseplyaev // Geologiya nefti i gaza [Geology of oil and gas]. – 1968. – № 8. – Pp. 5–9.
5. Shcherbakov, V. V. Operativnaya geologo-ekonomiceskaya otsenka perspektivnykh resursov nefti i gaza v usloviyakh litsenzirovaniya nedropol'zovaniya [Operational geological and economic assessment of prospective oil and gas resources under the conditions of subsoil use licensing] / V. V. Shcherbakov // Geologiya nefti i gaza [Geology of oil and gas]. – 1996. – № 8. – Pp. 25–31.
6. Vasiliev Yu. N. Metodicheskie aspekty otsenki tekhniko-ekonomiceskogo potentsiala razrabotki morskikh neftegazovykh mestorozhdeniy Arktiki [Methodological aspects of assessing the technical and economic potential for developing offshore oil and gas fields in the Arctic] / Yu. N. Vasiliev, G. A. Stroykov // RISK: Resursy, Informatsiya, Snabzhenie, Konkurentsiya [RISK: Resources, Information, Supply, Competition]. – 2021. – № 4. – Pp. 35–40.
7. Otsenka tekhniko-ekonomiceskoy effektivnosti investitsionnykh proektov razrabotki neftegazovykh mestorozhdenij na osnove primeneniya metodov nechetkoj logiki [Evaluation of technical and economic efficiency of investment projects for the development of oil and gas fields based on the application of fuzzy logic methods] / A. N. Dmitrievsky, N. A. Erem'yan, Yu. G. Bogat'kina, O. N. Sardanashvili // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle [Proceedings of Tula State University. Earth Sciences]. – 2019. – № 4. – Pp. 340–352.
8. Bukharbayeva L. Ya. Model' otsenki ekonomicheskoy effektivnosti investitsionnykh proektov razrabotki neftegazovykh mestorozhdenij [Model for assessing the economic efficiency

- of investment projects for the development of oil and gas fields] / L. Ya. Bukharbayeva, E. R. Kudratova // Управление экономикой: методы, модели, технологии : Материалы XVII Международной научной конференции, посвящённой 85-летию Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа – Павловка, 26–28 октября 2017 года ; Уфимский государственный авиационный технический университет [Economic management: methods, models, technologies : Materials of the XVII International Scientific Conference dedicated to the 85th anniversary of Ufa State Aviation Technical University, Ufa – Pavlovka, October 26–28, 2017 ; Ufa State Aviation Technical University]. – Уфа : УГАТУ, 2017. – Pp. 287–291.
9. Bezdudnaya, A. G. Issledovanie putej razvitiya neftegazovogo sektora: regional'nye, ekologicheskie i informatsionnye aspekty [Research of development paths of the oil and gas sector: regional, environmental and information aspects] / A. G. Bezdudnaya, R. V. Smirnov, M. G. Treyman // Vestnik Altayskoj akademii ekonomiki i prava [Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law]. – 2022. – № 9 (1). – Pp. 31–38.
10. Sovrshennstvovanie neftegazovogo servisa na mestorozhdeniyakh Zapadnoy Sibiri [Improving oil and gas services at Western Siberian fields] / D. A. Shatalov, D. A. Nebogin, D. A. Semenov and others // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом [Problems of economics and management of the oil and gas complex]. – 2021. – № 8. – Pp. 4–7.
11. Shabalov, M. Yu. Primenenie dopolnitel'nykh metodov tekhniko-ekonomiceskoy otsenki proektov razrabotki neftegazovykh mestorozhdenij [Application of additional methods of technical and economic assessment of oil and gas field development projects] / M. Yu. Shabalov, E. R. Makarovskaya // Студент года 2019 : Сборник статей IX Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 15 мая 2019 года [Student of the Year 2019 : Collection of articles of the IX International Scientific Research Competition, Penza, May 15, 2019]. – Ed. by G. Y. Gulyaev. – Пенза : Нauka i Prosveshchenie, 2023. – Pp. 56–59.
12. Ramesh, T. Life cycle energy analysis of buildings: An overview / T. Ramesh, R. Prakash, K. Shukla. – DOI 10.1016/j.enbuild.2010.05.007 // Energy and Buildings. – 2022. – Vol. 42, Iss. 10. – Pp. 1592–1600.
13. Pavlovskaya, A. V. Metodologiya otsenki effektivnosti uchastiya predpriyatiy v investitsionnykh proektakh razrabotki neftegazovykh mestorozhdenij [Methodology for assessing the ef-

УДК 69.059; 69.003.13

## Реконструкция медицинских учреждений: коэффициент фронта работ

Reconstruction of Healthcare Facilities: Work Front Coefficient

Кабанов Вадим Николаевич

Доктор экономических наук, профессор кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, kabanovvn@yandex.ru

Kabanov Vadim Nikolaevich

Doctor of Economic Sciences, Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, kabanovvn@yandex.ru

Ляховский Константин Анатольевич

Соискатель ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, k.lyakhovskiy@inbox.ru

Lyakhovskiy Konstantin Anatolyevich

Applicant of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, k.lyakhovskiy@inbox.ru

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_63

**Аннотация.**

**Введение.** В условиях обновления и модернизации медицинских учреждений требуется применение научно обоснованных методик расчёта трудозатрат, учитывающих разнообразие архитектурных и планировочных решений. Специфика медицинских учреждений предъявляет строгие требования к организации работ. Затраты труда при выполнении строительных и отделочных работ зависят от площади и высоты помещений. К сожалению, этот фактор, который легко формализуется, не учитывается при расчёте трудозатрат на отделочные работы, в том числе при капитальном ремонте и реконструкции. В статье предлагается новый количественный показатель – коэффициент фронта работ, который позволит оптимизировать организационно-технологические решения.

**Материалы и методы.** Для анализа трудозатрат и доли малых помещений в строительстве и отделке медицинских учреждений Москвы был проведен статистический анализ и кластеризация данных из проектной и исполнительной документации по реконструкции и капитальному ремонту. Исследование включало анализ методик организационно-технологического

**Abstract.**

**Introduction.** In the context of renovating and modernizing healthcare facilities, it is necessary to use scientifically based methods to calculate labor costs, taking into account a variety of architectural and planning decisions. The specific requirements of healthcare facilities require strict organization of work. Labor costs for construction and finishing work depend on room size and height. Unfortunately, this easily measurable factor is not taken into consideration when calculating labor costs for finishing work, including major repairs and reconstructions. The article proposes a new quantitative indicator, the Work Front Coefficient, which aims to optimize organizational and technological solutions.

**Materials and methods:** To analyze the labor costs and the proportion of small premises in the construction and decoration of healthcare facilities in Moscow, a statistical analysis and clustering of data from design and execution documentation for reconstruction and major repairs were conducted. The study also

**Введение**

Российский строительный сектор переживает период значительных изменений. С одной стороны, наблюдается активное увеличение объёмов возводимого жилья, объектов инфраструктуры и промышленных комплексов. С другой стороны, отрасль сталкивается с комплексом серьёзных проблем, требующих быстрых и действенных решений [1].

Особое внимание уделяется объектам здравоохранения, где при модернизации и реконструкции больниц и поликлиник необходимо учитывать специфику, функциональное назначение и разнообразие архитектурных и планировочных решений [2; 3]. Недостаток точной информации о факторах, влияющих на трудоёмкость, может привести к увеличению расходов и срыву сроков строительства [4]. Для повышения точности прогнозирования затрат и улучшения эффективности процессов реконструкции и капитального ремонта необходимо применять научно обоснованные методы расчёта трудозатрат, учитывающие различные параметры [5].

Анализ теоретических и практических исследований, нормативной документации и реализованных проектов по реконструкции медицинских учреждений показал, что специфика работ в действующих учреждениях, особенности архитектуры, наличие большого количества помещений малого объёма приводят к увеличению трудоёмкости и общей продолжительности работ. Существующие мето-

проектирования, используемых для обеспечения своевременного завершения работ.

**Результаты.** Перерасход средств и задержки при реконструкции связаны с недостаточным учётом факторов, влияющих на трудозатраты: площади, высоты, сложности и функционального назначения помещений. Эти параметры должны быть проанализированы на этапе медико-технологического задания для определения стоимости и продолжительности работ. Коэффициент фронта работ поможет точнее оценить трудозатраты, минимизируя риски и издержки.

**Выводы.** Для точного планирования и оценки трудозатрат необходимо разрабатывать модели и методики определения затрат труда, учитывающие геометрические параметры помещений и отделочные материалы. Это повысит предсказуемость затрат и ускорит процессы капитального ремонта и реконструкции, облегчая задачу исполнителям и заказчикам.

**Ключевые слова:** строительство; реконструкция; медицинские учреждения; трудозатраты; планирование; коэффициент фронта работ; трудоёмкость; отделочные работы; архитектурные особенности; нормативная документация.

included an analysis of organizational and technological design methods used to ensure the timely completion of work.

**Results:** Cost overruns and delays in reconstruction are often associated with insufficient consideration of factors that affect labor costs, such as area, height, complexity, and functional purpose of the premises. These parameters should be carefully analyzed at the stage of healthcare and technical task to determine cost and duration. The work progress coefficient can help estimate labor costs more accurately, minimizing risks and expenses.

**Conclusions:** To accurately plan and estimate labor costs, it is important to develop models and methods that take into account the geometric parameters of the premises and finishing materials. These will help to increase cost predictability and speed up the processes of major repairs and reconstruction, making it easier for contractors and clients.

**Keywords:** construction; reconstruction; healthcare facilities; labor costs; planning; work front coefficient; labor intensity; finishing works; architectural features; regulatory documentation.

ды, используемые при реконструкции жилых, общественных и промышленных зданий, не учитывают факторы, влияющие на своевременный выпуск строительной продукции, и не обеспечивают однозначность решений при неравномерном распределении объёмов работ и ресурсов. Кроме того, стандартные методики расчёта затрат труда не обеспечивают требуемой точности, что снижает эффективность планирования.

Для повышения эффективности организационно-технологических мероприятий, точного определения сроков и распределения трудовых ресурсов предлагается ввести новый параметр – коэффициент фронта работ. Этот легко формализуемый показатель, к сожалению, не учитывается при оценке трудозатрат на строительные и отделочные работы в ходе реконструкции, капитального ремонта и нового строительства.

В статье рассматривается предложение о новом подходе к определению затрат труда на этапе принятия организационно-технологических решений при реконструкции и капитальном ремонте медицинских учреждений. Основное внимание уделяется повышению точности расчётов с учётом архитектурных особенностей помещений. Для достижения цели исследования – определения влияния помещений малого объёма на трудозатраты при выполнении отделочных работ – решаются задачи, включающие анализ процентного соотношения помещений малого объёма, обоснование использования коэффици-

ента и определение взаимосвязи между трудозатратами и величиной этого коэффициента.

Новый показатель должен учитывать площадь отдельываемых поверхностей, высоту, геометрию помещений, а также функциональное назначение помещений и соответствующие нормативные требования. Внедрение этого показателя позволит точнее определять трудоёмкость, оценивать необходимые ресурсы и планировать сроки, снижая риски превышения бюджета и задержек.

**Материалы и методы**

Для оценки трудозатрат и определения доли помещений малого объёма в общем объёме работ, оказывающих влияние на продолжительность строительства и отделки в медицинских учреждениях Москвы, был проведён статистический анализ данных, полученных из проектной и исполнительной документации по реконструкции и капитальному ремонту.

В исследовании рассмотрены методики организационно-технологического проектирования для своевременного завершения работ на объектах.

Для проведения анализа использован метод кластеризации данных для группировки объектов реконструкции и капитального ремонта по схожим критериям: количественные показатели по помещениям, объёмы и виды работ; сроки проведения работ; стоимость работ; фактические сроки; методы расчёта трудозатрат и количества работников.

Применение кластерного анализа позволило определить группы схожих объектов и выделить типичные

организационно-технологические решения для расчёта трудозатрат.

Анализ данных показал, что до 80 % объёма работ в части затрат труда приходится на отделочные, включая штукатурные, что оказывает значительное влияние на сроки реконструкции. Исследование проблем, связанных с планированием отделочных работ, будет продолжено.

Также были проанализированы данные проектной документации для определения типовых размеров помещений при реконструкции и капитальном ремонте. Согласно проектной документации, доля помещений малого объёма составляет до 50 % от общего количества и до 50–70 % общей площади. Учитывалась разница высотных отметок в помещениях, которая объясняется функциональным назначением и расположением помещений, прокладкой коммуникаций под потолком в лотках или коробах [6].

Кроме того, для достижения цели исследования были решены следующие задачи:

- определён процент помещений малого объёма в общем объёме работ;
- обосновано использование коэффициента фронта работ при выполнении отделочных работ с помощью одного количественного показателя;
- установлена зависимость между трудозатратами и величиной такого коэффициента.

**Результаты**

Анализ показал, что выбор объёмно-планировочных решений обусловлен множеством факторов, которые фиксируются на стадии формирования технического за-

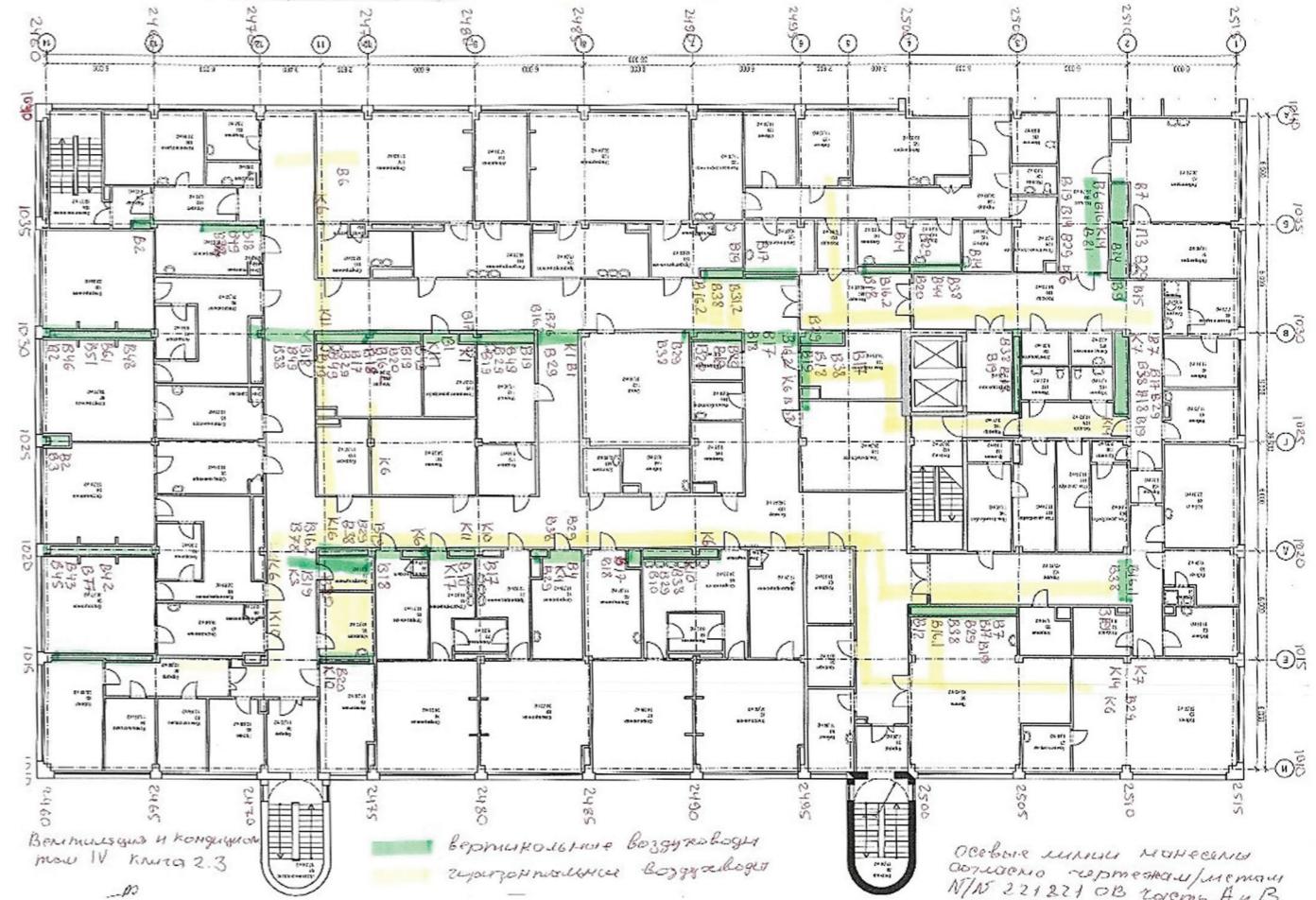


Рис. 1. Архитектурно-планировочные решения. Фрагмент  
Fig. 1. Architectural and planning solutions: a fragment

дания. Важнейшую роль играют профиль лечебного заведения и функциональное назначение отдельных его зон [7]. Последнее детализируется в медико-технологическом задании. Специфика архитектурно-планировочных решений медицинских учреждений проявляется в преобладании помещений малого объёма, поскольку именно они обеспечивают основную функциональность.

В процессе разработки организационно-технологической документации для проведения отделочных работ при реконструкции и капитальном ремонте медицинских учреждений понятие «помещения малого объёма» можно определить следующим образом: помещения малого объёма – это пространства, площадь которых не превышает установленного значения, как правило, определённого регламентами и стандартами проектирования. В контексте медицинских учреждений это могут быть кабинеты, процедурные помещения, палаты, складские зоны, санузлы и другие небольшие пространства, где выполнение отделочных работ требует особого подхода из-за ограниченности пространства.

В качестве примера рассмотрим архитектурно-планировочные решения (АПР) для кардиологического и кардиохирургического корпусов Научно-исследовательского института скорой помощи имени Н. В. Склифосовского (Москва, Б. Сухаревская площадь, д. 3, стр. 6 и 6А), как показано на рисунке 1. Эти материалы не были опубликованы в открытых источниках. На момент публикации статьи здания снесены в ходе реконструкции учреждения.

Основной функционал кардиологического и кардиохирургического корпусов – оказание профильной помощи, и именно поэтому 85 % пощады занято помещениями малого объёма.

На этапе входного контроля проектная документация анализировалась на соответствие требованиям строительных нормативов, в том числе СП 48.13330.2019, и материалам, используемым техническими службами при составлении медико-технологических заданий на реконструкцию и капитальный ремонт.

При составлении организационно-технологической документации необходимо учитывать выполнение работ в условиях ограниченного пространства, но расчёт численности работающих кадров и ИТР согласно данным ПОС и ППР, рассмотренным в ходе исследования, выполнен стандартными методами, когда численность рабочих определяется как отношение общей стоимости СМР к среднегодовой выработке на работающего либо отношение общего количества затрат труда в чел.-часах на продолжительность выполнения работ.

В то же время сроки выполнения работ рассчитываются на основе опыта предыдущих проектов, но процент успешно выполненных работ крайне низок. До масштабной модернизации подобных проектов не существовало, в связи с чем применение опыта предыдущих проектов не всегда оправдано, поскольку виды и состав работ могут существенно отличаться на разных объектах, а условия их выполнения могут быть совершенно иными.

Проанализированы данные 250 завершённых объектов, из которых только 20 % завершены в срок. В этих проектах доля помещений малого объёма составляла не более 10–20 % площади реконструируемого здания, остальные контракты исполнены со штрафами из-за срыва сроков. Это подтверждает предположение о влиянии количества

малых помещений на затраты труда и сроки работ. Статистические исследования показывают, что продолжительность работ увеличивалась пропорционально доле малых помещений в объёме проекта. В статье эта зависимость не рассматривается, но фиксируется для дальнейшего исследования.

В целом, анализ проектной документации показывает, что в существующем здании доля помещений малой площади составляет не менее 40–50 %, а при реконструкции может увеличиваться до 60–70 % [8]. Это может влиять на затраты труда и продолжительность строительно-монтажных работ. Ведомости и спецификации сверялись с данными всех разделов проектных решений.

В медицинских учреждениях существуют специфические требования к организации рабочего процесса. Одним из ключевых аспектов является соблюдение санитарных норм и стандартов, что предъявляет повышенные требования к качеству отделочных работ. Штукатурные и другие отделочные работы требуют значительных трудозатрат, которые зависят от размера и высоты помещения. Несмотря на измеримость этого параметра, его часто не учитывают при расчёте трудозатрат, особенно в контексте капитального ремонта и реконструкции. В ходе исследования были собраны данные о реальных трудозатратах на проведение штукатурных работ. Эти данные представлены в таблице 1 для помещений с высотой 2,8 м.

#### Обсуждение

С каждым годом будет возрастать объём работ по обновлению и капитальному ремонту медицинских учреждений. Без реконструкции и модернизации устаревшие здания и сооружения не смогут соответствовать современным стандартам оказания медицинской помощи. Более того, потребность в обновлении и капитальном ремонте возникает на протяжении всего срока службы любого объекта капитального строительства [9].

Проведение строительных работ в действующих учреждениях здравоохранения требует соблюдения повышенных стандартов, включая экологическую безопасность, что накладывает дополнительные ограничения на применение известных организационных и технологических решений. Кроме того, при разработке проектов реконструкции объектов здравоохранения, на основе которых впоследствии принимаются организационно-технологические и управленческие решения, необходимо учитывать факторы, влияющие на формирование объёмно-планировочных решений [10].

Как уже было отмечено, в результатах проведённого исследования установлено, что в процессе реконструкции и капитального ремонта медицинских учреждений значительная часть трудозатрат, а именно до 80 %, приходится на отделочные работы, включая штукатурные. Это может оказывать влияние на сроки выполнения строительно-монтажных работ в целом по объекту.

При проведении отделочных работ, особенно штукатурных, в действующих медицинских учреждениях часто возникают технологические перерывы. Эти перерывы обусловлены как спецификой выполнения штукатурных работ, так и ненормированными технологическими пазузами, которые не предусмотрены производственным заданием. Эти моменты отражены в Приказе Министерства здравоохранения Российской Федерации от 18 июля 2022 г. № 577/пр «Об утверждении Методики разработки сметных норм».

Габарит	Затраты труда (чел.-час) оштукатуриваемой поверхности стены на 1 м <sup>2</sup> пола при высоте помещения h = 2,800 м								
	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00	3,30	3,60	3,90
1,50	10,677	9,588	8,828	8,281	7,867	7,543	7,283	5,483	5,341
1,80	9,588	8,711	8,013	7,466	7,052	5,161	4,967	4,808	4,674
2,10	8,828	8,013	7,280	6,790	4,915	4,684	4,496	4,340	4,209
2,40	8,281	7,466	6,790	4,838	4,554	4,327	4,143	3,990	3,860
2,70	7,867	7,052	4,915	4,554	4,274	4,051	3,876	3,724	2,590
3,00	7,543	5,161	4,684	4,327	4,051	3,830	3,656	2,526	2,437
3,30	7,283	4,967	4,496	4,143	3,869	3,650	2,505	2,400	2,312
3,60	5,483	4,808	4,340	3,990	3,717	2,526	2,400	2,296	2,208
3,90	5,341	4,674	4,209	3,860	2,590	2,437	2,312	2,208	2,119
4,20	5,220	4,559	4,097	3,750	2,515	2,362	2,236	2,132	2,044
4,50	5,116	4,461	4,000	2,640	2,449	2,296	2,171	2,066	1,978
4,80	5,027	4,375	3,916	2,583	2,392	2,239	2,113	2,009	1,921
5,10	4,948	4,300	2,778	2,532	2,341	2,188	2,063	1,958	1,870
5,40	4,879	4,233	2,733	2,487	2,296	2,143	2,018	1,913	1,825
5,70	4,818	4,174	2,693	2,447	2,256	2,103	1,977	1,873	1,785
6,00	4,762	2,985	2,657	2,411	2,219	2,066	1,941	1,837	1,748
6,30	4,713	2,952	2,624	2,378	2,187	2,034	1,908	1,804	1,716
6,60	4,668	2,922	2,594	2,348	2,157	2,004	1,879	1,774	1,686
6,90	3,354	2,895	2,567	2,321	2,130	1,977	1,851	1,747	1,659
7,20	3,329	2,870	2,542	2,296	2,105	1,952	1,826	1,722	1,634
7,50	3,306	2,847	2,519	2,273	2,082	1,929	1,803	1,699	1,611
7,80	3,285	2,826	2,498	2,252	2,061	1,907	1,782	1,678	1,590
8,10	3,265	2,806	2,478	2,232	2,041	1,888	1,763	1,658	1,570
8,40	3,247	2,788	2,460	2,214	2,023	1,870	1,744	1,640	1,552
8,70	3,230	2,771	2,443	2,197	2,006	1,853	1,727	1,623	1,535
9,00	3,214	2,755	2,427	2,181	1,990	1,837	1,712	1,607	1,519
9,30	3,200	2,740	2,412	2,166	1,975	1,822	1,697	1,592	1,504
9,60	3,186	2,727	2,399	2,153	1,961	1,808	1,683	1,579	1,490
9,90	3,173	2,713	2,385	2,139	1,948	1,795	1,670	1,565	1,477
10,20	3,160	2,701	2,373	2,127	1,936	1,783	1,658	1,553	1,465

Таб. 1. Данные о затратах труда  
Tab. 1. Data on labor costs

Перерывы могут быть вызваны различными причинами, включая случайную непредвиденную работу, а также нерегламентированные перерывы, связанные с нарушением нормального течения технологического процесса, например, вызванные режимом работы учреждения или иными факторами, обусловленными в том числе особенностями объёмно-планировочных решений конкретного учреждения, а также, как следствие, неправильной организацией работ [11]. В организационно-технологической документации стандартные методы расчёта для жилых зданий и типовых проектов не учитывают такие перерывы.

В связи с увеличением продолжительности производства работ и, как следствие, стоимости строительно-монтажных работ из-за низкой достоверности расчётов, выполняемых с использованием существующей нормативной базы без учёта особенностей производства работ в лечебных учреждениях, рекомендуется применение коэффициентов.

В качестве коэффициента предлагается использование коэффициента фронта работ ( $k_{fr}$ ), определяемого

как отношение вертикальных поверхностей стен к площади пола для помещения, в котором выполняются отделочные (штукатурные) работы. Этот коэффициент может быть использован в последующих расчётах при построении математических моделей. По сути, **коэффициент фронта работ ( $k_{fr}$ )** – это единичный количественный показатель, который описывает специфику геометрических параметров каждого конкретного помещения (помещения малого объёма) или локального фронта работ, рассматриваемого как часть строящегося, реконструируемого объекта, для размещения рабочих со средствами труда, выполнения ими строительно-монтажных работ на выделенном объёме.

Для точности и согласованности результатов при изучении данной проблемы необходимо определить концептуальные рамки с учётом определений и выбрать те, которые соответствуют целям и задачам исследования [12].

Пункт 3.24 Изменения № 1 к СП 48.13330.2019 (ранее СНиП 12-01-2004) определяет фронт работ как часть строящегося объекта. Эта часть предназначена для размещения определённого количества рабочих и оборудования,

необходимых для выполнения строительно-монтажных работ на конкретном участке. Определение фронта работ осуществляется на основе расчётов, которые указываются в организационно-технологической документации. Эти расчёты включают деление объекта на участки, захватки и ярусы.

При изучении проектной и исполнительной документации определены ключевые параметры и характеристики каждого отдельного помещения, которые формируются АПР и которые планируется создать в рамках реконструкции и капитального ремонта медицинских учреждений [13].

Размеры помещений в строительстве на территории Российской Федерации кратны 300 мм по длине и ширине, а высота в медицинских организациях принята равной  $h \geq 2,400$  мм,  $h \geq 2,600$  мм,  $h \geq 2,800$  мм,  $h \geq 3,000$  мм,  $h \geq 3,150$  мм (последний размер указан как статистический, но встречается редко). Построены массивы данных для каждой высоты помещения. Расчёты выполнены в программе Excel. Данные о результатах расчётов ранее уже были опубликованы автором [14].

При выполнении штукатурных работ в медицинских учреждениях возникают ненормируемые технологические перерывы, зависящие от характеристики каждого помещения.

Эти характеристики определяются архитектурно-планировочным решением по назначению помещения и профилю учреждения. Также важно рассмотреть требования к организации рабочего места штукатура с соблюдением всех требований по безопасности труда.

Рабочее место – это пространство, в котором перемещаются рабочие, участвующие в строительном процессе, располагаются предметы труда, орудия труда, приспособления и продукция.

Рабочее место штукатура (РМШ) регулируется пунктом 2.2 ГОСТ 12.2.033-78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования» (утверждён Постановлением Госстандарта СССР от 26.04.1978 № 1100).

Для выполнения штукатурных работ на вертикальных и горизонтальных поверхностях требуется не только штукатур, но и подсобный рабочий. Подсобный рабочий занимается приготовлением растворной смеси, выполняет такелажные и другие задачи, необходимые для обеспечения выполнения сменного задания штукатуром. Сменное задание, в свою очередь, является фронтом работ для всего звена.

В соответствии с нормативными документами, а именно с Постановлением Госстроя России от 17 сентября 2002 года № 123 «О введении в действие строительных норм и правил Российской Федерации «Безопасность труда в строительстве. Часть 2. Строительное производство. СНиП 12-04-2002» (зарегистрировано в Министерстве России 18 октября 2002 года № 3880) и МДС 12-24.2006 «Устройство обычных, декоративных и гидроизоляционных штукатурных покрытий фасадов зданий», пунктом 5 «Техника безопасности и охраны труда», штукатур должен проводить подготовительные и уборочные работы до и после выполнения основных задач.

По Трудовому кодексу РФ рабочая смена не должна превышать 8 часов. Фактически на выполнение задач или сменного задания уходит 7 часов.

Согласно нормативной документации, для штукатура принимается 1-я зона, так как частота операций составляет 2 и более в минуту. Проекция РМШ на пол – 0,95 м от стены. Для подсобного рабочего – 2-я зона, так как операций менее 2 в минуту (1,1 м). Минимальное разрешенное расстояние до оштукатуриваемой поверхности:

$$РМШ_1 = 0,95 + 1,1 = 2,05 \text{ м.}$$

Расчёт РМШ1 будет верен для оштукатуриваемой поверхности стены, если высота этой поверхности не превышает  $h = 3,05$  м, а для высоты оштукатуриваемой поверхности стены, превышающей указанную, а также требования нормативов, расчёт РМШ2 составит:

$$РМШ_2 = 0,95 + 0,95 + 1,1 = 3,0 \text{ м.}$$

Для расчёта РМШ необходимо учитывать, что штукатурные работы не следует вести на одной захватке одновременно с другими строительными работами. Расстояние между рабочими местами должно быть не менее 5 м. Таким образом, площадь РМШ одного штукатура и одного подсобного рабочего в проекции на пол будет составлять  $S_{РМШ1} = 5,0 * 2,05 = 10,25 \text{ м}^2$  для высоты оштукатуриваемой поверхности менее  $h = 3,05$  м, тогда  $S_{РМШ2} = 5,0 * 3,0 = 15 \text{ м}^2$  для высоты оштукатуриваемой поверхности более  $h = 3,05$  м.

Для построения модели рабочее место штукатура также возможно выразить через  $k_{(ФР)}$ , который будет рассчитан по формуле 1:

$$k_{(ФР)} = \frac{S_w}{S_f}. \quad (1)$$

Тогда для высоты отделки в помещении, например 2,800 м, коэффициент фронта работ составит:  $k_{(ФР)} 2,800 * 5,000 / 10,250 = 1,365$ , а для высоты 3,000 м, соответственно, – 1,463.

Методом наименьших квадратов для каждой высоты помещений были построены регрессионные модели на основе множества полученных значений. Например, для высоты оштукатуриваемой поверхности 2,800 м в помещении зависимость затрат труда от коэффициента фронта работ представлена на рисунке 2.

С помощью стандартных методов математической статистики выведены формулы зависимости между затратами труда  $R(y)$  и  $x$  коэффициентом фронта работ ( $k$ ) для простоты проведения последующих расчётов, что позволяет не производить построение табличных массивов (больших данных) для каждого условия выполнения работ, а использовать математические вычисления.

Зависимости затрат труда  $R(y)$  от  $k_{(ФР)}$  рассчитываются по формулам 2–5:

– при высоте помещения  $h = 2,4$  м:

$$R_1 = 2,0295 * k_{(ФР)} - 3,4507, \quad (2)$$

– при высоте помещения  $h = 2,6$  м:

$$R_2 = 2,0295 * k_{(ФР)} - 3,7383, \quad (3)$$

– при высоте помещения  $h = 2,8$  м:

$$R_3 = 2,0295 * k_{(ФР)} - 4,0259, \quad (4)$$

– при высоте помещения  $h = 3,0$  м:

$$R_4 = 2,0295 * k_{(ФР)} - 4,3134. \quad (5)$$

### Заключение

На трудозатраты при выполнении отделочных работ при реконструкции и капитальном ремонте медучреждений влияют различные факторы, включая архитектурные особенности, наличие большого количества помещений

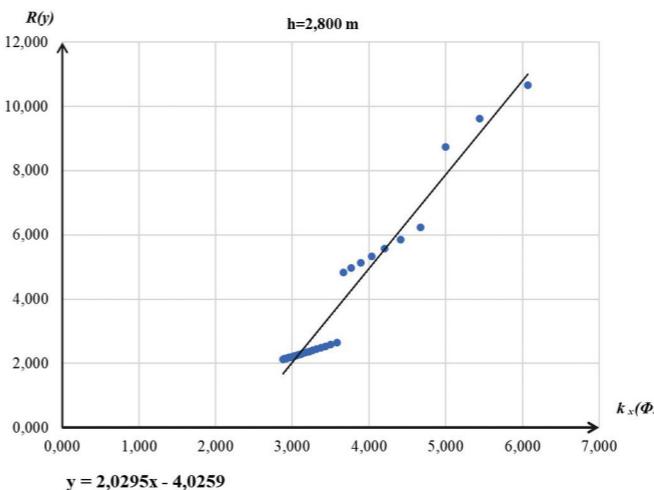


Рис. 2. Модель. Зависимость затрат труда от коэффициента фронта работ  $k_{(ФР)}$

Fig. 2. Model: The relationship between labor costs and the coefficient of work efficiency

малого объёма, доступность для рабочих и оборудования, а также уровень квалификации персонала. Эти аспекты требуют тщательного анализа для понимания взаимосвязи и возможности их учёта при планировании работ.

В условиях ограниченного пространства и специфических требований медицинских учреждений традиционные методы организации строительных процессов оказываются недостаточно эффективными. Это обусловлено необходимостью учёта стеснённых условий, логистических ограничений и особенностей функционирования медицинских организаций.

Проведённое исследование выявило прямую статистическую зависимость между трудовыми затратами на единицу продукции и коэффициентом фронта работ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митягин, С. Д. Технологические изъяны Градостроительного кодекса Российской Федерации / С. Д. Митягин // Вестник. Зодчий. 21 век. – 2024. – № 1 (90). – С. 2–3.
2. Levin, D. General hospitals planning and design / D. Levin. – UK : Design Media Publishing Ltd, 2014. – 320 p.
3. Hayward, C. Healthcare facility planning thinking strategically / C. Hayward. – 2nd ed. – USA : Health Administration Press, 2016. – 230 p. – (ACHE Management Series).
4. Факторы, влияющие на эффективность проведения капитального ремонта объектов здравоохранения / Т. К. Кузьмина, Т. А. Тарханян, Д. Д. Бабушкина, А. С. Мезенцев // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 1. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8932>.
5. Лапидус, А. А. Обоснование процесса выбора организационно-технологических решений / А. А. Лапидус, П. П. Олейник // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 5. – С. 70–74.
6. Проблемы технической эксплуатации и реконструкция объектов здравоохранения на примере г. Ростова-на-Дону / Л. В. Гиря, М. А. Рожина, Я. В. Иванча, О. Г. Коробченко, А. М. Гондусова // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 2. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6834>.
7. Теслер, Н. Д. Факторы, влияющие на формирование объёмно-планировочных решений при реконструкции многофункциональных медицинских объектов / Н. Д. Теслер, Г. Г. Малыха, В. В. Петрунин // Вестник МГСУ. – 2012. – № 9. – С. 48–54.
8. Malkin, J. Medical and Dental Space Planning: A Comprehensive Guide to Design, Equipment, and Clinical Procedures / J. Malkin. – 4th ed. – UK : John Wiley & Sons Limited, 2014. – 688 p.
9. Дорогань, И. А. Модель организации жизненного цикла медицинского здания / И. А. Дорогань. – DOI 10.22227/1997-0935.2018.12.1474-1481 // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, Вып. 12. – С. 1474–1481.
10. Проведение реконструктивных работ на существующих объектах медицины / Г. Г. Малыха, О. Б. Гусева, В. В. Петрунин, Н. Д. Теслер // Вестник МГСУ. – 2012. – № 9. – С. 214–220.
11. Дорогань, И. А. Влияние организационно-технологической сложности на сроки выполнения работ / И. А. Дорогань. – DOI 10.22227/1997-0935.2019.10.1331-1340 // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14, Вып. 10. – С. 1331–1340.
12. Системотехника строительства : энциклопедический словарь / ред. А. А. Гусаков. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва : Издательство АСВ, 2004. – 310 с.
13. Guidelines for Design and Construction of Outpatient Facilities : The glossary / The Facility Guidelines Institute. – USA : FGI, 2018. – URL: <https://www.fgiguideelines.org/wp-content/uploads/2018/01/FGI-Guidelines-Outpatient-2018-AddRev.pdf>.
14. Lyakhovsky, K. Improving the methods of organizational and technological design in the reconstruction of health facilities / K. Lyakhovsky, A. Arkhipov. – DOI 10.1051/e3sconf/202125809057 // E3S Web of Conferences : Ural Environmental Science Forum "Sustainable Development of Industrial Region", UESF 2021, Chelyabinsk, 17–19 февраля 2021 года. – Chelyabinsk, 2021. – Т. 258.
15. Федонников, А. С. Риски доверия к институту медицины в условиях цифрового здравоохранения: теоретический анализ и практика управления / А. С. Федонников, Е. А. Андриянова // Саратовский научно-медицинский журнал. – 2020. – Т. 16, № 1. – С. 94–98.

Коэффициент фронта работ, представляющий собой отношение объёма выполняемых работ к ширине рабочей зоны, играет ключевую роль в оптимизации производственных процессов, позволяя эффективно распределять ресурсы. Анализ данных показал, что увеличение коэффициента фронта работ приводит к росту трудозатрат без пропорционального повышения производительности. Эти результаты могут служить основой для разработки рекомендаций по совершенствованию организации труда, для планирования и повышения эффективности при реконструкции и капитальном ремонте медицинских учреждений.

Анализ, проведённый в рамках модернизации здравоохранения в Москве, показал, что стандартные подходы к расчёту числа сотрудников и времени выполнения работ при большом количестве локальных фронтов работ и на малых участках не обеспечивают достаточной точности. Для объектов, задействованных в программе модернизации города Москвы, не существовало аналогов, что затрудняло применение стандартных методик.

Практическое применение зависимости затрат труда от изменения коэффициента фронта работ в дальнейшем обеспечит достоверное решение 2 задач – прямой и обратной: первая задача – определение продолжительности производства отделочных работ с высокой степенью достоверности, вторая задача – определение количества рабочих, которые способны обеспечить выполнение работ в срок, заданный проектом и условиями контрактов – директивных сроков.

Опыт Москвы свидетельствует о необходимости использования фактических данных при оценке проектов. Это позволяет избежать увеличения расходов, задержек и ошибок со стороны проектировщиков и строительных компаний и иных рисков [15].

## REFERENCES

1. Mityagin, S. D. Tekhnologicheskie iz'yany Gradostroitel'nogo kodeksa Rossijskoj Federatsii [Technological flaws in the urban planning code of the Russian Federation] / S. D. Mityagin // Vestnik. Zodchij. 21 vek [The messenger. The architect of the 21st century]. – 2024. – No. 1 (90). – Pp. 2–3.
2. Levin, D. General hospitals planning and design / D. Levin. – UK : Design Media Publishing Ltd, 2014. – 320 p.
3. Hayward, C. Healthcare facility planning thinking strategically / C. Hayward. – 2nd ed. – USA : Health Administration Press, 2016. – 230 p. – (ACHE Management Series).
4. Faktory, vliyayushchie na effektivnost' provedeniya kapital'nogo remonta ob'ektov zdravookhraneniya [Factors influencing the effectiveness of capital repairs of healthcare facilities] / T. K. Kuzmina, T. A. Tarkhanyan, D. D. Babushkina, A. S. Mezentsev // Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. – 2024. – No. 1. – URL: <http://www.ivdon.ru/rub/magazine/archive/n1y2024/8932>.
5. Lapidus, A. A. Obosnovanie protessa vbyora organizatsionno-tehnologicheskikh reshenij [Justification of the process of selecting organizational and technological solutions] / A. A. Lapidus, P. P. Oleinik // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil engineering]. – 2024. – No. 5. – Pp. 70–74.
6. Problemy tekhnicheskoy eksploatatsiya i rekonstruktsiya ob'ektov zdravookhraneniya na primere g. Rostova-na-Donu [The problems of technical operation and reconstruction of healthcare facilities, using the example of Rostov-on-Don] / L. V. Giry, M. A. Rozhina, Y. V. Ivancha, O. G. Korobchenko, A. M. Gondusova // Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. – 2021. – No. 2. – URL: [ivdon.ru/rub/magazine/archive/n2y2021/6834](http://ivdon.ru/rub/magazine/archive/n2y2021/6834).
7. Tesler, N. D. Faktory, vliyayushchie na formirovaniye ob'yomno-planirovочных reshenij pri rekonstruktsii mnogofunktional'nykh meditsinskikh ob'ektov [Factors Influencing the Formation of Spatial Planning Solutions during the Reconstruction of Multifunctional Medical Facilities] / N. D. Tesler, G. G. Malykha, V. V. Petrunin // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU] – 2012. – No. 9. – Pp. 48–54.
8. Malkin, J. Medical and Dental Space Planning: A Comprehensive Guide to Design, Equipment, and Clinical Procedures / J. Malkin. – 4th ed. – UK : John Wiley & Sons Limited, 2014. – 688 p.
9. Dorogan, I. A. Model' organizatsii zhiznennogo tsikla meditsinskogo zdaniya [A model of organization life cycle of a medical building] / I. A. Dorogan. – DOI 10.22227/1997-0935.2018.12.1474-1481 // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. – 2018. – Vol. 13, Iss. 12. – Pp. 1474–1481.
10. Carrying out reconstructive works on existing medical facilities [Carrying out reconstruction work on existing medical facilities] / G. G. Malykha, O. B. Guseva, V. V. Petrunin, N. D. Tesler // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. – 2012. – No. 9. – Pp. 214–220.
11. Dorogan, I. A. Vliyanie organizatsionno-tehnologicheskoy slozhnosti na sroki vypolneniya rabot [The impact of organizational and technological complexity on work timing] / I. A. Dorogan. – DOI 10.22227/1997-0935.2019.10.1331-1340 // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. – 2019. – Vol. 14, Iss. 10. – Pp. 1331–1340.
12. Gusakov, A. A. Sistemotekhnika stroitel'stva : ehntsiklopedicheskij slovar' [Systems Engineering in Construction : an encyclopedic dictionary] / ed. by A. A. Gusakov. – 2nd ed., supplement and revision. – Moscow : ASU Publishing House, 2004. – 310 p.
13. Guidelines for Design and Construction of Outpatient Facilities : The glossary / The Facility Guidelines Institute. – USA : FGI, 2018. – URL: [https://www.fgiguideelines.org/wp-content/uploads/2018/01/FGI-Guidelines-Outpatient-2018\\_AddRev.pdf](https://www.fgiguideelines.org/wp-content/uploads/2018/01/FGI-Guidelines-Outpatient-2018_AddRev.pdf).
14. Lyakhovsky, K. Improving the methods of organizational and technological design in the reconstruction of health facilities / K. Lyakhovsky, A. Arkhipov. – DOI 10.1051/e3s-conf/202125809057 // E3S Web of Conferences : Ural Environmental Science Forum "Sustainable Development of Industrial Region", UESF 2021, Chelyabinsk, February 7-19, 2021. – Chelyabinsk, 2021. – Vol. 258.
15. Fedonnikov, A. S. Riski doveriya k institutu mediciny v usloviyakh tsifrovogo zdravookhraneniya: teoreticheskij analiz i praktika upravleniya [Risks of trust in the Institute of Medicine in the context of digital healthcare: a theoretical analysis and practical management] / A. S. Fedonnikov, E. A. Andrianova // Saratovskij nauchno-meditsinskij zhurnal [Saratov Scientific and Medical Journal]. – 2020. – Vol. 16, No. 1 – Pp. 94–98.

УДК 69.059:004.912

DOI:10.54950/26585340\_2025\_2\_70

## Методологические основы автоматизированной обработки инженерных данных информационных моделей строительных объектов

Methodological Foundations for Automated Processing of BIM Engineering Data

### Железнов Максим Максимович

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные системы, технологии и автоматизация в строительстве», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Россия, Москва, Ярославское шоссе, 26, [zheleznovmm@mgsu.ru](mailto:zheleznovmm@mgsu.ru)

### Zheleznov Maksim Maksimovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, [ZheleznovMM@mgsu.ru](mailto:ZheleznovMM@mgsu.ru)

### Адамцевич Любовь Андреевна

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные системы, технологии и автоматизация в строительстве», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Россия, Москва, Ярославское шоссе, 26, [adamtsevichLA@mgsu.ru](mailto:adamtsevichLA@mgsu.ru)

### Adamtsevich Lyubov Andreyevna

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Docent of the Department of Informational Systems, Technologies and Automatization in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, [AdamtsevichLA@mgsu.ru](mailto:AdamtsevichLA@mgsu.ru)

### Монахов Борис Евгеньевич

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии и организация строительного производства», директор Института дистанционного образования, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, [monahov@mgsu.ru](mailto:monahov@mgsu.ru)

### Monakhov Boris Evgenievich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technologies and Organization Construction Production, Director of the Institute of Distance Education, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, [monahov@mgsu.ru](mailto:monahov@mgsu.ru)

### Казаков Сергей Дмитриевич

Преподаватель кафедры «Инженерная графика и компьютерное моделирование», аспирант кафедры «Информационные системы, технологии и автоматизация в строительстве», ФГБОУ «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, [KazakovSD@mgsu.ru](mailto:KazakovSD@mgsu.ru)

### Kazakov Sergey Dmitrievich

Lecturer of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling, Postgraduate student of the Department of Information Systems, Technologies, and Automation in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, [KazakovSD@mgsu.ru](mailto:KazakovSD@mgsu.ru)

### Феттер Матвей Гелаевич

Аспирант кафедры «Информационные системы, технологии и автоматизация в строительстве», ФГБОУ «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, [f3tter@ya.ru](mailto:f3tter@ya.ru)

### Fetter Matvey Gelaevich

Postgraduate student of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, [f3tter@ya.ru](mailto:f3tter@ya.ru)

#### Аннотация.

В статье представлен метод автоматизированной классификации элементов информационных моделей зданий (ИМ), основанный на сочетании фильтрации по IFC-классам, обработки текстовых описаний и применения языковой модели, работающей в zero-shot-режиме. Предлагаемый подход формализует задачу классификации как задачу смыслового сопоставления и не требует обучающих выборок. Метод реализуется в два этапа: предварительная фильтрация по IFC-классам и финальная классификация с применением языковой модели на архитектуре трансформера. Описания элементов ИМ формируются из структурированных атрибутов, таких как тип, материал и назначение, после чего проходят очистку и агрегацию. Для работы модели автоматически формируется промпт с описанием элемента и

списком допустимых классов, по которому выбирается наиболее подходящий. Модель исполняется локально и автоматически исключает некорректные входные данные. Предложенный метод демонстрирует устойчивость к вариативности описаний, масштабируемость и пригодность к интеграции в цифровые процессы управления жизненным циклом объектов. Он может быть использован на этапах планирования, оценки стоимости, проектирования и эксплуатации. Подробный экспериментальный анализ метода представлен в отдельной публикации.

**Ключевые слова:** автоматизация; информационное моделирование; классификация; строительный элемент; инженерные данные; цифровая модель; языковая модель; IFC; BIM; машинное обучение.

#### Abstract.

This paper presents a method for the automatic classification of elements in building information models (BIM), based on a combination of IFC class filtering, text description processing, and the application of a zero-shot language model. The proposed approach treats the classification task as a problem of semantic alignment and does not require training datasets. The classification is carried out in two stages: filtering using IFC classes and final classification using a transformer-based language model. Descriptions of BIM elements are aggregated from structured attributes such as type, material, and object name. A prompt is gen-

erated to guide the language model in selecting the most appropriate class based on semantic similarity. The model is executed locally and automatically excludes inconsistent or irrelevant inputs. The proposed method ensures adaptability to various types of descriptions and classification systems and is robust against variability in BIM modeling practices. This makes it suitable for use in construction planning, cost estimation, and digital lifecycle management of facilities. A detailed evaluation of model performance is discussed in a separate publication.

**Keywords:** automation; BIM; classification; engineering data; semantic model; IFC; machine learning; NLP.

#### Введение

В последние годы наблюдается рост интереса к применению нейросетевых архитектур и алгоритмов машинного обучения для автоматизации анализа строительных данных, в том числе для задач классификации элементов информационных моделей зданий (далее – ИМ, BIM (от англ. building information models)), которая лежит в основе формализованного представления инженерных данных [1; 2]. Использование ИМ в качестве достоверной базы данных всё чаще наблюдается не только на этапе

проектирования объекта, но и на последующих этапах его жизненного цикла [3]. Классификация, как способ формализации инженерных данных, позволяет преобразовать модель в машиночитаемую базу данных. В контексте построения киберфизических систем информационная модель здания функционирует как цифровой двойник, обеспечивающий автоматизированную идентификацию компонентов объекта и их интеграцию в процессы планирования, снабжения и эксплуатации [4]. В свою очередь, автоматическая классификация элементов инфор-

мационной модели позволяет обеспечить непрерывное и надёжное управление структурированными данными объекта, создавая условия для автоматизации процессов количественной оценки, планирования и управления строительным производством.

Исторически классификационные системы в строительстве эволюционировали от иерархических сметных структур к многоаспектным цифровым классификаторам – MasterFormat, OmniClass, Uniclass 2015 и российскому КСИ. Несмотря на развитие стандартов и наличие таких систем, эффективная интеграция классификаторов в среду информационного моделирования требует применения интеллектуальных алгоритмов и дополнительных средств автоматизации [4]. Это связано с разнообразием проектных подходов, неоднородностью данных, спецификой отечественных нормативов и отсутствием устойчивой связи между самим классификатором и логикой САПР.

Ранее предпринятые исследования продемонстрировали потенциал машинного обучения и глубоких нейронных сетей для решения задач классификации данных ИМ. Работы [1–4] показали, что использование методов глубокого обучения, включая свёрточные сети, трансформеры и графовые нейронные сети, позволяет классифицировать элементы с учётом геометрии, текстуры и контекста. В [5–7] реализованы модели, использующие текстовые атрибуты и структурированные данные IFC для предсказания классов элементов. Как показали сравнительные исследования, ансамблевые методы (например, случайный лес) демонстрируют хорошую устойчивость при работе с текстовыми признаками элементов и могут быть базовой моделью для классификации. Авторы [8–11] рассматривают комбинированные архитектуры с мультимодальной обработкой и использованием аугментаций данных. Визуальные методы классификации на основе BIM-представлений также развиваются: используются предварительно обученные свёрточные нейросети для автоматического распознавания структуры зданий [9; 12–13]. Тем не менее, большинство существующих решений фокусируется на отдельных типах элементов или ограничено одним источником признаков (геометрия либо текст), что снижает универсальность подходов [12; 14].

## Материалы и методы

Данная работа предлагает формализованный метод, сочетающий преимущества существующих стратегий и включающий два этапа: 1) фильтрацию по IFC-классам и 2) финальную классификацию с использованием языковой модели на базе архитектуры трансформера. Этапы метода представлены на рисунке 1.

В отличие от предыдущих решений, предложенный метод объединяет текстовые, параметрические и структурные признаки: реализуется поэтапная обработка данных, извлекаемых из файлов формата Industry Foundation Classes (IFC).

Иными словами, каждый элемент BIM-модели  $x_i$  характеризуется формальным типом  $c_i \in C$ , текстовым описанием  $d_i \in D$ , полученным путём агрегации атрибутов (в том числе PredefinedType, Name, Material, ObjectType), а также множеством допустимых классов  $P_i \subseteq y$ , отобранных из классификатора информационной модели на основе IFC-класса.



Рис. 1. Этапы автоматической классификации элементов ИМ  
Fig. 1. Stages of automatic classification of BIM model elements

Целью является выбор наиболее релевантного класса  $\hat{y}_i \in P_i$  для каждого элемента на основе смыслового соответствия его описания с признаками возможных классов. Формально задача классификации может быть описана как отображение:

$$f: D \times 2^y \rightarrow y, \hat{y}_i = f(d_i, P_i), \hat{y}_i \in P_i, \quad (1)$$

где  $D$  – множество текстовых описаний элементов;

$y$  – множество возможных классов;

$d_i$  – агрегированное описание элемента;

$P_i \subseteq y$  – множество допустимых классов;

$\hat{y}_i \in P_i$  – выбранный моделью класс.

Функция  $f$  реализуется при помощи языковой модели, которая получает на вход текстовое описание элемента и список возможных классов, после чего возвращает наиболее подходящий из них. Выбор осуществляется на основе неявной функции смыслового соответствия  $\text{sim}(d_i, \varphi(y))$ , где  $\varphi(y)$  – описание класса, включающее ключевые признаки. Архитектура обработки одного элемента классификации представлена на рисунке 2.

На предварительном этапе из IFC-модели извлекается информация об элементах, включая тип, материал, назначение, а также другие атрибуты. На основе IFC-класса каждого элемента формируется ограниченное множество допустимых классов  $P_i$ , из которого в дальнейшем производится выбор. Далее из текстовых полей элемента строится агрегированное описание  $d_i$ , проходящее очистку и нормализацию: удаление повторов, лишних символов, приведение к нижнему регистру и т. д. Это позволяет повысить устойчивость обработки к формулировочным вариациям, типичным для данных ИМ.

Выбор класса осуществляется с использованием языковой модели, функционирующей в режиме смыслового сопоставления (semantic alignment). Модели передаётся формализованная текстовая инструкция (промпт). Инженерия текстовых инструкций (промпт-инжиниринг) в настоящее время представляет собой ключевой механизм взаимодействия между пользователем и языковой моделью, особенно в задачах, не требующих предварительного обучения модели (zero-shot режим). Как показано в ряде исследований, именно структура и полнота промпта, а не архитектура модели в значительной степени определяют корректность, воспроизводимость и точность вывода [13].

В отличие от предыдущих решений, предложенный метод объединяет текстовые, параметрические и структурные признаки: реализуется поэтапная обработка данных, извлекаемых из файлов формата Industry Foundation Classes (IFC).

Иными словами, каждый элемент BIM-модели  $x_i$  характеризуется формальным типом  $c_i \in C$ , текстовым описанием  $d_i \in D$ , полученным путём агрегации атрибутов (в том числе PredefinedType, Name, Material, ObjectType), а также множеством допустимых классов  $P_i \subseteq y$ , отобранных из классификатора информационной модели на основе IFC-класса.

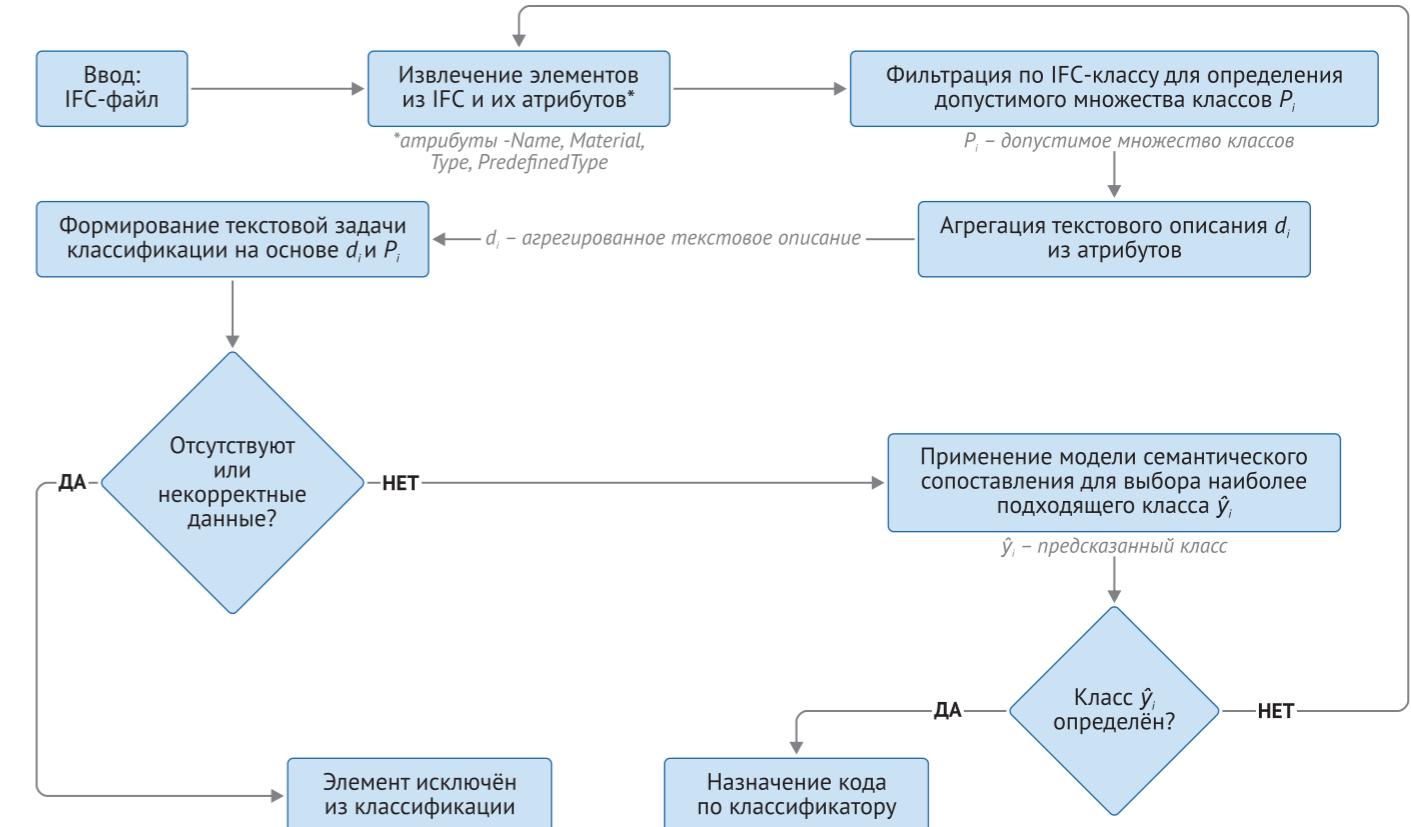


Рис. 2. Архитектура обработки одного элемента  
Fig. 2. Single element processing architecture

промпт аналогом входного пространства признаков. Как подчёркивают авторы в [15], важным является и то, что промпт может быть адаптирован под специфику предметной области за счёт включения отрицательных описаний, шагов рассуждения (chain-of-thought) или уточняющих контекстов. В контексте классификации BIM-элементов структура промпта позволяет задать семантический коридор гипотез и устраниить неоднозначности. В исследований [16; 17] подчёркивается, что языковая модель воспринимает промпт буквально, без домысливания, и потому любая неточность формулировки приводит к искажению результата. Сравнительная характеристика некорректного и корректного промптов, демонстрирующая влияние структуры запроса на качество классификации, представлена в таблице 1.

Необходимо отметить, что промпт-инжиниринг становится самостоятельной методологической дисциплиной,

требующей структурного подхода, итеративной отладки и доменной адаптации. Как показывают эксперименты по сравнению различных техник промптирования (few-shot, zero-shot, chain-of-thought), результат модели существенно меняется при неизменной архитектуре, но разной структуре входа [18]. Это подтверждает, что в прикладных системах, использующих LLM, в том числе в области строительного проектирования, промпт должен рассматриваться как архитектурный элемент, а не вспомогательная форма ввода [19].

Представленная работа акцентирует внимание на формализации метода и его архитектурной логике. Реализация алгоритма, использование языковой модели и экспериментальная проверка эффективности метода подробно рассмотрены в рамках параллельного исследования, материалы которого доступны в соответствующей публикации.

Критерий	Некорректный промпт	Корректный промпт
Формулировка задачи	Перечислены только поля данных без явной цели запроса	Присутствует явная инструкция на определение класса элемента
Структура промпта	Какой класс наиболее подходит по описанию: Описание: «ЖБ лестничный марш». Классы: CL01, CL02.	Определи наиболее подходящий класс для элемента BIM-модели, описанного текстом. Учти, что определяющим в классе является тип конструкции и материал. Металл и железобетон – принципиально разные материалы. Описание: «ЖБ лестничный марш армированный В30 B25 W8». Возможные классы: CL01 – Лестничный марш ЖБ монолитный, CL02 – Плита перекрытия ЖБ. Верни результат строго в формате JSON.
Контекст задачи	Модель может интерпретировать данные по-своему	Заданы ограничения по контексту
Формат ответа	Возможен произвольный ответ, плохо интегрируемый в процесс	Структурированный ответ в формате JSON: [[{Code: « », Name: « »}]]
Устойчивость результатов	Не воспроизводится	Воспроизводится, результат контролируем

Табл. 1. Сравнение структуры некорректного и корректного текстового запроса (промпта) для классификации элементов BIM-модели  
Tab. 1. Comparison of Incorrect and Correct Textual Prompts for Classification of BIM Model Elements

## Результаты

Предлагаемый метод классификации, основанный на смысловом сопоставлении текстового описания с признаками возможных классов, демонстрирует универсальность и устойчивость к вариативности входных данных. Предварительная фильтрация по IFC-классам и формирование агрегированного текстового представления позволяют эффективно сужить пространство поиска. Метод масштабируем, не требует обучения и может быть встроен в цифровые процессы управления жизненным циклом объектов строительства в качестве средства предварительной подготовки данных.

К ключевым преимуществам метода относятся использование как структурных (IFC-класс), так и текстовых описаний элементов ИМ. В совокупности с контекстно-ограниченным выбором классов на этапе формирования промпта это обеспечивает устойчивость к формулировочной вариативности данных. Значимую роль играют нормализация и смысловая агрегация текстовых атрибутов элементов ИМ. Кроме того, метод независим от конкретной классификационной системы и может быть адаптирован к любой структуре с достаточной семантической дифференциацией классов.

Поскольку работа носит методологический характер, количественные показатели эффективности метода будут представлены в отдельной публикации, посвящённой его экспериментальной валидации. Настоящая статья акцентирует внимание на архитектуре метода, значении инженерии текстовых инструкций и формализации задачи смысловой классификации в контексте цифровых информационных моделей.

Следует отметить, что метод обладает высоким потенциалом практического применения – как средство повышения качества и согласованности данных ИМ на ранних этапах её разработки, обеспечивая надёжную систематическую классификацию по мере поступления новых элементов.

В перспективе развитие метода может осуществляться за счёт включения дополнительных признаков элементов ИМ, в том числе геометрических, а также интеграции мультимодальных языковых моделей (LLM) для повышения точности классификации в условиях неоднозначности текстовых описаний.

## Обсуждение

В данном исследовании был предложен метод автоматической классификации элементов инженерных данных

ИМ, который использует комбинацию фильтрации по IFC-классам, обработку текстовых описаний элементов и применения языковой модели на основе архитектуры трансформера. Основное преимущество метода заключается в отсутствии необходимости дообучения языковой модели.

Следует отметить, что, несмотря на высокую устойчивость классификации при использовании предложенного метода, возможны ошибки в случаях:

- некорректного заполнения атрибутов элементов (например, отсутствие Name или неправильный PredefinedType),
- наличия нестандартных или нетиповых IFC-классов, не представленных в классификаторе,
- недостаточной специфичности текстового описания  $d$ .

В подобных ситуациях требуется либо дополнительная фильтрация данных на этапе предварительной обработки, либо адаптация промпта для уточнения постановки задачи.

Ещё одним важным аспектом, влияющим на эффективность классификации, является корректная формулировка промпта. При недостаточно точной постановке задачи или отсутствии ограничений на выбор классов устойчивость модели снижается. Это подчёркивает необходимость дальнейших исследований в области оптимизации промпт-инжиниринга для инженерных приложений.

Тем не менее предложенный подход имеет высокую масштабируемость и применимость в реальных проектах, особенно на этапах планирования и проектирования, где автоматическая классификация может значительно упростить и ускорить процессы обработки данных и принятия решений.

## Заключение

Предложенный метод двухэтапной автоматической классификации элементов BIM-моделей представляет собой потенциально эффективное решение для автоматизации обработки данных информационных моделей при проектировании объектов капитального строительства. Методологической особенностью предложенного подхода является использование инженерии текстовых инструкций (промпт-инжиниринга) как одного из ключевых компонентов архитектуры классификатора.

(63).

1. Классификация строительной информации в BIM с использованием алгоритмов искусственного интеллекта / М. В. Петроценко, П. Н. Недвига, А. А. Кукина, В. В. Шерстюк // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 11. – С. 1537–1550.
2. Побережник, В. И. Классификация структур информационной модели с помощью предварительно обученных нейронных сетей / В. И. Побережник // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. – 2020. – № 1 (10). – С. 147–151.
3. Шеина, С. Г. Пример применения BIM-технологий при обследовании зданий и сооружений / С. Г. Шеина, Е. В. Виноградова, Ю. С. Денисенко // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 6 (78).
4. Совершенствование процесса строительства с использованием BIM-технологий / Л. Б. Зеленцов, К. А. Цапко, И. Ф. Беликова, Д. В. Пирко // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 3 (63).
5. Automatic Classification and Coding of Prefabricated Components Using IFC and the Random Forest Algorithm / Z. Xu, Z. Xie, X. Wang, M. Niu // Buildings. MDPI. – 2022. – Vol. 12, Iss. 5. – Art. 688.
6. Rogage, K. 3D object recognition using deep learning for automatically enriching BIM data / K. Rogage, O. Doukari // Automation in Construction. – 2024. – Vol. 162. – Art. 105366.
7. Wu, J. Automated BIM Object Classification to Support BIM Interoperability / J. Wu, J. Zhang // Conference: Construction Research Congress 2018. – 2018.
8. Enhancing Deep Learning-based BIM Element Classification via Data Augmentation and Semantic Segmentation / Y. Yu, K. Lee, D. Ha, B. Koo // 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2021). – 2021. – Pp. 227–234.
9. Deep Learning-Based Automation of Scan-to-BIM with

Modeling Objects from Occluded Point Clouds / J. Park, J. Kim, D. Lee, K. Jeong, J. Lee, H. Kim, T. Hong // Journal of Management in Engineering. – 2022. – Vol. 38, No. 4.

10. Automating the retrospective generation of As-is BIM models using machine learning / P. Schönfelder, A. Aziz, B. Faltin, M. König // Automation in Construction. – 2020. – Vol. 152. – Art. 104937.
11. Automated Classification of Building Objects Using Machine Learning / N. Iftikhar, P. N. Gade, K. M. Nielsen, J. Mellergaard // Proceedings of the 15th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management, IC3K 2023, Rome, Italy, 13–15 November 2023. – 2023. – Vol. 1. – Pp. 331–338.
12. Koo, B. Automatic classification of wall and door BIM element subtypes using 3D geometric deep neural networks / B. Koo, R. Jung, Y. Yu // Advanced Engineering Informatics. – 2021. – Vol. 47. – Art. 101200.
13. Надворная, В. В. Промпт как основной инструмент генерации изображений в нейронной сети / В. В. Надворная, Д. П. Глушук // Молодость. Интеллект. Инициатива : Материалы XII Международной научно-практической конференции студентов и магистрантов. В 2 томах. Витебск, 2024. – 2024. – С. 279–281.
14. Liu, H. Automatic Fine-Grained BIM element classification using Multi-Modal Deep Learning (MMDL) / H. Liu, V. J. L. Gan, J. C. P. Cheng, S. A. Zhou // Advanced Engineering Informatics. – 2024. – Vol. 61. – Art. 102458.
15. Панкрашов, А. С. Техники промпта-инжиниринга LLM / А. С. Панкрашов, С. В. Окладникова // Потенциал интеллектуально одарённой молодёжи – развитию науки и образования : Материалы XIII Международного научного

## REFERENCES

1. Klassifikatsiya stroitel'noj informatsii v BIM s ispol'zovaniem algoritmov iskusstvennogo intellekta [Classification of construction information in BIM using artificial intelligence algorithms] / M. V. Petrochenko, P. N. Nedviga, A. A. Kukina, V. V. Sherstyuk // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. – 2022. – Vol. 17, No. 11. – Pp. 1537–1550.
2. Poberezhnik, V. I. Klassifikatsiya struktur informatsionnoy modeli s pomoshch'yu predvaritel'no obuchennykh neyronnykh setey [Classification of information model structures using pre-trained neural networks] / V. I. Berezhnik // Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh [Application of mathematics in economic and technical research]. – 2020. – No. 1 (10). – Pp. 147–151.
3. Sheina, S. G. Primer primeneniya BIM-tehnologij pri obslodovani zdanij i sooruzhenij [Example of using BIM technologies in building and structure surveying] / S. G. Sheina, E. V. Vinogradova, Yu. S. Denisenko // Inzhenernyj vestnik Doma [Engineering Bulletin of the Don]. – 2021. – No. 6 (78).
4. Sovrshennstvovanie protsessa stroitel'stva s ispol'zovaniem BIM-tehnologij [Improvement of the construction process using BIM technologies] / L. B. Zelentsov, K. A. Tsapko, I. F. Belikova, D. V. Pirko // Inzhenernyj vestnik Doma [Engineering Bulletin of the Don]. – 2020. – No. 3 (63).
5. Automatic Classification and Coding of Prefabricated Components Using IFC and the Random Forest Algorithm / Z. Xu, Z. Xie, X. Wang, M. Niu // Buildings. MDPI. – 2022. – Vol. 12, Iss. 5. – Art. 688.
6. Rogage, K. 3D object recognition using deep learning for automatically enriching BIM data / K. Rogage, O. Doukari // Automation in Construction. – 2024. – Vol. 162. – Art. 105366.
7. Wu, J. Automated BIM Object Classification to Support BIM Interoperability / J. Wu, J. Zhang // Conference: Construction Research Congress 2018. – 2018.
8. Enhancing Deep Learning-based BIM Element Classification via Data Augmentation and Semantic Segmentation / Y. Yu, K. Lee, D. Ha, B. Koo // 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2021). – 2021. – Pp. 227–234.
9. Deep Learning-Based Automation of Scan-to-BIM with
10. Automating the retrospective generation of As-is BIM models using machine learning / P. Schönfelder, A. Aziz, B. Faltin, M. König // Automation in Construction. – 2020. – Vol. 152. – Art. 104937.
11. Automated Classification of Building Objects Using Machine Learning / N. Iftikhar, P. N. Gade, K. M. Nielsen, J. Mellergaard // Proceedings of the 15th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management, IC3K 2023, Rome, Italy, 13–15 November 2023. – 2023. – Vol. 1. – Pp. 331–338.
12. Koo, B. Automatic classification of wall and door BIM element subtypes using 3D geometric deep neural networks / B. Koo, R. Jung, Y. Yu // Advanced Engineering Informatics. – 2021. – Vol. 47. – Art. 101200.
13. Nadvornaya, V. V. Prompt kak osnovnoj instrument generatsii izobrazhenij v nejronnoj seti [Prompt as the main tool for image generation in neural networks] / V. V. Nadvornaya, D. P. Glushchuk // Molodost'. Intellekt. Initsiativa : Materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i magistrantov. V 2 tomakh. Vitebsk, 2024 [Molodost'. Intelligence. Initiative : Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference of Students and Undergraduates. In 2 volumes. Vitebsk]. – 2024. – Pp. 279–281.
14. Liu, H. Automatic Fine-Grained BIM element classification using Multi-Modal Deep Learning (MMDL) / H. Liu, V. J. L. Gan, J. C. P. Cheng, S. A. Zhou // Advanced Engineering Informatics. – 2024. – Vol. 61. – Art. 102458.
15. Pankrashov, A. S. Tekhniki prompt-inzhiniringa LLM [Prompt-engineering techniques for LLM] / A. S. Pankrashov, S. V. Okladnikova // Potentsial intellektual'no odarennyh molodyyh nauki i obrazovaniya : Materialy XIII

форума молодых учёных, инноваторов, студентов и школьников, Астрахань, 28–31 мая 2024 года ; Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. – 2024. – № 1 (47). – С. 42–48.

16. Наймович, Д. В. Эффективное внедрение обучения языку промптов в образовательный процесс / Д. В. Наймович // Управление информационными ресурсами: Материалы XX Международной научно-практической конференции, Минск, 29 марта 2024 года. – Минск : Академия управления при Президенте Республики Беларусь, 2024. – С. 225–227.

17. Сейдаметова, З. С. Промпты для обучения эффективному использованию AI-генераторов кода / З. С. Сейдаметова // Информационно-компьютерные технологии в экономике, образовании и социальной сфере. – 2023. – № 4 (42). – С. 86–93.

18. Исследование эффективности промпта-инжиниринга и квантованных LLM в создании образовательного контента / П. А. Шнайдер, А. В. Чернышева, А. Д. Никифорова, А. И. Говоров // Инженерия. Искусственный интеллект. Хемоинформатика и химическая инженерия : Сборник тезисов XIII Конгресса молодых учёных, Санкт-Петербург, 08–11 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург : Национальный исследовательский университет ИТМО, 2024. – С. 303–304.

19. Гафнер, А. И. Коммуникация с нейросетями: промпт-инжиниринг в образовательном пространстве как инструмент выстраивания педагогического сопровождения студентов / А. И. Гафнер // Цифровая педагогика: от дидактики к педагогическому дизайну : Материалы Второй Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Екатеринбург, 05–06 апреля 2024 года. – Тюмень: ТюмГУ-Press, 2024. – С. 55–58.

mation and Robotics in Construction (ISARC 2021). – 2021. – Pp. 227–234.

9. Deep Learning-Based Automation of Scan-to-BIM with Modeling Objects from Occluded Point Clouds / J. Park, J. Kim, D. Lee, K. Jeong, J. Lee, H. Kim, T. Hong // Journal of Management in Engineering. – 2022. – Vol. 38, No. 4.

10. Automating the retrospective generation of As-is BIM models using machine learning / P. Schönfelder, A. Aziz, B. Faltin, M. König // Automation in Construction. – 2020. – Vol. 152. – Art. 104937.

11. Automated Classification of Building Objects Using Machine Learning / N. Iftikhar, P. N. Gade, K. M. Nielsen, J. Mellergaard // Proceedings of the 15th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management, IC3K 2023, Rome, Italy, 13–15 November 2023. – 2023. – Vol. 1. – Pp. 331–338.

12. Koo, B. Automatic classification of wall and door BIM element subtypes using 3D geometric deep neural networks / B. Koo, R. Jung, Y. Yu // Advanced Engineering Informatics. – 2021. – Vol. 47. – Art. 101200.

13. Nadvornaya, V. V. Prompt kak osnovnoj instrument generatsii izobrazhenij v nejronnoj seti [Prompt as the main tool for image generation in neural networks] / V. V. Nadvornaya, D. P. Glushchuk // Molodost'. Intellekt. Initsiativa : Materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i magistrantov. V 2 tomakh. Vitebsk, 2024 [Molodost'. Intelligence. Initiative : Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference of Students and Undergraduates. In 2 volumes. Vitebsk]. – 2024. – Pp. 279–281.

14. Liu, H. Automatic Fine-Grained BIM element classification using Multi-Modal Deep Learning (MMDL) / H. Liu, V. J. L. Gan, J. C. P. Cheng, S. A. Zhou // Advanced Engineering Informatics. – 2024. – Vol. 61. – Art. 102458.

15. Pankrashov, A. S. Tekhniki prompt-inzhiniringa LLM [Prompt-engineering techniques for LLM] / A. S. Pankrashov, S. V. Okladnikova // Potentsial intellektual'no odarennyh molodyyh nauki i obrazovaniya : Materialy XIII

- Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma molodykh uchenykh, innovatorov, studentov i shkol'nikov, Astrakhan', 28–31 maya 2024 goda ; Astrakhanskij gosudarstvennyj arkhitekturno-stroitel'nyj universitet [The potential of intellectually gifted youth for the development of science and education : Proceedings of the XIII International Scientific Forum of Young Scientists, Innovators, Students and Schoolchildren, Astrakhan, May 28-31, 2024 ; Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering]. – 2024. – №.1 (47). – Pp. 42–48.
16. Naimovich, D. V. Ehffektivnoe vnedrenie obucheniya yazyku promptov v obrazovatel'nyj protsess [Effective implementation of prompt language training into the educational process] // Upravlenie informatsionnymi resursami: Materialy XX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii Minsk, 29 marta 2024 goda [Information resource management: Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference, Minsk, March 29, 2024]. – Minsk : Akademiya upravleniya pri Prezidente Respubliki Belarus' [Academy of Management under the President of the Republic of Belarus], 2024. – Pp. 225–227.
17. Seydametova, Z. S. Prompty dlya obucheniya ehffektivnomu ispol'zovaniyu AI-generatorov koda [Prompts for training in effective use of AI code generators] / Z. S. Seydametova // Informatsionno-kompyuternye tekhnologii v ehkonomike, obrazovanii i sotsial'noy sfere [Information and computer technologies in economics, education and the social sphere]. – 2023. – №. 4 (42). – Pp. 86–93.
18. Issledovanie ehffektivnosti prompt-inzhiniringa i kvantovaniykh LLM v sozdani obrazovatel'nogo kontenta [A study of the effectiveness of industrial engineering and quantized LLM in the creation of educational content] / P. A. Schneider, A. V. Chernysheva, A. D. Nikiforova, A. I. Govorov // Inzheneriya. Iskusstvennyj intellekt. Khemoinformatica i khimicheskaya inzheneriya : Sbornik tezisov XIII Kongressa molodykh uchonykh, Sankt-Peterburg, 08–11 aprelya 2024 goda [Engineering. Artificial intelligence. Chemoinformatics and Chemical Engineering : Collection of abstracts of the XIII Congress of Young Scientists, St. Petersburg, 08-11 April 2024]. – Saint Petersburg : Natsional'nyj issledovatel'skij universitet ITMO [ITMO National Research University], 2024. – Pp. 303–304.
19. Gafner, A. I. Kommunikatsiya s nejrosetyami: prompt-inzhiniring v obrazovatel'nom prostranstve kak instrument vystroivaniya pedagogicheskogo soprovozhdeniya studentov [Communication with neural networks: industrial engineering in the educational space as a tool for building pedagogical support for students] / A. I. Gafner // Tsifrovaya pedagogika: ot didaktiki k pedagogicheskemu dizajnu : Materialy Vtoroj Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Ekaterinburg, 05–06 aprelya 2024 goda [Digital pedagogy: from didactics to pedagogical design : Proceedings of the Second All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, Yekaterinburg, 05-06 April 2024]. – Tyumen : TSU-Press, 2024. – Pp. 55–58.

DOI:10.54950/26585340\_2025\_2\_76

УДК 69

## Динамика изменения времени набора требуемой прочности клеевого анкера на основе цементного клея в результате применения электрогидравлического воздействия

Dynamics of Change in the Time of Gaining the Required Strength of an Adhesive Anchor Based on Cement Glue As a Result of Using Electrohydraulic Action

**Непомнящев Георгий Анатольевич**

Старший преподаватель, аспирант кафедры «Технология и организация строительства», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» (НГАСУ (Сибстрин)), Россия, 630008, Новосибирск, улица Ленинградская, 113, g.nepomnyachshev5942@sibstrin.ru

Nepomnyashchev Georgy Anatolyevich

Senior Lecturer, Postgraduate Student of the Department of Technology and Organization of Construction, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (NGASU (Sibstrin)), Russia, 630008, Novosibirsk, ulitsa Leningradskaya, 113, g.nepomnyachshev5942@sibstrin.ru

### Аннотация.

**Введение.** Настоящее исследование посвящено сокращению времени приобретения требуемой прочности клеевого анкера на основе цементного состава за счёт совершенствования технологического процесса, а именно – влияния электрогидравлического воздействия на скорость набора прочности клеевого состава.

**Материалы и методы.** С целью сокращения времени, необходимого для набора требуемой прочности анкера, стандартная технология устройства дополнена электрогидравлическим воздействием на клеевой состав, находящийся в анкерной скважине. Проведено исследование как образцов цементного камня на одноосное сжатие, так и анкера на вырыв.

**Результаты.** Применение электрогидравлического воздействия при устройстве клеевых анкеров позволяет сократить интервал времени, необходимый для достижения требуемых показателей прочности, с 7 до 2,8 суток, тем самым уменьшая сроки строительно-монтажных работ. Результат достигается

### Abstract.

**Introduction.** This study is devoted to reducing the time re-

quired for cement-based adhesive anchors to achieve the required strength by improving the process technology, namely, the effect

of electrohydraulic impact on the rate of adhesive strength gain.

**Materials and methods.** In order to reduce the time required for the anchor to achieve the required strength, the standard technology of the device is supplemented with electrohydraulic impact on the adhesive composition located in the anchor hole. A study was conducted of both cement stone samples for uniaxial compression and anchors for pull-out.

**Results.** The use of electrohydraulic impact in the installation of adhesive anchors makes it possible to reduce the time interval required to achieve the required strength indicators from 7 to 2.8 days, thereby reducing the time of construction and installation works. The result is achieved due to the impact effect on the cement-sand adhesive composition, which leads to an increase in the activity of the cement included in the adhesive composi-

### Введение

Клеевые анкеры применяются на большом количестве строительных объектов по всей территории Российской Федерации. В основной массе они представлены различными многокомпонентными химическими составами. Высокая потребность и использование химических составов характеризуются и большим спектром различных производителей, поставщиков: Hilti, Fisher, Tech-Krep, Stalmax, Mungo, Rawlplug, Sormat и др.

Основной объём продаж составляют химические анкеры, выполненные на основе полиэстеровых, винилэстеровых, эпоксиакрилатных, эпоксидных смол [1; 2].

Поставка составов осуществляется в различных тарах в виде ампул, картриджей и туб, в которых клеевой состав и отвердитель хранятся раздельно. Применение заключается в смешивании компонентов клеевого состава непосредственно в процессе укладки в скважину, в результате чего состав полимеризуется и приобретает необходимые прочностные показатели [3].

Хотя химические анкеры применяются повсеместно, они не лишены и недостатков, среди которых:

- 1) высокая стоимость состава;
- 2) необходимость тщательной очистки скважины от продуктов бурения, иногда сушка;
- 3) ограниченный срок годности клеевого состава;
- 4) экологическая опасность и токсичность для человека;
- 5) потери дорогостоящего клеевого состава при подготовке к вклейванию, связанные с обеспечением равномерности смешивания двух компонентов.

Однако известен состав, позволяющий компенсировать недостатки химических. Таковым является цементный клеевой состав, позволяющий посредством смешивания в необходимых пропорциях цемента, воды и песка (1:1:0,35) изготовить клеевой состав для вклейвания металлических элементов. Несмотря на все преимущества и простоту изготовления, такой состав не нашёл широкого применения на строительных площадках. Ключевой причиной отказа от такого состава в отрасли является длительный интервал времени приобретения прочности анкера, требуемой для включения выполненного узла в работу, т. е. интервал времени, отсчитываемый от момента смешивания компонентов и укладки в анкерную скважину до возможности монтажа конструкций, оборудования и изделий с применением изготовленного анкера. Время, требуемое для приобретения необходимых прочностных показателей, занимает от 7 до 28 суток и составляет 70 % набора прочности от R28, что в условиях сжатых сроков строительного производства является ключевым факто-

tion, allowing the required strength indicators to be achieved in a shorter time.

**Conclusions.** A method for installing an adhesive anchor using electrohydraulic action is proposed. Due to the application of the proposed method, the time required for gaining the required strength of the adhesive anchor is reduced. Thus, improving the technology for installing an adhesive anchor using electrohydraulic impact is a positive direction in the development of construction production technologies aimed at reducing the time of the assembly cycle of building structures.

**Keywords:** electrohydraulic impact; electrohydraulic shock; electrohydraulic effect; strength; strength gain rate; activation; anchor; rupture.

ром, влияющим на отказ от выбора строителями этого состава для производства строительно-монтажных работ.

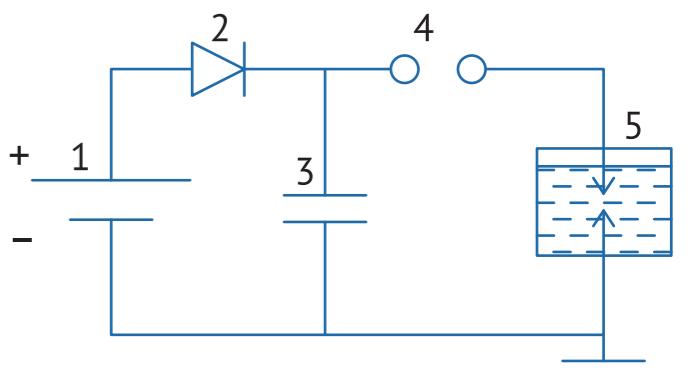
Для интенсификации процессов твердения цементных композиций известны различные способы: химические, механические, электрические, плазменные, тепловые, ультразвуковые [4–9]. Методы, главным образом, способствуют увеличению активной поверхности и приводят к аморфизации частиц цементного зерна [10].

Получить увеличение активной поверхности возможно также за счёт применения электрогидравлического воздействия (ЭГВ). Предлагаемое воздействие известно в различных отраслях промышленности – начиная от дробления рудных материалов и заканчивая штамповкой металлических изделий [11]. В строительстве оно применялось для очищения и дробления компонентов бетонов, дробления различных материалов [12–14].

Таким образом, анализ научно-технической литературы показывает, что применение ЭГВ в технологии устройства клеевых анкеров может сократить время набора требуемой прочности для обеспечения надёжной работы выполненного узла в сжатые сроки монтажного цикла. Это эквивалент химических анкеров, но существенно дешевле.

Цель данной работы – исследование влияния ЭГВ на время набора требуемой прочности цементным клеевым составом при устройстве анкера.

Задачи работы:



**Рис. 1.** Принципиальная схема установки электроимпульсной обработки цементно-песчаного клеевого состава: 1 – источник высокого напряжения, 2 – высоковольтный диод, 3 – заряжаемые конденсаторы, 4 – воздушный разрядник, 5 – реактор активации, заполненный цементным клеевым составом

**Fig. 1.** Schematic diagram of the installation for electric pulse processing of cement-sand adhesive composition: 1 – high voltage source, 2 – high voltage diode, 3 – charged capacitors, 4 – air discharger, 5 – activation reactor filled with cement adhesive composition

- Исследовать эффективность применения ЭГВ на цементный kleевой состав с целью сокращения времени набора требуемых прочностных показателей на одноосное сжатие образцов цементного камня.
- Исследовать сокращение интервала времени, необходимого для приобретения прочности kleевым составом анкера, от момента изготовления до включения его в работу благодаря применению ЭГВ.

#### Материалы и методы

В целях сокращения сроков приобретения требуемой прочности kleевого анкера разработана принципиальная электрическая схема установки, позволяющая осуществлять активацию в построенных условиях, обеспечивая удобство транспортировки оборудования и эффективность процесса. Принципиальная электрическая схема представлена на рисунке 1 [15].

Установка работает от автомобильного аккумулятора и имеет общие габариты не более стандартной ручной клади, что облегчает процесс активации и транспортировки, перемещения оборудования на строительной площадке.

В качестве состава цементного kleя приняты следующие пропорции его компонентов: цемент 1: песок 1: вода 0,35. Все компоненты тщательно перемешивались до достижения однородной консистенции. Портландцемент принят М400 ЦЕМ II 32,5 по ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия». Песок строительный сеянный с размером фракции до 0,1 мм по ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».

Для решения поставленных целей и задач выполнены две серии экспериментальных исследований:

- Применение ЭГВ на цементный kleевой состав в лабораторных условиях с последующим испытанием на одноосное сжатие образцов цементного камня;
- Применение ЭГВ в анкерной скважине в условиях строительной площадки с последующим испытанием анкера на вырыв в различном возрасте набора прочности (1, 3, 7 суток).

#### Испытание на вырыв анкера на основе цементного kleевого состава

Вторая серия экспериментов проводилась с целью оценки необходимого временного интервала приобретения прочности, сверки результатов первой серии и подтверждения эффективности применения ЭГВ в условиях строительной площадки.

Предлагаемая методика устройства kleевого анкера на основе цементного kleя с применением ЭГВ заключается в следующей технологической последовательности:

- выполнение, очистка и смачивание скважины;
  - заполнение скважины цементно-песчаным kleевым составом;
  - установка высоковольтных электродов в заполненную цементно-песчаным kleевым составом скважину;
  - выполнение электрогидравлического удара с последующим извлечением высоковольтных электродов из скважины;
  - установка металлической анкерной шпильки или болта в скважину с использованием перфоратора.
- Установочные параметры анкера составляют:
- шпилька диаметром 12 мм;
  - диаметр скважины 12 + 2 мм (14 мм);
  - глубина скважины 12 \* 10 = 120 мм.

Испытания анкеров на вырывающие усилия проводились с применением гидравлического домкрата в запланированные интервалы времени твердения, которые составляли 1 сутки, 3 суток, 7 суток.

Разрушение анкера в процессе испытания происходит по kleевому составу или по телу анкерной шпильки (рисунок 6).

Рис. 2. Изображение реактора активации: а) без цементного kleевого состава; б) заполненного цементным kleевым составом

Fig. 2. Image of the activation reactor: a) without cement adhesive composition; b) filled with cement adhesive composition

Диаметр анкерной шпильки, см	Диаметр скважины, см	Глубина скважины, см	Принятый объём, см <sup>3</sup>
1,8	2,0	20	15,71
3,0	3,2	30	40,21
4,8	5,0	48	98,17

Табл. 1. Принятые зависимости объёма реактора активации  
Tab. 1. Accepted dependences of the volume of the activation reactor

тыаемому объёму при учёте диаметра анкерной скважины с учётом её заполнения и вытеснения kleевого состава при погружении анкерной шпильки в скважину. Глубина анкерной скважины принята равной 10 диаметрам скважины [16].

Для получения объективных прогнозных данных ЭГВ выполнялось при различных комбинациях основных факторов, а именно:

- 1) энергия (35, 70, 105 Дж);
- 2) объём (15,71, 40,21, 98,17 см<sup>3</sup>).

По окончании проведения основного этапа обработки и укладки образцов в формы цементный камень твердели при нормальных условиях (при влажности 80–100 %, температуре 20±2 °C).

После достижения образцами возраста 1 суток проводятся испытания на одноосное сжатие для оценки усилия, приводящего к разрушению полученных образцов цементного камня. Испытания проводятся по ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием пулевого песка».

#### Испытание на вырыв анкера на основе цементного kleевого состава

Вторая серия экспериментов проводилась с целью оценки необходимого временного интервала приобретения прочности, сверки результатов первой серии и подтверждения эффективности применения ЭГВ в условиях строительной площадки.

Предлагаемая методика устройства kleевого анкера на основе цементного kleя с применением ЭГВ заключается в следующей технологической последовательности:

- выполнение, очистка и смачивание скважины;
- заполнение скважины цементно-песчаным kleевым составом;
- установка высоковольтных электродов в заполненную цементно-песчаным kleевым составом скважину;
- выполнение электрогидравлического удара с последующим извлечением высоковольтных электродов из скважины;
- установка металлической анкерной шпильки или болта в скважину с использованием перфоратора.

Установочные параметры анкера составляют:

- шпилька диаметром 12 мм;
- диаметр скважины 12 + 2 мм (14 мм);
- глубина скважины 12 \* 10 = 120 мм.

Испытания анкеров на вырывающие усилия проводились с применением гидравлического домкрата в запланированные интервалы времени твердения, которые составляли 1 сутки, 3 суток, 7 суток.

Разрушение анкера в процессе испытания происходит по kleевому составу или по телу анкерной шпильки (рисунок 6).

Рис. 2. Изображение реактора активации: а) без цементного kleевого состава; б) заполненного цементным kleевым составом

Fig. 2. Image of the activation reactor: a) without cement adhesive composition; b) filled with cement adhesive composition

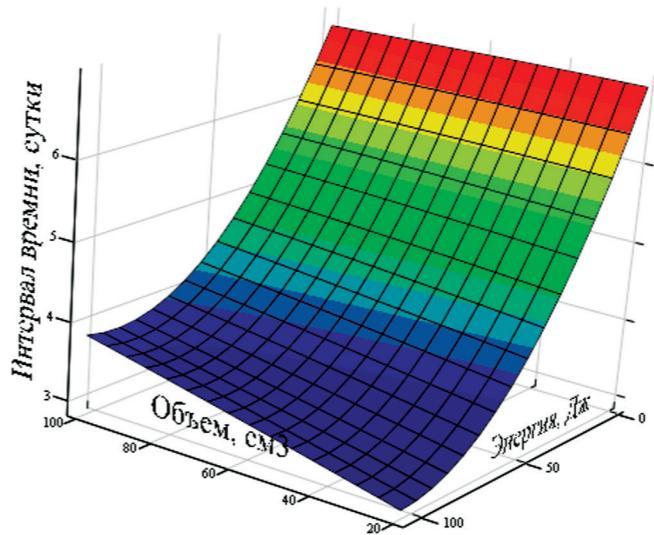


Рис. 3. Графическая интерпретация математической модели, отражающая зависимость количества энергии применяемого для обработки раствора, объёма обрабатываемого раствора и интервала времени, необходимого для приобретения требуемой прочности

Fig. 3. Graphic interpretation of the mathematical model, reflecting the dependence of the amount of energy used to process the solution, the volume of the solution being processed, and the time interval required to acquire the required strength

Разрушение по kleевому составу (рисунок 6б) соответствует выходу анкера из скважины и характеризует недостаточную прочность, набранную анкером.

Обрыв анкерной шпильки (рисунок 6а) характеризует превышение прочности kleевого состава по сравнению с прочностью металлической шпильки, что позволяет утверждать о наборе требуемой прочности kleевого анкера.

Испытания анкеров выполнены в соответствии с ГОСТ 58387-2019 «Анкеры kleевые для крепления в бетон. Методы испытаний».

#### Результаты

В результате проведённых исследований установлено, что применение ЭГВ приводит к снижению интервала времени, необходимого для приобретения требуемых прочностных показателей. За требуемые прочностные показатели принято значение, равное 70 % от прочности

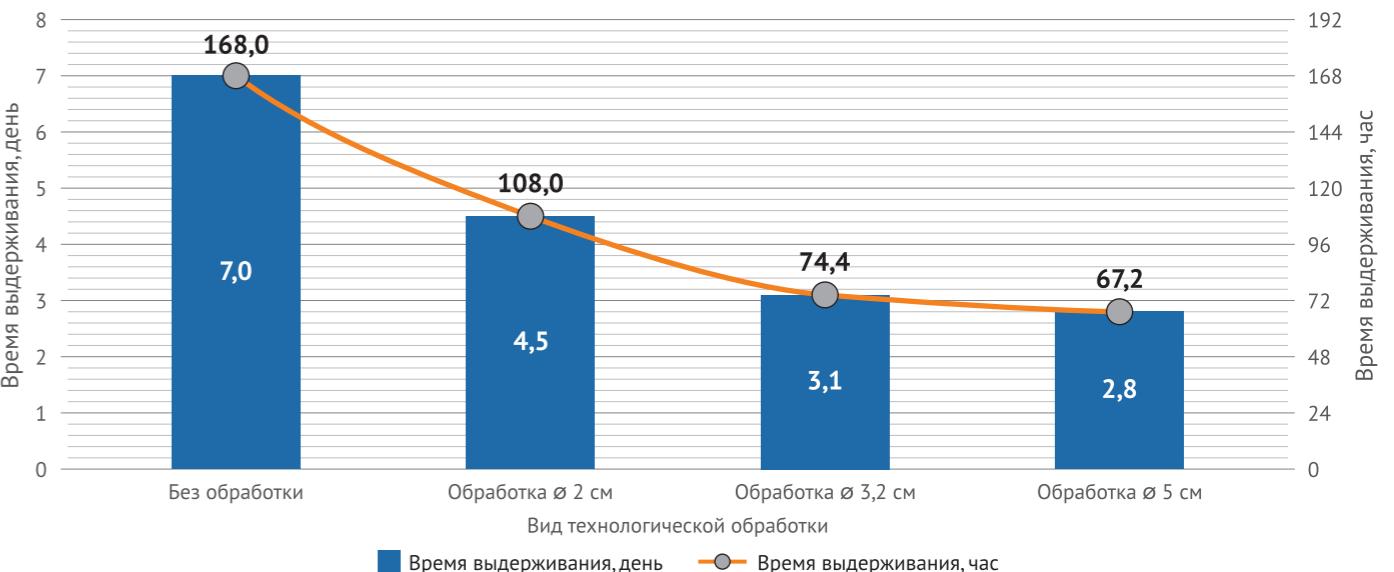


Рис. 4. График, показывающий необходимый интервал времени набора требуемых прочностных показателей kleевого состава в зависимости от технологического воздействия при энергии 105 Дж  
Fig. 4. Graph showing the required time interval for achieving the required strength properties of the adhesive composition depending on the technological impact at an energy of 105 J

R28 цементного камня, выполненного без применения ЭГВ в соответствии с рекомендациями [16] и требованиями СП 70.13330.2012. При стандартных условиях сроки выдерживания выполненных анкеров составляют от 7 суток, или 168 часов.

На основе полученных экспериментальных данных представлена многофакторная математическая модель (рисунок 3), наглядно демонстрирующая влияние применения ЭГВ с целью сокращения требуемого времени твердения, а именно показывающая зависимость времени, необходимого для приобретения требуемой прочности, от количества энергии (Дж) и обрабатываемого объёма (мм). Модель может быть представлена уравнением многофакторной регрессии (формула 1):

$$y = 6.9743 - 0.000338 * x_1 - 0.078986 * x_2 + 0.000007 * x_1^2 + 0.000363 * x_2^2 + 0.000120 * x_1 * x_2, \quad (1)$$

где,  $y$  – требуемый интервал времени от изготовления анкера до включения его в работу;  $x_1$  – объём обрабатываемого kleевого состава, см<sup>3</sup>;  $x_2$  – энергия, затрачиваемая на выполнение ЭГВ, Дж.

Границными условиями приняты значения объёма от 15 до 100 см<sup>3</sup>, количества энергии от 0 до 105 Дж. Коэффициент детерминации полученного уравнения составляет  $R^2 = 0,98$ , критерий Фишера <0,05, модель является значимой.

Можно утверждать, что электрогидравлический эффект позволяет интенсифицировать время приобретения прочностных показателей цементным kleевым составом. Необходимые интервалы времени набора требуемой прочности при использовании энергии ЭГВ, равной 105 Дж, представлены на рисунке 4, на рисунке 5 показано кратность сокращения времени приобретения требуемой прочности с применением ЭГВ и без него.

Лучший результат позволяет сократить интервал времени выдерживания с 7 суток (168 часов) до 2,8 суток (67,2 часов), что соответствует сокращению времени до 2,5 раз.

Полученные образцы цементного камня подверглись сканирующей электронной микроскопии с применением растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 XVP, расположенного в научно-образовательном

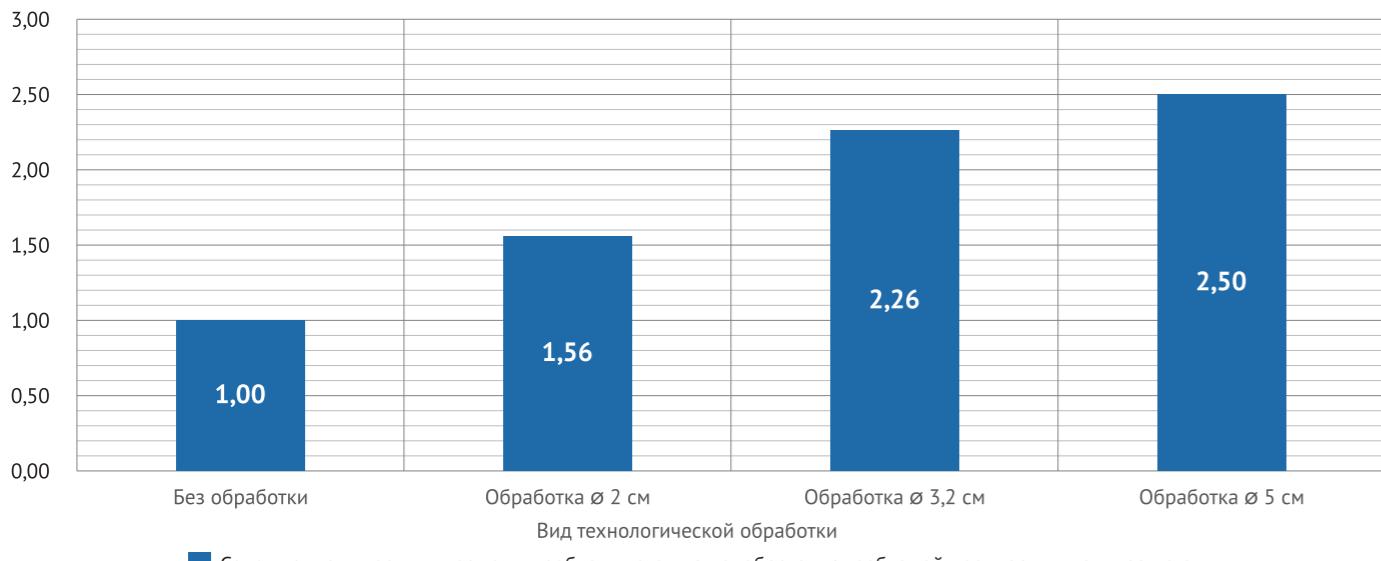


Рис. 5. График сокращения времени набора требуемых прочностных показателей клеевого состава в зависимости от технологического воздействия

Fig. 5. Graph of reduction in time for achieving the required strength indicators of the adhesive composition depending on the technological impact

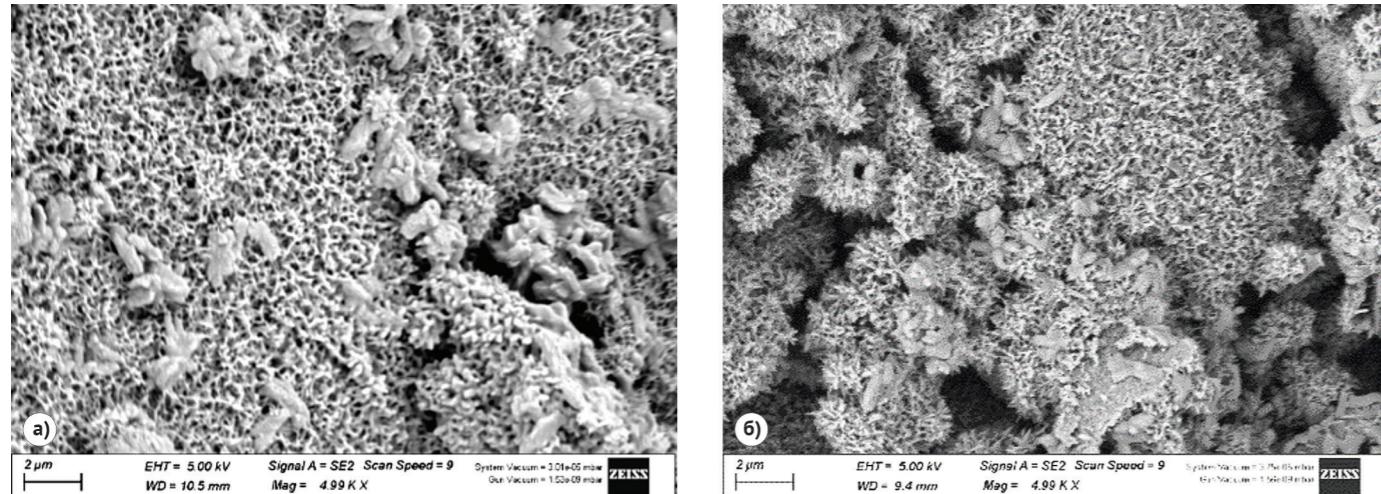


Рис. 6. Изображение микроструктуры цементного камня (увеличение в 4,99 тысяч раз): а) выполненного с применением ЭГВ; б) выполненного без применения ЭГВ

Fig. 6. Image of the macrostructure of cement stone (magnification 4.99 thousand times): a) made with the use of EHI; b) made without the use of EHI

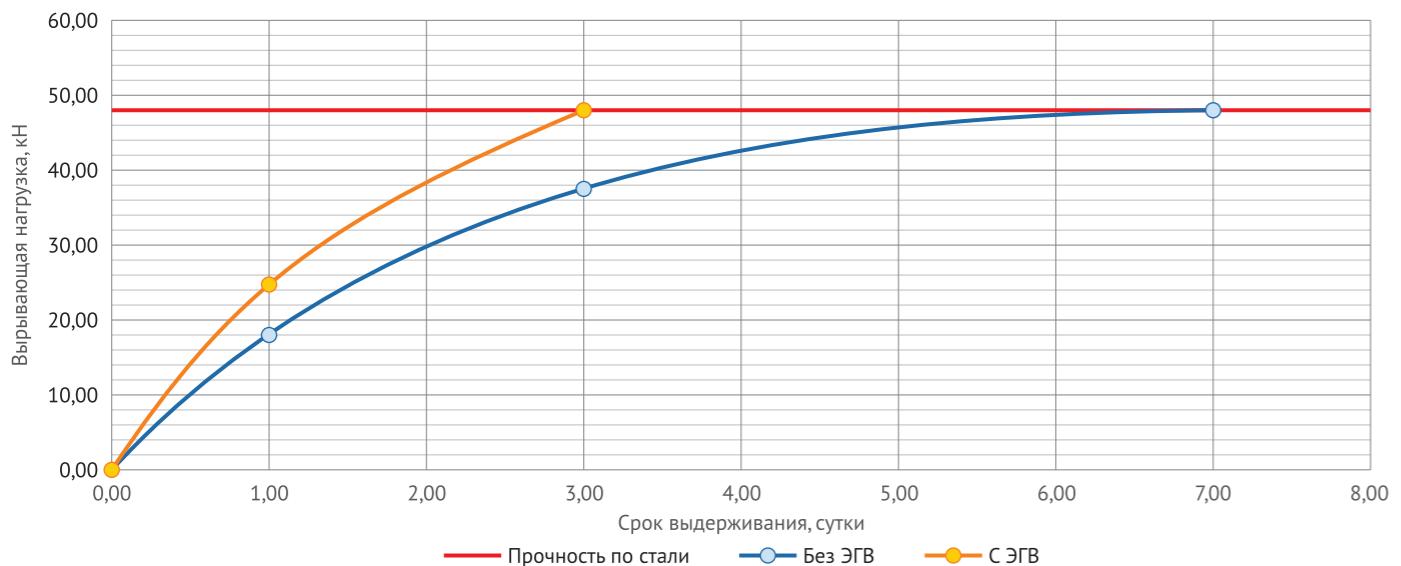


Рис. 7. Результаты натурных испытаний анкерных креплений, выполненных с применением ЭГВ и без применения ЭГВ

Fig. 7. Results of full-scale tests of anchor fastenings performed with and without the use of EHI



Рис. 8. Основные виды разрушения клеевого анкера: а) по телу анкерной шпильки (по стали), б) по клеевому составу (в зоне контакта зрелого бетона и клеевого состава)

Fig. 8. Main types of destruction of adhesive anchor: a) along the body of the anchor stud (along steel), b) along the adhesive composition (the contact zone of mature concrete and the adhesive composition)

центре на базе механико-технологического факультета ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НЭТИ), для оценки изменения микроструктуры в результате применения ЭГВ. Изображения микроструктуры представлены на рисунке 6.

Можно констатировать, что при применении ЭГВ получаем поверхность цементного камня с более плотной и однородной структурой. Наблюдаются более мелкие поры, отличающиеся равномерным распределением. Отсутствуют крупные конгломераты, по поверхности равномерно распределены более мелкие элементы.

При выполнении натурных испытаний непосредственно анкеров на вырывающее усилие из бетонного основания получены данные, подтверждающие эффективность применения ЭГВ при устройстве клеевых анкеров (рисунок 7).

При проведении испытаний анкеров, выдержанных в течение 1, 3, 7 суток, произошло разрушение как по стали, так и по клеевому составу.

Анализируя данные, представленные на рисунке 7, можно констатировать высокую эффективность применения ЭГВ при устройстве клеевого анкера с целью сокращения времени, требуемого для приобретения необходимой прочности, соответствующей 70 % от R28 цементного камня, не подвергшегося воздействию.

Так, при проведении испытаний на вырывающее усилие разрушение по клеевому составу произошло для цементного клеевого состава, подвергнувшемуся ЭГВ в возрасте 1 суток, а без воздействия – в 1,3 суток. Разрушение по телу анкерной шпильки произошло при применении

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Химические анкеры и аксессуары, ассортиментная линейка 2024 / Группа компаний TECH-KREP : [официальный сайт]. – URL : <https://tech-krep.com/> (дата обращения: 01.09.2024).
- Клементьев, С. В. Что мы знаем об анкерах и дюбелях? / С. В. Клементьев. – Волгоград : ООО "ОРВИЛ", 2004. – 39 с.
- Техническая документация: протоколы испытаний и паспорта : Анкеры химические / STALMAX : [официальный сайт]. – URL: [https://stalmax.ru/tehnicheskaya-dokumentaciya#\\_lp\\_block\\_213482508](https://stalmax.ru/tehnicheskaya-dokumentaciya#_lp_block_213482508) (дата обращения: 01.09.2024).
- Strengthening effect of concrete beams using ultra-rapid-hardening fiber-reinforced mortar under flexure / Ch. Booki,

- O. Taekgeun, Y. S. Jang, L. Segunkyun, J.-H. Lee, D.-Y. Yoo. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.129064 // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 352. – Art. 129064.
5. Bond performance between substrate concrete and repair mortar. Effect of carbon fibre and expansive agent / Sh. Feng, H. Xiao, R. Zhang, Ch. Yang. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.118830 // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 250. – Art. 118830.
6. Raza, A. Digital image processing for precise evalution of concrete crack repair using bio-inspired strategies / A. Raza, R.A.Khushnood. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.128863 // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 350. – Art. 128863.
7. Ильина, Л. В. Цементные растворы с тонкодисперсными минеральными добавками / Л. В. Ильина, А. И. Кудяков, А. К. Туляганов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2019. – № 12 (732). – С. 32–43.
8. Разработка составов высокопрочных амоплотняющихся бетонов на основе комплексных модификаторов / С.-А. Ю. Муртазаев, М. Ш. Саламанова, М. С. Куразов, М. И. Индарбаев, Р. А. Эльмураев // Устойчивое развитие науки и образования. – 2017. – № 11. – С. 102–108.
9. Оценка возможности применения электротепловой обработки бетона токами повышенной частоты для изготовления шахт лифта при возведении высотных зданий / С. В. Федосов, Т. Е. Шадриков, А. М. Соколов, Н. В. Красносельских // Молодые учёные – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2020. – № 1. – С. 614–616.
10. Прочность композитов на основе сырьевых компонентов, REFERENCES
1. Khimicheskie ankery i aksessuary, assortimentnaya linejka 2024 [Chemical anchors and accessories, product line 2024] / Gruppa kompanij TECH-KREP [TECH-KREP Group of Companies] : [official website]. – URL: <https://tech-krep.com/> (date of access: 01.09.2024).
2. Tekhnicheskaya dokumentatsiya: protokoly ispytanij i pasporta : Ankery khimicheskie [Technical documentation: test reports and passports : Chemical anchors] / STALMAX : [official website]. – URL: [https://stalmax.ru/tehnicheskaya-dokumentaciya#\\_lp\\_block\\_213482508](https://stalmax.ru/tehnicheskaya-dokumentaciya#_lp_block_213482508) (date of reference: 09/01/2024).
3. Klementyev, S. V. Chto my znaem ob ankerakh i dyubelyakh? [What do we know about anchors and dowels?] / S. V. Klementyev. – Volgograd : OOO "ORVIL", 2004. – 39 p.
4. Strengthening effect of concrete beams using ultra-rapid-hardening fiber-reinforced mortar under flexure / Ch. Booki, O. Taekgeun, Y. S. Jang, L. Segunkyun, J.-H. Lee, D.-Y. Yoo. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.129064 // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 352. – Art. 129064.
5. Bond performance between substrate concrete and repair mortar. Effect of carbon fibre and expansive agent / Sh. Feng, H. Xiao, R. Zhang, Ch. Yang. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.118830 // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 250. – Art. 118830.
6. Raza, A. Digital image processing for precise evalution of concrete crack repair using bio-inspired strategies / A. Raza, R.A.Khushnood. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.128863 // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 350. – Art. 128863.
7. Ильина, Л. В. Цементные растворы с тонкодисперсными минеральными добавками [Cement mortars with finely dispersed mineral additives] / L. V. Ilyina, A. I. Kudaykov, A. K. Tulyaganov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo [News of higher educational institutions. Construction]. – 2019. – № 12 (732). – Pp. 32–43.
8. Razrabotka sostavov vysokoprochnykh amoplotnyayushikhysa betonov na osnove kompleksnykh modifikatorov [Development of compositions of high-strength self-compacting concrete based on complex modifiers] / S.-A. Y. Murtazaev, прошедших плазменную или механомагнитную активацию / Р. А. Ибрагимов, Г. В. Налбандян, В. А. Ушков, Е. В. Королев, Л. И. Зигангирова // Строительное производство. – 2024. – № 4. – С. 41–46.
11. Юткин, Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин // Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. – 253 с.
12. Сафонов, В. Н. Электрофизические технологии в производстве строительных материалов / В. Н. Сафонов. – Издательство Томск : ТГАСУ, 2014. – 420 с.
13. Активация цементных растворов электрическими разрядами / В. И. Курец, Г. Л. Лобанова, Г. П. Филатов, А. Ю. Юшков // Электронная обработка материалов. – 2003. – № 1. – С. 76–80.
14. Семкин, Б. В. Основы электроимпульсного разрушения материалов / Б. В. Семкин, А. Ф. Усов, В. И. Курец; под. ред. Н. П. Тузова. – Санкт-Петербург : Наука, 1995. – 276 с.
15. Патент № 2769495 Российской Федерации, МПК C04B 40/00 (2006.01). Способ активации цементной суспензии : № 2021110875 : заявл. 15.04.2021 : опубл. 01.04.2022 : Byul. № 10 / М. М. Титов, Г. А. Непомнящев, Д. А. Дорофеева ; заявитель НГАСУ (Сибстрин).
16. Пособие по проектированию анкерных болтов для крепления строительных конструкций и оборудования (к СНиП 2.09.03) : МДС 31-4.2000 / Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений (ЦНИИПромзданий). – Москва : ЦНИИПромзданий, 2001. – 107 с.

M. S. Salamanova, M. S. Kurazov, M. I. Indarbaev, R. A. Elmurzaev // Ustoichivoe razvitiye nauki i obrazovaniya [Sustainable development of science and education]. – 2017. – № 11. – Pp. 102–108.

9. Otsenka vozmozhnosti primeneniya ehlektroteplovojo obrabotki betona tokami povyshennoj chastoty dlya izgotovleniya shakht lifta pri vozvedenii vysotnykh zdaniy [Assessment of the possibility of using electrothermal treatment of concrete with high-frequency currents for the manufacture of elevator shafts in the construction of high-rise buildings] / S. V. Fedosov, T. E. Shadrikov, A. M. Sokolov, N. V. Krasnoselskikh // Molyude uchyonye – razvitiyu Natsional'noj tekhnologicheskoy initsiativy (POISK) [Young scientists - for the development of the National Technological Initiative (POISK)]. – 2020. – № 1. – Pp. 614–616.

10. Prochnost' kompozitov na osnove syr'evykh komponentov, proshedshikh plazmennuyu ili mekhanomagnitnuyu aktivatsiyu [Strength of composites based on raw materials that have undergone plasma or mechanomagnetic activation] / R. A. Ibragimov, G. V. Nalbandian, V. A. Ushkov, E. V. Korolev, L. I. Zigangirova // Stroitel'noe proizvodstvo [Construction production]. – 2024. – № 4. – Pp. 41–46.

11. Yutkin, L. A. Ehlektrigidravlicheskiy effekt i ego primenie v promyshlennosti [Electrohydraulic effect and its application in industry] / L. A. Yutkin. – Leningrad : Mashinostroenie, Leningradskoe otdelenie [Mashinostroenie, Leningrad Branch], 1986. – 253 p.

12. Safronov, V. N. Ehlektrofizicheskie tekhnologii v proizvodstve stroitel'nykh materialov [Electrophysical Technologies in the Production of Building Materials] / V. N. Safronov. – Tomsk : TGASU Publishing House, 2014. – 420 p.

13. Aktivatsiya tsementnykh rastvorov ehlektricheskimi razryadami [Activation of Cement Mortars by Electric Discharges] / V. I. Kurets, G. L. Lobanova, G. P. Filatov, A. Yu. Yushkov // Ehlektronnaya obrabotka materialov [Electronic Processing of Materials]. – 2003. – № 1. – Pp. 76–80.

14. Semkin, B. V. Osnovy ehlektrouimpul'snogo razrusheniya materialov [Fundamentals of Electropulse Destruction of Materials] / B. V. Semkin, A. F. Usov, V. I. Kurets; ed. by N. P. Tuzov. –

St. Petersburg : Nauka, 1995. – 276 p.

15. Patent № 2769495 Rossijskaya federatsiya, MPK C04B 40/00 (2006.01) [Patent No. 2769495 Russian Federation, IPC C04B 40/00 (2006.01)]. Sposob aktivatsii tsementnoj suspenzii : № 2021110875 : заявл. 15.04.2021 : опубл. 01.04.2022 : Byul. № 10 [Method for activating a cement suspension : No. 2021110875 : declared 15.04.2021:published 01.04.2022 : Bulletin No. 10] / M. M. Titov, G. A. Nepomnyashchev, D. A. Doroфеева ; заявител' [applicant] NGASU (Sibstrin).

## УДК 69.05

### Особенности оценки контроля качества смонтированных светопрозрачных конструкций

Features of Assessing the Quality Control of Mounted Translucent Structures

Перунов Александр Сергеевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Испытания сооружений», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, PerunovAS@mgsu.ru

Perunov Aleksander Sergeevich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Testing of Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, PerunovAS@mgsu.ru

Шаргородская Оксана Владимировна

Магистрант, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, oksick@list.ru

Shargorodskaya Oksana Vladimirovna

Master's student, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, oksick@list.ru

#### Аннотация.

В статье выполнен анализ вопросов, относящихся к выявлению и оценке рисков при изменении в ходе строительства характеристик светопрозрачных конструкций по сравнению с принятыми в проектной документации решениями.

Цель работы – анализ влияния изменений отдельных характеристик (параметров) светопрозрачных конструкций на условия среды обитания человека; определение перечня характеристик светопрозрачных конструкций, изменение которых должно быть оценено на соответствие санитарно-эпидемиологическим требованиям и требованиям проектной документации в рамках строительного контроля.

Для выполнения исследования приняты специальные методы исследования. Степень влияния изменения параметров стеклопакетов выполнена на основании утверждённых методик расчётов. Также использованы общие методы исследования – анализ, сравнение, обобщение. При работе были изучены диссертации и исследования, посвящённые оценке влияния параметров стеклопакетов на нормируемые показатели (коэффициент естественной освещённости, шум).

В теоретической значимость работы заключается в углублённом понимании всех аспектов действующего законодательства при выполнении строительного контроля. Практическая значимость работы заключается в уменьшении потенциальных рисков несоответствия санитарным нормам параметров естественного освещения, инсоляции и шума при изменениях в светопрозрачных конструкциях.

В результате проведённого исследования разработана оптимизированная структура строительного контроля при монтаже светопрозрачных конструкций. На примере оценки коэффициента естественной освещённости выявлены определённые характеристики (параметры) светопрозрачных конструкций, изменение которых может повлиять на условия среды обитания человека.

**Ключевые слова:** строительный контроль; светопрозрачные конструкции; естественное освещение; санитарные нормы и правила.

The article analyzes issues related to the identification and assessment of risks in case of changes in the characteristics of translucent structures during construction compared with the decisions taken in the design documentation.

The purpose of the work is to analyze the effect of changes in certain characteristics (parameters) of translucent structures on human living conditions; to determine the list of characteristics of translucent structures, the change of which should be evaluated for compliance with sanitary and epidemiological requirements and requirements of design documentation within the framework of construction control.

Special research methods have been adopted to carry out the study. The degree of influence of changes in the parameters of

16. Posobie po proektirovaniyu ankernykh boltov dlya krepeleniya stroitel'nykh konstruktsij i oborudovaniya (k SNiP 2.09.03) : MDS 31-4.2000 [Manual on the design of anchor bolts for fastening building structures and equipment (to SNiP 2.09.03) : MDS 31-4.2000] / Tsentral'nyj nauchno-issledovatel'skij i proektno-eksperimental'nyj institut promyshlennikh zdanij i sooruzhenij (TSNIIpromzdanij) [Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures (Tsniipromzdanij)]. – Moscow : TSNIIpromzdanij, 2001. – 107 p.

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_83

the coefficient of natural illumination, the characteristics (parameters) of translucent structures have been identified, changes in which can affect human living conditions.

## Введение

В соответствии с Градостроительным кодексом Российской Федерации [1], проектная документация должна соответствовать в том числе и требованиям, изложенным в санитарных правилах.

В статье 1 Федерального закона «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» [2] указано, что требования, приведённые в санитарных правилах, являются обязательными к выполнению и обеспечивают защиту здоровья населения и безопасные условия для жизни и деятельности при воздействии факторов среды обитания. Тем самым, все утверждённые санитарные правила и нормы (так называемые СанПиНы) являются обязательными к исполнению на территории Российской Федерации.

Строительный контроль является обязательным элементом градостроительной деятельности, регламентированного законодательством [3; 4]. Строительный контроль проводится на всех этапах строительства, в том числе с целью оценки соответствия выполняемых работ решениям утверждённой проектной документации.

Известно, что критичными являются изменения, которые внесены в ходе строительства в конструктивные решения здания. Действительно, конструктивные решения влияют на обеспечение механической безопасности построенного здания. При этом для обеспечения безопасности здоровья человека условий проживания и пребывания в зданиях при проектировании и строительстве необходимо выполнять требования санитарных норм и правил.

На основании положений статьи 49 Градостроительного кодекса (пункт 3.8) повторную экспертизу можно не осуществлять в части изменений, внесённых в проектную документацию, которая уже получила положительное за-

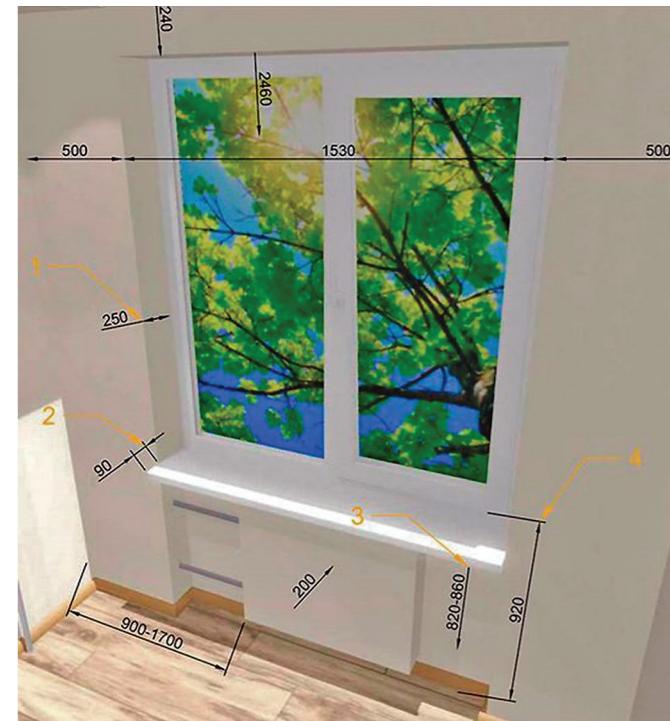


Рис. 1. Определение габаритов оконных конструкций  
Fig. 1. Determining the dimensions of window structures

**Keywords:** construction control; translucent structures; natural lighting; sanitary burrows and rules.

ключение, если они не приводят к нарушениям в том числе санитарно-эпидемиологических требований.

## Материалы и методы

При выполнении работы приняты специальные методы исследования. Степень влияния изменения параметров стеклопакетов выполнена на основании утверждённых методик расчётов. Также использованы общие методы исследования – анализ, сравнение, обобщение.

## Результаты

С учётом строительства в плотной городской застройке, близости транспортных магистралей [5], приэроднодромных территорий [6], климатических особенностей [7] изменения некоторых характеристик (параметров) светопрозрачных конструкций (далее – СПК), принятые в процессе строительства, могут привести к грубым нарушениям санитарно-эпидемиологических требований. Основными рисками при изменениях характеристик светопрозрачных конструкций могут являться: несоответствующие санитарным нормам параметры естественной освещённости, инсоляции и шума.

Определение параметров светопрозрачных конструкций для обеспечения коэффициента естественной освещённости (далее – КЕО), инсоляции, требуемой защиты от шума [8; 9] выполняется в проектной документации. Изменения габаритов оконных проёмов (рисунок 1), коэффициентов светопропускания стёкол [10], изменения размеров переплётов, количества камер и заполнения межстекольных промежутков, принятые в процессе строительства, могут привести к нарушениям положений санитарного законодательства.

Строительный контроль при монтаже оконных (балконных) светопрозрачных блоков включает в себя входной контроль, операционный, приёмочный, а также лабораторный и геодезический контроль, авторский надзор [11].

При осуществлении работ по устройству светопрозрачных конструкций подрядчик выполняет входной контроль проектной и рабочей документации.

Светопрозрачные конструкции по всем без исключения параметрам должны соответствовать показателям, приведённым в проектной и рабочей документации.

Во время входного контроля оцениваются поступающие строительные материалы и изделия [12]. Указанные материалы только после надлежащей проверки могут использоваться далее в процессе монтажа. Контролю подлежит качество применяемой продукции в соответствии с требованиями стандартов, технических регламентов и условий. Также при входном контроле проводится проверка достаточности сопроводительной документации к строительным материалам. Верифицируются следующие параметры передаваемых поставщиками документов: комплектность, достоверность и содержание.

Важным аспектом входного контроля является оценка правильности транспортировки и хранения материалов. Особое внимание уделяется перевозке и хранению изоляционных материалов, используемых при монтаже светопрозрачных конструкций. Корректное обращение с тепло-, паро-, влагозоляционными материалами следу-

№ пп.	Наименование	Описание
1	Акт приёма фронта работ	Документ, подтверждающий завершение определённого этапа работ и их соответствие установленным требованиям
2	Документ, подтверждающий контроль качества материалов	Акты, сертификаты и иные утверждённые документы, которые устанавливают, что применяемые материалы соответствуют стандартам и требованиям
3	АОСР (акт освидетельствования скрытых работ)	Форма, подтверждающая требуемое качество и соответствие скрытых конструкций, которые не могут подлежать осмотру после завершения комплекса последующих работ
4	Набор рабочих чертежей	Чертежи с отметками о соответствии работ и сооружений исходным проектным решениям или официально внесённым изменениям
5	Исполнительная геодезическая схема	Схема с фактическим положением конструкций строящегося здания/сооружения
6	Результаты обследований, экспертиз, исследований	Документы, подтверждающие качество выполненных работ, выполненные профильными организациями
7	Иные документы	Прочие документальные материалы, доказывающие фактическое надлежащее исполнение проектных решений, которые могут требоваться для завершения строительства

Табл. 1. Исполнительная документация при монтаже светопрозрачных конструкций  
Tab. 1. Executive documentation for the installation of translucent structures

ет осуществлять только с соблюдением соответствующих стандартов.

При строительстве нового здания необходимо иметь документальное подтверждение соответствия размещения стеновых проёмов утверждённым решениям в проектной документации. При приёме фронта работ подрядчик знакомится с геодезической исполнительной документацией. При производстве работ также осуществляют геодезический контроль планово-высотного положения оконного блока. Геодезический контроль, в том числе исполнительные геодезические съёмки, выполняет застройщик (заказчик).

При операционном контроле в режиме онлайн подрядчиком осуществляется проверка хода выполнения монтажных работ при устройстве светопрозрачных конструкций. Заказчик (застройщик) в процессе производства работ выявляет нарушения и дефекты в конструкциях. Замечания вносят в общий и специальный журналы работ. В сферу полномочий заказчика (застройщика) входит контроль сроков устранения обнаруженных недостатков.

Подрядчик в обязательном порядке постоянно следит и за соблюдением требований безопасности труда.

При лабораторном контроле, осуществляющем аккредитованными в установленном порядке испытательными лабораториями, проверяется соответствие материалов и изделий стандартам и техническим условиям. Соблюдение температурно-влажностных режимов во время монтажа является особенно важным для обеспечения эффективности и прочности изоляционных материалов. При лабораторном контроле ведутся журналы регистрации, готовятся акты о соответствии (несоответствии) поступающих материалов и изделий установленным требованиям.

Подрядчик несёт ответственность за предъявление смонтированных конструкций (надлежащего качества), которые не могут быть проверены по завершении последующих видов работ. Организация, занимающаяся монтажом окон и балконных дверей, заблаговременно сообщает заказчику (застройщику) и представителям органов государственного строительного надзора о планируемой дате сдачи конструкций. Не позднее чем за три рабочих дня до начала оценки должно быть выполнено информирование всех участников строительного процесса.

Исполнительная документация, ведение которой является обязательным элементом для подрядчика, осуществляющего монтаж светопрозрачных конструкций,

играет особую роль в обеспечении качества и соответствия выполненных работ установленным требованиям. Основные элементы такой документации приведены в таблице 1.

Ведение исполнительной документации обеспечивает контроль за качеством выполнения работ, а также оно необходимо для дальнейшей эксплуатации объекта.

Выявленные в ходе строительного контроля отклонения характеристик светопрозрачных конструкций (от проектных решений) могут повлиять на условия среды обитания человека.

В проектной документации определение габаритов световых проёмов и характеристик светопропускающих материалов учитывает множество факторов [13].

Для различных типов зданий (жилые, учебные, лечебно-профилактические учреждения и т. д.) существуют нормы, определяющие минимальное значение КЕО, необходимое для безопасного пребывания людей.

В проектной документации выбор габаритов световых проёмов и характеристик светопропускающих материалов осуществляется с учётом множества разнонаправленных факторов. Оцениваются требования к естественному

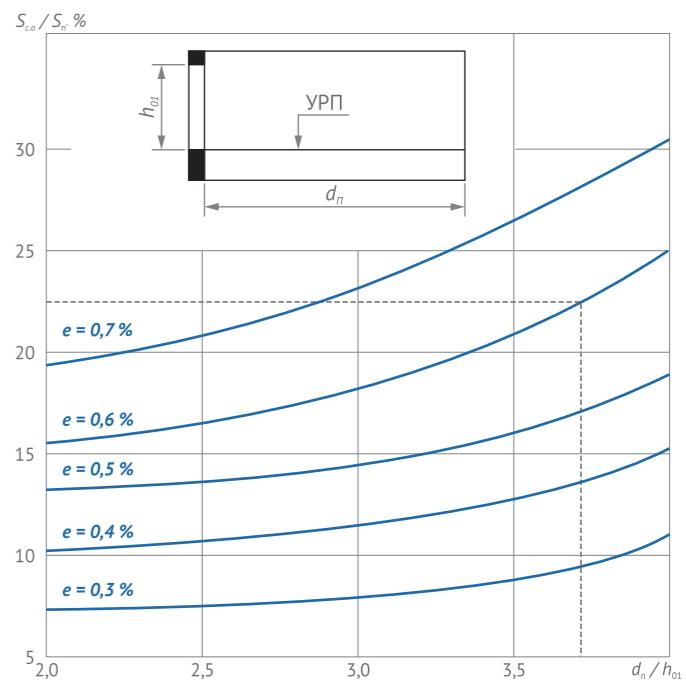


Рис. 2. График для определения предварительных размеров световых проёмов  
Fig. 2. A graph for determining the preliminary dimensions of the light openings

освещению для нормируемых помещений, принятые исходя из технологических особенностей объёмно-планировочные решения, конструктивные решений здания, ориентация фасадов здания по сторонам света, требования к энергоэффективности здания.

Коэффициент естественной освещённости – это показатель, который используется для оценки количества естественного освещения в помещениях [14; 15]. Нормативные значения КЕО в жилых и общественных зданиях принимаются на основании СанПиН 1.2.3685 [16].

Соответствие требованиям норм естественного освещения с учётом размеров и расположения световых проёмов в помещении определяют по предварительным и проверочным расчётом, выполненным в составе проектной документации.

Ориентировочное (предварительное) определение размеров световых проёмов при боковом освещении без учёта затеняющих зданий и сооружений проводят с использованием особых специализированных графиков, представленных в СП 367.1325800.2017 [14] (рисунок 2). На этапе предварительного расчёта делается вывод об ориентировочных размерах световых проёмов.

Проверочный расчёт КЕО при боковом освещении в проектной документации выполняют в соответствии с методикой приложения А СП 367.1325800.2017 [14]. При проверочном расчёте учитываются ориентация здания, климатические условия, а также детальное влияние окружающих объектов.

В проектной документации для повышения КЕО до нормативных значений используются различные подходы. Примерами таких решений являются: применение особых стёкол (в стеклопакетах и иных светопрозрачных конструкциях) с повышенным коэффициентом пропускания света; увеличение площади остекления; изменение габаритов световых проёмов, в том числе по высоте по отношению к полу; использование особых типов переплётов.

При работе были изучены исследовательские работы, посвящённые оценке влияния параметров стеклопакетов

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190 ФЗ : ред. от 01.05.2024 : принят Государственной Думой 22 декабря 2004 года : одобрен Советом Федерации 24 декабря 2004 года. – Москва, 2004.
- О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения : Федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ (ред. от 08.08.2024) : принят Государственной Думой 12 марта 1999 года : одобрен Советом Федерации 17 марта 1999 года / Собрание законодательства Российской Федерации. –1999. – № 14. – Ст. 1650.
- О порядке проведения строительного контроля при осуществлении строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов капитального строительства (вместе с «Положением о проведении строительного контроля при осуществлении строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов капитального строительства») : Постановление Правительства РФ от 21.06.2010 № 468. –Юридическая информационная система «Легалакт – законы, кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации», 2010. – URL: <https://legalacts.ru/doc/postanovlenie-pravitelstva-rf-ot-21062010-n-468/>.
- Сафонова, Л. П. Проблемы обеспечения контроля качества на нормируемые показатели [17; 18].
- Выполненный анализ методики и формул расчёта КЕО показал, что изменения следующих параметров, выявленные в рамках строительного контроля, критичны и могут привести к нарушениям санитарных норм:
  - геометрические размеры и планово-высотное расположение оконных/балконных проёмов;
  - высота подоконника;
  - светопропускающие свойства стёкол;
  - размеры и форма переплётов светового проёма;
  - вид стеклопакета (формула).
- Заключение**
- По результатам выполненной работы выявлено, что основными рисками при выявлении в ходе строительного контроля изменений в светопрозрачных конструкциях могут являться:
  - несоответствие санитарным нормам параметров КЕО, инсоляции и шума;
  - жалобы будущих собственников;
  - замечания и предписания государственного строительного надзора;
  - необходимость проведения повторной экспертизы проектной документации в отношении внесённых изменений.
- Авторами выполнены следующие задачи:
  - описаны основные принципы выполнения строительного контроля светопрозрачных конструкций;
  - описаны основные принципы выбора светопрозрачных конструкций при проектировании объекта с целью соблюдения требований санитарного законодательства;
  - на примере оценки КЕО выявлены конкретные характеристики (параметры) светопрозрачных конструкций, изменение которых может повлиять на условия среды обитания человека;
  - оценены риски изменений характеристик (параметров) светопрозрачных конструкций в период строительства.

строительных процессов / Л. П. Сафонова, Л. М. Весова // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса : Сборник трудов Международной научно-практической конференции, в 2 ч. / отв. ред. О. В. Бурлакенко; Волгоградский государственный технический университет. – Часть 1. – Волгоград : ВолгГТУ, 2021. – С. 203–211.

5. Saulnier, N. Le bruit comme facteur de nuisance a la qualite de la vie du citadin / Saulnier Natalia, Zanin Christine // Giocarrefour. – 2003. – Vol. 78, № 2. – Pp. 121–128.

6. Воздушный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 19.03.1997 № 60-ФЗ : принят Государственной Думой 19 февраля 1997 года : одобрен Советом Федерации 5 марта 1997 года / Собрание законодательства Российской Федерации. – 1997. – № 12. – Ст. 1383.

7. Бутенко, А. Н. Моделирование тепловлажностных режимов в ограждающих конструкциях с повышенными теплозащитными свойствами : дис. ... канд. тех. наук : 05.23.03 / Бутенко Андрей Николаевич – Воронеж, 2010. – 180 с.

8. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 : СП 51.13330.2011 : Свод правил : утверждён Приказом Министерством регионального развития РФ от 28 декабря 2010 года № 825 : введён в действие с 20 мая 2011 г. / Ростандарт. – Москва : Стандартинформ, 2011.

9. Минина, Н. Н. Проблема снижения акустического воздействия на жилую застройку при проектировании, строительстве и функционировании транспортных сооружений : дис. ... докт. тех. наук : 01.04.06 / Минина Наталья Николаевна ; Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. – Санкт-Петербург, 2012. – 350 с.
10. Коркина, Е. В. Совершенствование методов определения светопропускания оконных блоков для обеспечения естественного освещения помещений зданий : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Коркина, Елена Владимировна ; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук. – Москва, 2015. – 169 с.
11. Конструкции ограждающие светопрозрачные. Окна и двери. Производство монтажных работ, контроль и требования к результатам работ : ГОСТ 34378-2018 : Межгосударственный стандарт : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 апреля 2018 г. № 108-П) : введён в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 октября 2018 г. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 сентября 2014 г. № 612-ст. – Москва : Стандартинформ, 2018.
12. Цопа, Н. В. Исследование теоретических и методических особенностей процедуры проведения строительного контроля / Н. В. Цопа, А. С. Карпушкин, А. К. Горин // Экономика строительства и природопользования. – 2019. – № 4 (73). – С. 91–101.
13. Борискина, И. В. Проектирование современных оконных систем гражданских зданий: учебное пособие / И. В. Борискина, А. А. Плотников, А. В. Захаров. – Санкт-Петербург : Выбор, 2018.

#### REFERENCES

1. Gradostroitel'nyj kodeks Rossijskoj Federatsii ot 29.12.2004 № 190 FZ : red. ot 01.05.2024 [Urban Planning Code of the Russian Federation dated 29.12.2004 No. 190 FZ : ed. dated 05/01/2024] : priyat Gosudarstvennoj Dumoj 22 dekabrya 2004 goda : odobren Sovetom Federatsii 24 dekabrya 2004 goda [adopted by the State Duma on December 22, 2004 : approved by the Federation Council on December 24, 2004]. – Moscow, 2004.
2. O sanitarno-ehpidemiologicheskem blagopoluchii nasele-niya : Federal'nyj zakon ot 30.03.1999 № 52-FZ (red. ot 08.08.2024) [On the sanitary and Epidemiological welfare of the population : Federal Law No. 52-FZ of 30.03.1999 (as amended on 08.08.2024)] : priyat Gosudarstvennoj Dumoj 12 marta 1999 goda : odobren Sovetom Federatsii 17 marta 1999 goda [adopted by the State Duma on March 12, 1999 : approved by the Federation Council on March 17, 1999] / Sobranie zakonodatel'stva Rossijskoj Federatsii [Collection of Legislation of the Russian Federation]. –1999. – No. 14. – Art. 1650.
3. O poryadke provedeniya stroitel'nogo kontrolya pri osushhestvlenii stroitel'stva, rekonstruktii i kapital'nogo remonta ob'ektoru kapital'nogo stroitel'stva (vmeste s «Polozheniem o provedenii stroitel'nogo kontrolya pri osushhestvlenii stroitel'stva, rekonstruktii i kapital'nogo remonta ob'ektoru kapital'nogo stroitel'stva») [On the procedure for conducting construction control during the construction, reconstruction and Capital Repairs of Capital Construction facilities" (together with the "Regulations on Conducting Construction
4. Safonova, L. P. Problemy obespechenija kontrolja kachestva stroitelnykh protsessov [Problems of ensuring quality control of construction processes] // Aktualnye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa : Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, v 2 ch. [Actual problems and prospects of the construction complex development : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, in 2 hours] / ed. by O. V. Burlachenko; Volgogradskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet [Volgograd State Technical University]. – Part 1. – Volgograd : VolgGTU, 2021. – Pp. 203–211.
5. Saulnier, N. Le bruit comme facteur de nuisance a la qualite de la vie du citadin / Saulnier Natalia, Zanin Christine // Giocarrefour. – 2003. – Vol. 78, № 2. – Pp. 121–128.
6. Vozdushnyj kodeks Rossijskoj Federatsii : Federal'nyj zakon ot 19.03.1997 № 60-FZ [The Air Code of the Russian Federation : Federal Law No. 60-FZ of 03/19/1997] : priyat Gosudarstvennoj Dumoj 19 fevralya 1997 goda : odobren Sovetom Federatsii 5 marta 1997 goda [adopted by the State Duma on

- February 19, 1997 : approved by the Federation Council on March 5, 1997] / Sobranie zakonodatel'stva Rossijskoj Federatsii [Collection of Legislation of the Russian Federation]. – 1997. – No. 12. – Art. 1383.
7. Butenko, A. N. Modelirovaniye teplovazhnostnykh rezhimov v ogranichayushchikh konstruktsiyakh s povyshennymi teplozashchitnymi svojstvami : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.03 [Modeling of heat and humidity conditions in enclosing structures with enhanced thermal protection properties : dis. ... of Candidate of Technical Sciences : 05.23.03] / Butenko Andrey Nikolaevich – Voronezh, 2010. – 180 p.
8. Zashchita ot shuma. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 23-03-2003 : SP 51.13330.2011 : Svod pravil [Noise protection. Updated version of SNiP 23-03-2003 : SP 51.13330.2011] : utverzhdyon Prikazom Ministerstvom regional'nogo razvitiya RF ot 28 dekabrya 2010 goda № 825 : vvedyon v dejstvie s 20 maya 2011 g. [Set of Rules : approved by Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation dated December 28, 2010 No. 825 : effective from May 20, 2011] / Rostandart. – Moscow : Standartinform, 2011.
9. Minina, N. N. Problema snizheniya akusticheskogo vozdejstviya na zhiluyu zastrojku pri proektirovaniy, stroitel'stve i funktsionirovaniy transportnykh sooruzhenij : dis. ... dokt. tekhn. nauk : 01.04.06 [The problem of reducing acoustic effects on residential buildings in the design, construction and operation of transport facilities : dis. ... of Doctor of Technical Sciences : 04/01/06] / Minina Natalia Nikolaevna ; Baltijskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet «Voenmekh» im. D. F. Ustinova [Baltic State Technical University "Voenmekh" named after D. F. Ustinov]. – St. Petersburg, 2012. – 350 p.
10. Korkina, E. V. Sovrshenstvovaniye metodov opredeleniya svetopropuskanija okonnnykh blokov dlya obespecheniya estestvennogo osveshhenija pomeshchenij zdanij : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.01 [Improvement of methods for determining the light transmission of window blocks to provide natural lighting in buildings : dis. ... of Candidate of Technical Sciences : 05.23.01] / Korkina, Elena Vladimirovna ; Nauchno-issledovatel'skij institut stroitel'noj fiziki Rossijskoj akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk [Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences]. – Moscow, 2015. – 169 p.
11. Konstruktsii ogranichayushchie svetopropizachnye. Okna i dveri. Proizvodstvo montazhnykh rabot, kontrol' i trebovaniya k rezul'tatam rabot : GOST 34378-2018 : Mezhgosudarstvennyj standart [Translucent enclosing structures. Windows and doors. Installation work, control and requirements for work results : GOST 34378-2018 : Interstate Standard] : priyat Mezhgosudarstvennym sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii (protokol ot 30 aprelya 2018 g. № 108-P) : vvedyon v dejstvie v kachestve natsional'nogo standarta Rossijskoj Federatsii s 1 oktyabrya 2018 g. prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 18 sentyabrya 2018 g. № 612-s [adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (Protocol No. 108-P dated April 30, 2018) : entered into force as a national standard of the Russian Federation on October 1, 2018 by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September 18, 2018 No. 612-art]. – Moscow : Standartinform, 2018.
12. Tsopa, N. V. Issledovaniye teoretycheskikh i metodicheskikh oso-
- bennostej protsedury provedeniya stroitel'nogo kontrolya [Investigation of theoretical and methodological features of the construction control procedure] / N. V. Tsopa, A. S. Karpushkin, A. K. Gorin // Ehkonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya [Economics of construction and environmental management]. – 2019. – No. 4 (73). – Pp. 91–101.
13. Boriskina, I. V. Proektirovaniye sovremenyykh okonnnykh sistem grazhdanskikh zdanij: uchebnoe posobie [Design of modern window systems of civil buildings: a textbook] / I. V. Boriskina, A. A. Plotnikov, A. B. Zakharov. – St. Petersburg : Vybor, 2008. – 360 p.
14. Zdaniya zhilye i obshhestvennye. Pravila proektirovaniya estestvennogo i sovmeshchennogo osveshheniya : SP 367.1325800.2017 : Svod pravil [Residential and public buildings. Rules for the design of natural and combined lighting : SP 367.1325800.2017 : Set of rules] : utverzhdyon v dejstvie Prikazom Minstroya Rossii ot 05.12.2017 № 1618/pr : vvedyon v dejstvie s 6 inya 2018 g. [approved by Order of the Ministry of Construction of Russia dated 05.12.2017 No. 1618/pr : effective from January 6, 2018] / Rosstandart. – Moscow : Standartinform, 2017.
15. Estestvennoe i iskusstvennoe osveshhenie. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 23-05-95\* : SP 52.13330.2016 : Svod pravil [Natural and artificial lighting. Updated version of SNiP 23-05-95\* : SP 52.13330.2016 : Set of Rules] : utverzhdyon Prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyajstva Rossijskoj Federatsii ot 7 noyabrya 2016 g. № 777/pr : vvedyon v dejstvie s 8 maya 2017 g. [approved by Order No. 777/pr of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated November 7, 2016 : effective from May 8, 2017]. – Codex JSC. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054197>.
16. Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya» : Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28.01.2021 № 2 [On approval of sanitary rules and regulations SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans" : Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021 No. 2] : zaregistrirovan Minyustom Rossii 29 yanvarya 2021 g. pod registratsionnym № 62296 [registered by the Ministry of Justice of the Russian Federation on January 29, 2021 under registration No. 62296]. – Ofitsial'nyj internet-portal pravovoj informatsii ([www.pravo.gov.ru](http://www.pravo.gov.ru)) ot 03.02.2021 [Official Internet Portal legal information ([www.pravo.gov.ru](http://www.pravo.gov.ru)) dated 02/03/2021]. – Art. 0001202102030022.
17. Chudievich, A. R. Metodicheskie podkhody k resheniyu voprosov, svyazannykh s ustanovleniem sootvetstviya svetopropizachnykh konstruktsij trebovaniyam NTD [Methodological approaches to solving issues related to the establishment of compliance of translucent structures with the requirements of technical specifications] / A. R. Chudievich // Teoriya i praktika sudebnoj ehkspertizy [Theory and practice of forensic examination]. – 2010. – No. 1 (17). – Pp. 160–197.
18. Kireev, H. H. Analiticheskij metod opredeleniya svetopropizaniya okonnogo bloka [Analytical method for determining the light transmission of a window block] / H. H. Kireev // Svetotekhnika [Lighting engineering]. – 1983. – No. 7. – Pp. 3–4.

УДК 69.05

## Инновационный метод контроля высокопрочных болтовых соединений

An Innovative Method for Monitoring High-Strength Bolted Joints

**Малышева Кристина Анатольевна**

Кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры «Испытания сооружений», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, [malyshevaka@mgsu.ru](mailto:malyshevaka@mgsu.ru)

**Malysheva Kristina Anatolyevna**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Testing of Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, [malyshevaka@mgsu.ru](mailto:malyshevaka@mgsu.ru)

**Шабаев Юрий Русланович**

Магистр кафедры «Испытания сооружений», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, [yrashabaevurn1@mail.ru](mailto:yrashabaevurn1@mail.ru)

**Shabaev Yuri Ruslanovich**

Master's degree in the Department of Testing of Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, [yrashabaevurn1@mail.ru](mailto:yrashabaevurn1@mail.ru)

**Аннотация.**

В статье представлен всесторонний обзор современных методов неразрушающего контроля высокопрочных болтовых соединений, критически важных элементов в обеспечении надёжности и безопасности технических систем различного назначения. Рассмотрены технические особенности и практическая применимость ультразвукового контроля (УЗК), магнитопорошкового метода (МПД) и метода акустической эмиссии (АЭ). Проведён сравнительный анализ существующих подходов к диагностике болтовых соединений с акцентом на выявлении ключевых преимуществ и ограничений каждого метода, что обосновывает необходимость комплексного подхода к контролю для достижения максимальной эффективности.

Особое внимание уделено методу акустической эмиссии, демонстрирующему высокую чувствительность к дефектам

**Abstract.**

The article provides a comprehensive overview of modern methods of non-destructive testing of high-strength bolted joints, critical elements in ensuring the reliability and safety of technical systems for various purposes. The technical features and practical applicability of ultrasonic testing (UZK), magnetic powder method (MPD) and acoustic emission method (AE) are considered. A comparative analysis of existing approaches to the diagnosis of bolted joints has been carried out, with an emphasis on identifying the key advantages and limitations of each method, which justifies the need for an integrated approach to monitoring to achieve maximum efficiency.

Special attention is paid to the acoustic emission method,

**Введение**

Актуальность разработки новых методов контроля высокопрочных болтовых соединений обусловлена их фундаментальной ролью в обеспечении надёжности и безопасности конструкций современных технических систем, эксплуатируемых в условиях значительных механических нагрузок и агрессивных сред. В условиях постоянно растущих требований к качеству и долговечности инженерных сооружений при возведении объектов капитального строительства традиционные методы контроля напряжённо-деформированного состояния болтовых соединений демонстрируют ограниченную эффективность, что

на ранних стадиях их развития, что позволяет предотвратить аварийные ситуации и увеличить срок службы конструкций. Результаты исследования позволяют сделать вывод о перспективности использования метода АЭ в качестве одного из основных инструментов мониторинга состояния болтовых соединений.

Представленные результаты могут быть использованы для дальнейшего совершенствования методологических основ диагностики болтовых соединений и разработки новых, более строгих нормативных требований в данной области. Это, в свою очередь, способствует повышению безопасности и надёжности эксплуатации ответственных технических систем.

**Ключевые слова:** высокопрочные болтовые соединения; метод акустической эмиссии; ультразвуковой контроль; магнитный контроль.

which demonstrates high sensitivity to defects in the early stages of their development, which makes it possible to prevent emergencies and increase the service life of structures. The results of the study allow us to conclude that it is promising to use the AE method as one of the main tools for monitoring the condition of bolted joints.

The presented results can be used to further improve the methodological foundations for the diagnosis of bolted joints and to develop new, more stringent regulatory requirements in this area. This, in turn, contributes to improving the safety and reliability of operation of critical technical systems.

**Keywords:** high-strength bolted joints; acoustic emission method; ultrasonic inspection; magnetic inspection.

стимулирует поиск инновационных подходов к решению данной задачи. Научно-технический прогресс, сопровождающийся развитием новых материалов и технологий, создаёт предпосылки для внедрения передовых методик диагностики, позволяющих достичь более высокого уровня точности и объективности оценки состояния критически важных элементов конструкций. В данном контексте исследование потенциала альтернативных методов контроля представляет собой приоритетное направление научно-исследовательской деятельности, направленной на совершенствование методологической базы технической диагностики и повышение общей эффективности про-

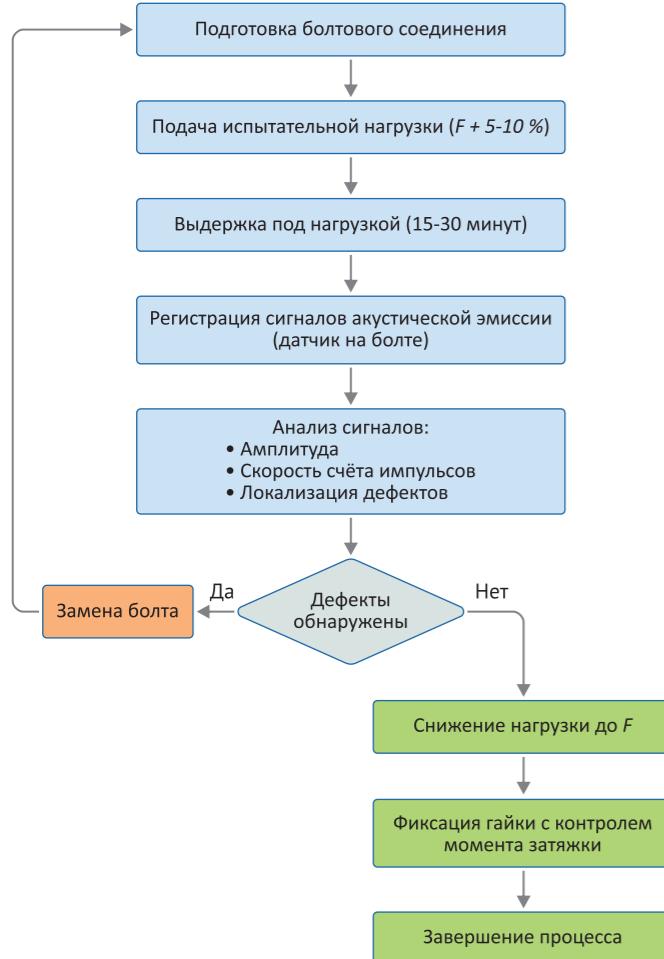


Рис. 1. Блок-схема метода контроля  
Fig. 1. Block diagram of the control method

процессов технического обслуживания сложных технических систем.

#### Материалы и методы

Для написания работы были использованы методы анализа и синтеза. Базой для написания статьи служили труды отечественных авторов.

#### Результаты

Новый метод контроля высокопрочных болтовых соединений представляет собой инновационный подход, основанный на применении технологий акустической эмиссии для обеспечения точного мониторинга состояния критически важных элементов конструкций. Данная методика была разработана с учётом современных требований к надёжности и долговечности технических систем, а также с целью повышения эффективности процессов диагностики и технического обслуживания [1–3]. Суть метода заключается в использовании преобразователя сигналов акустической эмиссии, который устанавливается на болт перед его затяжкой. При этом болтовое соединение предварительно готовится с использованием специальной смазки, обеспечивающей качественный акустический контакт между элементами.

Важным этапом нового метода является подача испытательной нагрузки на болт, которая превышает заданное усилие натяжения на 5–10 %. Такой подход позволяет выявить возможные дефекты или трещины на ранней стадии эксплуатации, что существенно снижает риск внезапного разрушения конструкции. Во время выдержки при повышенной нагрузке производится регистрация сигна-

лов акустической эмиссии, которые затем анализируются для оценки качества соединения. После этого нагрузка снижается до требуемого уровня, а болтовое соединение фиксируется гайкой с контролем момента затяжки [1].

Особое внимание следует обратить на необходимость корректировки норм проектирования и производства работ при внедрении данного метода. В соответствии с современными исследованиями, рекомендуется ограничить количество способов очистки соединяемых поверхностей до трёх основных: один для заводских условий, второй для строительной площадки и третий для ремонтных работ [4]. Это облегчает стандартизацию процесса и повышает его технологическую доступность. Однако использование дополнительных методов очистки допустимо при наличии соответствующего раздела в проекте производства работ, где должны быть детально описаны все операции по подготовке поверхностей.

С точки зрения материаловедения, применение высокопрочной стали становится одним из ключевых факторов успеха при реализации новых методов контроля болтовых соединений. Современные исследования показывают, что использование сталей с пределом текучести выше 690 МПа позволяет значительно повысить надёжность конструкций и снизить их вес [5]. Это особенно актуально для строительства мостовых сооружений и крупных промышленных объектов, где требования к прочности и долговечности максимально высоки.

При реконструкции существующих зданий и сооружений новая методика контроля болтовых соединений демонстрирует особую эффективность. Например, при усилении стальных балок перекрытий рамно-связевых каркасов возможно применение комбинированных решений, включающих как сварные, так и болтовые соединения [6; 7]. Анализ распределения усилий в таких конструкциях показывает, что правильно организованный контроль напряжённо-деформированного состояния позволяет существенно увеличить несущую способность элементов без значительного увеличения их массы.

Стоит отметить, что метод акустической эмиссии, лежащий в основе нового подхода к контролю болтовых соединений, получил широкое распространение благодаря своим уникальным преимуществам. Он позволяет осуществлять сплошной контроль всех болтов в процессе монтажа, что особенно важно для больших конструкций, где традиционные методы контроля могут быть недостаточно эффективными [1; 7; 8; 9]. Кроме того, данный метод характеризуется высокой чувствительностью к росту трещин и другим дефектам, что делает его незаменимым инструментом для обеспечения безопасности эксплуатации современных технических систем.

Для наглядного сравнения различных параметров новых методов контроля высокопрочных болтовых соединений представляется целесообразным использовать табличную форму представления данных. Такой подход позволяет чётко выделить основные характеристики каждого метода, их преимущества и ограничения, что существенно облегчает выбор наиболее оптимального решения для конкретных условий эксплуатации технических систем (см. таблицу 1).

На основе представленных данных можно сделать вывод о том, что каждый из рассмотренных методов имеет свои уникальные особенности, которые делают его пред-

Метод	Принцип действия	Область применения	Точность (%)	Ограничения
Акустическая эмиссия	Регистрация звуковых волн, возникающих при деформации материала	Критически важные конструкции, мосты, энергетическое оборудование	95–98	Высокая стоимость оборудования, необходимость квалифицированного персонала
Ультразвуковой контроль	Использование ультразвуковых волн для детектирования дефектов	Строительство, машиностроение, авиастроение	92–96	Сложность в работе с толстыми стенками, зависимость от поверхности
Магнитный контроль	Анализ магнитного поля вокруг элемента для выявления трещин	Ферромагнитные материалы, трубопроводы, резервуары	88–94	Незэффективен для немагнитных материалов, ограниченная глубина проникновения
Визуально-измерительный метод с датчиками напряжений	Использование датчиков для непрерывного мониторинга нагрузок	Эксплуатируемые объекты, онлайн-мониторинг	90–95	Зависимость от точности установки датчиков, необходимость регулярного обслуживания

Табл. 1. Методы контроля высокопрочных болтовых соединений  
Tab. 1. Methods of control of high-strength bolted joints

почитательным для определённых типов конструкций и условий эксплуатации. Акустический метод демонстрирует высочайшую точность и широкий спектр применения, однако требует значительных капиталовложений и высокой квалификации операторов. Ультразвуковой контроль также характеризуется высокой эффективностью, но может быть ограничен в работе с материалами большой толщины или сложной геометрией. Магнитный метод особенно применим для ферромагнитных материалов, хотя его возможности ограничиваются типом используемого металла. Визуально-измерительный метод с датчиками напряжений представляет собой удобное решение для долгосрочного мониторинга, но требует постоянного внимания к состоянию датчиков и систем сбора данных. Таким образом, выбор конкретного метода должен основываться на комплексном анализе требований к контролю, характеристик объекта и доступных ресурсов.

#### Обсуждение и заключение

В результате проведённого исследования были детально проанализированы современные методы контроля высокопрочных болтовых соединений, их технические

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Патент № RU 2760546 Российской Федерации, МПК E04B1/38. Способ выполнения монтажных соединений на высокопрочных болтах с контролируемым натяжением : номер заявки 2020140529 : дата подачи заявки 09.12.2020 : опубликовано 29.11.2021 / Чмыхало А. И., Соловьев С. Н., Панкин Д. А., Шевченко В. А. ; правообладатель ФГКВОУ ВО «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» МО РФ.
- Standard Terminology for Nondestructive Examinations : ASTM E1316-23 / ASTM International. – USA : ASTM, 2023. – 41 р.
- Raghavan, A. Review of guided-wave structural health monitoring / A. Raghavan, C. E. S. Cesnik. – DOI 10.1177/0583102406075428 // The Shock and Vibration Digest. – 2007. – Vol. 39, Iss. 2. – Pp. 91–114.
- Нугжинов, Ж. С. Внесение изменений в нормативные документы касательно монтажных соединений на высокопрочных болтах / Ж. С. Нугжинов, К. С. Альменов, А. М. Иманов // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их

#### REFERENCES

- Patent № RU 2760546 Rossiijskaya federatsiya, MPK E04B1/38 [Patent No. RU 2760546 Russian Federation, IPC E04B1/38]. Sposob vypolneniya montazhnykh soedinenij na vysokopronochnykh boltakh s kontroliruemym natyazheniem : nomer zayavki 2020140529 : data podachi zayavki 09.12.2020 : opublikovano 29.11.2021 [Method of mounting joints on high-strength bolts with controlled tension : application number 2020140529 : application date 09.12.2020 : published 29.11.2021] / Chmykhalo A. I., Solovov S. N., Pankin D. A., Shevchenko V. A. ; pravoobladatel' FGKVOU VO «Voennaya akademiya Raketnykh vojsk strategicheskogo naznacheniya imeni Petra Velikogo» MO RF. [copyright holder of the Peter the Great Military Academy of Strategic Missile Forces of the Ministry of Defense of the Russian Federation].
- Standard Terminology for Nondestructive Examinations : ASTM E1316-23 / ASTM International. – USA : ASTM, 2023. – 41 p.

характеристики и области применения, что позволило сделать вывод о значимости внедрения инновационных подходов при строительстве зданий и сооружений. Научная ценность данного анализа заключается в выявлении потенциала каждого метода для решения конкретных задач, связанных с обеспечением надёжности и безопасности конструкций различного назначения. Особое внимание было уделено методу акустической эмиссии, который продемонстрировал высокую эффективность при контроле критически важных элементов за счёт возможности сплошной регистрации сигналов деформации и раннего обнаружения трещинообразования. В то же время другие методы, такие как ультразвуковой контроль и магнитный контроль, также показали свою применимость в определённых условиях эксплуатации, особенно при работе с материалами специфических свойств или геометрий. Визуально-измерительный метод с использованием датчиков напряжений подтвердил свою значимость для долгосрочного мониторинга состояния конструкций в режиме реального времени, что особенно актуально для объектов, требующих постоянного контроля.

решения : Материалы XI научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 18–19 ноября 2021 года ; под ред. А. В. Ульбина. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого. – 2021. – С. 70–81.

- Сунь, Г. Ф. Исследование и применение высокопрочной стали / Г. Ф. Сунь, Л. И. Миронова // Endless light in science. – 2024. – № 19. – С. 92–96.
- Беляева, С. Ю. Усиление рамных балок при реконструкции / С. Ю. Беляева, П. А. Григорова, А. В. Ляшенко // Строительная механика и конструкции. – 2021. – № 1. – С. 98–110.
- Шаповалов, Э. Л. Исследование прочностных характеристик высокопрочных болтов разрушающими и неразрушающими методами контроля / Э. Л. Шаповалов, О. Ю. Панфёрова // Наука, техника и образование. – 2016. – № 7 (25).
- Хамханова, Д. Н. Контроль качества высокопрочных болтов / Д. Н. Хамханова, М. Т. Хадыков, А. Д. Грешилов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – № 5. – С. 9–13.
- Hellier, C. Handbook of Nondestructive Evaluation / C. Hellier. – 3rd ed. – USA : McGraw-Hill Education, 2020. – 816 p.

- 29.11.2021] / Chmykhalo A. I., Solovov S. N., Pankin D. A., Shevchenko V. A. ; pravoobladatel' FGKVOU VO «Voennaya akademiya Raketnykh vojsk strategicheskogo naznacheniya imeni Petra Velikogo» MO RF. [copyright holder of the Peter the Great Military Academy of Strategic Missile Forces of the Ministry of Defense of the Russian Federation].
- Standard Terminology for Nondestructive Examinations : ASTM E1316-23 / ASTM International. – USA : ASTM, 2023. – 41 p.

3. Raghavan, A. Review of guided-wave structural health monitoring / A. Raghavan, C. E. S. Cesnik. – DOI 10.1177/0583102406075428 // The Shock and Vibration Digest. – 2007. – Vol. 39, Iss. 2. – Pp. 91–114.
4. Nuguzhinov, Zh. S. Vnesenie izmenenij v normativnye dokumenty kasatel'no montazhnykh soedinenij na vysokoprochnykh boltakh [Amendments to regulatory documents concerning mounting joints on high-strength bolts] / Zh. S. Nuguzhinov, K. S. Almenov, A.M. Imanov // Obsledovanie zdanij i sooruzhenij: problemy i puti ikh resheniya : Materialy XI nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 18–19 noyabrya 2021 goda ; pod red. A. V. Ulybina [Inspection of buildings and structures: problems and solutions : Proceedings of the XI Scientific and practical conference, St. Petersburg, November 18–19, 2021 ; edited by A.V. Smile]. – St. Petersburg : Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet imeni Petra Velikogo [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. – 2021. – Pp. 70–81.
5. Sun, G. F. Issledovanie i primenie vysokoprochnoj stali [Research and application of high-strength steel] / G. F. Sun, L. I. Mironova // Endless light in science [Endless light in science]. – 3rd ed. – USA : McGraw-Hill Education, 2020. – 816 p.
6. Belyaeva, S. Y. Usilenie ramnykh balok pri rekonstruktsii [Reinforcement of frame beams during reconstruction] / S. Y. Belyaeva, P. A. Grigorova, A.V. Lyashenko // Stroitel'naya mehanika i konstruktii [Construction mechanics and structures]. – 2024. – No. 19. – Pp. 92–96.
7. Shapovalov, E. L. Issledovanie prochnostnykh kharakteristik vysokoprochnykh boltov razrushayushchimi i nerazrushayushchimi metodami kontrolya [Investigation of strength characteristics of high-strength bolts by destructive and non-destructive testing methods] / E. L. Shapovalov, O. Y. Panferova // Nauka, tekhnika i obrazovanie [Science, Technology and Education]. – 2016. – No. 7 (25).
8. Khamkhanova, D. N. Kontrol' kachestva vysokoprochnykh boltov [Quality control of high-strength bolts] / D. N. Khamkhanova, M. T. Khadykov, A.D. Greshilov // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya TULSU. Technical sciences]. – 2022. – No. 5. – Pp. 9–13.
9. Hellier, C. Handbook of Nondestructive Evaluation / C. Hellier. – 3rd ed. – USA : McGraw-Hill Education, 2020. – 816 p.

DOI:10.54950/26585340\_2025\_2\_92

УДК 69

## Повышение эффективности организации строительства за счёт применения программных комплексов

Improving the Efficiency of the Construction Organization Through the Use of Software Packages

**Топчий Дмитрий Владимирович**

Доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой «Испытания сооружений», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, TopchiyDV@gic.mgsu.ru

Topchiy Dmitry Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Head of the Department of Testing of Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, TopchiyDV@gic.mgsu.ru

**Чупракова Екатерина Петровна**

Аспирант кафедры «Испытания сооружений», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, ChuprakovaEP@mgsu.ru

Chuprakova Ekaterina Petrovna

Postgraduate student of the Department of Testing of Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, ChuprakovaEP@mgsu.ru

**Аннотация.**

В настоящее время осуществляются непрерывная разработка и совершенствование программных комплексов, охватывающих различные этапы жизненного цикла строительного объекта. Эти системы направлены на оптимизацию процессов и повышение эффективности взаимодействия между заказчиком, проектировщиком и подрядчиком. Тем не менее в данной области сохраняется ряд проблем, требующих дальнейшего изучения и решения.

Целью данной статьи является анализ целесообразности применения существующих программных комплексов на разных этапах жизненного цикла строительного объекта, а также оценка их функциональных возможностей и эффективности.

В данной статье проводится анализ применения современных программных комплексов на трёх этапах жизненного цикла строительного объекта: на предпроектном этапе, этапе проектирования и этапе строительства. Исследование направлено на выявление эффективности использования информационных технологий в управлении строительными процессами, что является ключевым фактором повышения качества и сокращения сроков реализации строительных проектов. В ходе анали-

за рассматриваются основные функциональные возможности программных комплексов, их применимость в специфических задачах и влияние на общую эффективность управления строительными проектами.

На предпроектном этапе жизненного цикла объектов строительства осуществляется анализ целесообразности применения программных инструментов для комплексного развития территорий (КРТ).

Для этапа проектирования рассматривается применение программных комплексов для оценки несущей способности строительных конструкций. Особое внимание уделяется программным решениям, которые позволяют осуществлять геотехнические расчёты.

В рамках анализа этапа строительства исследуется целесообразность внедрения программных комплексов для автоматизации процессов документооборота и управления строительными процессами. Рассматриваются преимущества их применения в контексте работы отдела снабжения, производственно-технического отдела и руководителя проекта.

Наиболее перспективным видится использование программных решений, которые будут применяться на стадии стро-

ительства жизненного цикла объекта.

**Ключевые слова:** автоматизация строительных процессов; программные комплексы; жизненный цикл; предпроектный

**Abstract.**

Currently, continuous development and improvement of software packages covering various stages of the construction object's life cycle. These systems are directed at optimizing processes and raising the efficiency of interaction between the customer, designer and contractor. Actually, there are still a lot of problems in this area that require further study and solution.

The purpose of this article is to analyze the feasibility of using existing software packages at different stages of the life cycle of a construction object, as well as to assess their functionality and efficiency.

This article analyzes the application of modern software systems at three stages of the life cycle of a construction object: the pre-project stage, the design stage and the construction stage. The research is directed at identifying the effectiveness of using information technologies in the management of construction processes, which is a main factor in improving the quality and reducing the implementation time of construction projects. The analysis examines the main functional capabilities of software packages, their applicability in specific tasks, and their impact on

**Введение**

На сегодняшний день для каждого этапа строительных работ разработано множество специализированных программных комплексов, предназначенных для автоматизации, упрощения и оптимизации процессов на различных стадиях жизненного цикла проекта.

Тем не менее в строительной отрасли наблюдается значительное отставание в использовании информационных технологий по сравнению с другими сферами. Часто работы с документами на строительной площадке выполняются вручную, что приводит к многочисленным ошибкам и отставанию от планируемых сроков строительства.

В основном это обусловлено следующими факторами [1]:

1. Неполная готовность российских программных продуктов к полному удовлетворению потребностей отрасли.
2. Переход на новые программные продукты требует значительных инвестиций как в сами программы, так и в обучение сотрудников.
3. Внедрение новых систем всегда связано с определёнными рисками и стрессом, что замедляет процесс автоматизации.

В настоящей статье анализируется актуальность применения программных комплексов автоматизации на разных этапах жизненного цикла здания. Рассматривается вопрос: какие нормативные акты в соответствии с законодательством Российской Федерации обязывают применять те или иные программные комплексы на различных этапах жизненного цикла здания?

Также проводится исследование преимуществ, которые может предоставить внедрение программных комплексов в процессы проектирования и строительства.

**Материалы и методы**

Анализ и синтез существующих программных комплексов, предназначенных для различных этапов жизненного цикла строительства [2], являются важным шагом для понимания текущего состояния и определения перспективных направлений развития данной области. Сбор информации осуществлялся на основе научных публикаций, рекламных материалов программных ком-

плексов, представленных на российском рынке, а также анализа функциональных возможностей, представленных на официальных сайтах разработчиков.

At the pre-project stage of the life cycle of construction objects, an analysis of the feasibility of using software tools for integrated territorial development is carried out. For the design stage, we consider the use of software packages for assessing the load-bearing capacity of building structures. Special attention is paid to software solutions that allow performing geotechnical calculations.

As part of the analysis of the construction stage, the feasibility of implementing software packages for automating document management processes and managing construction processes is investigated. The advantages of their application in the context of the work of the supply department, production and technical department and the project manager are considered. The most promising approach is to use software solutions that will be applied at the construction stage of the project's life cycle.

**Keywords:** automation of construction processes; software packages; life cycle; pre-project stage; design stage; construction stage; integrated territorial development (CDT); geotechnical modeling.

плексов, представленных на российском рынке, а также анализа функциональных возможностей, представленных на официальных сайтах разработчиков.

В рамках исследования был проведён анализ нормативных актов Российской Федерации, определяющих обязательные этапы жизненного цикла строительства, на которых использование программных комплексов является обязательным.

Для структурирования и систематизации полученных данных был применён метод системного анализа. Данный метод позволил определить, какие программные комплексы наиболее полезны для различных участников строительного процесса, а также оценить уровень их сложности в использовании.

Системный анализ не только позволил оценить текущее состояние использования программных комплексов в строительстве [3], но и выявить направления для дальнейшего совершенствования и развития данной сферы.

**Результаты**

**На предпроектном этапе** жизненного цикла объектов капитального строительства применяются специализированные программные системы для комплексного развития территории (КРТ). КРТ в строительстве представляет собой комплексный подход к развитию территории [4].

Сервисы КРТ, предлагаемые различными компаниями, предоставляют информацию о планируемых и реализуемых проектах в непосредственной близости от выбранной территории для строительства.

Алгоритмы, заложенные в программные комплексы для КРТ, позволяют оптимизировать интеграцию нового объекта в существующую городскую среду с учётом нормативных требований по инсоляции и экологической безопасности. На этапе планирования строительства данные программные комплексы предоставляют возможность выбора наиболее оптимального местоположения для размещения объекта с точки зрения экономической целесообразности и соответствия градостроительным регламентам.

Анализ потенциальных соседств позволяет заказчику принимать обоснованные решения относительно выбора

местоположения объекта, минимизируя возможные риски и максимизируя инвестиционную привлекательность проекта.

Такие сервисы комплексного развития территории способствуют формированию реестра документов, генерируемых в процессе подготовки и реализации проектов КРТ, а также обеспечивают учёт объектов недвижимости на территории, подпадающей под действие КРТ. Они позволяют осуществлять мониторинг мероприятий, выполняемых в рамках реализации решений по КРТ, и решать другие задачи. Это способствует оптимизации временных затрат на реализацию проекта.

Использование подобных программных комплексов не является обязательным, однако они могут оказать значительную помощь заказчику строительного проекта в принятии наиболее целесообразного решения относительно выбора местоположения объекта строительства, учитывая текущую и прогнозируемую градостроительную ситуацию на ближайшие годы.

**На этапе проектирования** применяются специализированные программные комплексы для оценки несущей способности строительных конструкций. Эти системы выполняют расчёты на основные и особые сочетания нагрузок. На их основе принимаются и оптимизируются проектные решения для несущих конструкций зданий, а также подтверждается их надёжность и безопасность.

Практически все здания и сооружения, реализуемые на территории Российской Федерации, проектируются с использованием результатов расчётов, выполненных в указанных программных комплексах. В определённой степени положения главы 3 статьи 16 Федерального закона № 384-ФЗ [5] обязывают нас применять расчётовые программы для обеспечения механической безопасности зданий и сооружений.

Согласно Федеральному закону № 384-ФЗ, при проектировании необходимо разрабатывать расчётовые модели, которые адекватно отражают реальные условия эксплуатации конкретного здания или сооружения и соответствуют рассматриваемой расчётовой ситуации. Современные программные комплексы позволяют воссоздать действительные условия работы конструкций, учитывая особенности взаимодействия элементов строительных систем между собой и с основанием, а также пластические и реологические характеристики материалов и грунтов.

Отдельно следует выделить программные комплексы для геотехнического моделирования. Эти системы применяются для оптимизации инженерных решений при строительстве объектов в сложных геологических условиях. В некоторых случаях их применение является обязательным на территории нашей страны, в частности при строительстве высотных сооружений или объектов, расположенных на грунтах с инженерно-геологическими характеристиками III категории сложности.

Программные комплексы данного типа позволяют осуществлять моделирование процессов деформации объектов с учётом характеристик конкретных грунтов, а также факторов окружающей застройки. Кроме того, они предоставляют возможность проведения расчётов дополнительных осадок, что критически важно для обеспечения безопасности и надёжности строительных конструкций. Применение геотехнических программных комплексов способствует повышению надёжности и безопасности

строительных объектов, а также минимизации негативного воздействия строительных работ на существующие здания и сооружения.

Программные комплексы, используемые на этапе проектирования, обеспечивают надёжность и безопасность проектируемого объекта, а также прилегающей застройки. Эти инструменты являются обязательными для применения проектировщиками и играют ключевую роль в обеспечении качества проектной документации.

**На этапе строительства** активно применяются программные комплексы для автоматизации документооборота и управления проектом [6]. Для каждого отдела строительной организации существует специализированное программное обеспечение, которое оптимизирует его деятельность и способствует повышению общей эффективности работы компании.

Отделу снабжения программные комплексы помогут грамотно выполнять закупки. Такие программные комплексы позволяют планировать бюджет. В идеале отдел снабжения должен открыть график производства работ и график планируемых денежных поступлений и на основе данных графиков запланировать покупку наиболее важных материалов, требуемых для монтажа в ближайшее время.

Разберём пример. Сотрудник отдела снабжения не ознакомился с графиком производства работ и приобрёл дорогостоящие материалы, такие как стальные трубопроводы для системы внутреннего водоснабжения. При этом, согласно графику производства работ, установка этих трубопроводов запланирована только через год. Строительная компания вынуждена временно заморозить финансовые средства, которые могли бы быть использованы для приобретения материалов, необходимых для текущих работ, например, арматуры для возведения монолитных конструкций.

В результате запланированный бюджет оказывается исчерпанным, поскольку средства из него были направлены на закупку материалов, которые будут востребованы только через год, и, следовательно, получение финансовых средств за выполнение этих работ в данный момент невозможно. Это приводит к отсутствию финансовых ресурсов для проведения монолитных работ в текущем периоде, что вынуждает компанию искать альтернативные решения для выполнения текущих задач.

Кроме того, вследствие несоблюдения условий хранения закупленные трубопроводы подвергаются коррозии и гниению, что также приводит к утрате финансовых средств, вложенных в приобретение данных изделий.

Некоторые программные комплексы предоставляют отделу снабжения возможность комплексного анализа ситуации на строительной площадке, охватывая не только внутренние процессы отдела, но и внешние взаимодействия с другими отделами генподрядчика. Другие программные решения ориентированы исключительно на управление внутренними операциями отдела снабжения, включая бюджетирование, обработку заявок, учёт счетов и контроль поставок.

Можно предположить, что использование программных комплексов первого типа требует более высокой квалификации специалистов и значительных первоначальных финансовых вложений. Программные комплексы второго типа, в свою очередь, характеризуются более

простой в использовании функциональностью и могут способствовать ускорению рабочих процессов отдела снабжения.

Программные комплексы первого типа способствуют более эффективному планированию закупок материалов, минимизируя вероятность возникновения значительных ошибок и финансовых потерь. Данный аспект особенно важен для крупных долгосрочных строительных проектов.

Строительные программные комплексы для производственно-технического отдела в основном предназначены для мониторинга объёмов выполненных работ, контроля качества строительно-монтажных работ, формирования актов выполненных работ и ведения согласованной исполнительной документации.

Однако такие программные комплексы, как правило, ориентированы исключительно на работу производственно-технического отдела и не предусматривают взаимодействие с другими подразделениями, такими как отдел снабжения.

Программные комплексы, предназначенные исключительно для производственно-технического отдела, характеризуются простотой использования и интуитивно понятным интерфейсом. С их помощью можно эффективно выполнять следующие операции:

- зафиксировать дату и условия возведения конструкций, ведя электронный журнал работ;
- регистрировать выявленные дефекты, включая фотографии, с указанием даты и лица, осуществившего регистрацию дефекта;
- осуществлять мониторинг процесса устранения выявленных дефектов с обязательным документированием дат и ответственных исполнителей;
- осуществлять контроль за процессом приёмки выполненных конструкций, включая фиксацию даты приёмки и идентификацию ответственных лиц;
- формировать исполнительную документацию;
- документировать объёмы выполненных работ, принятых заказчиком, и фиксировать подписание исполнительной документации;
- и другие аналогичные функции.

Существуют программные комплексы, предназначенные исключительно для организации электронного документооборота на строительной площадке [7]. Внедрение таких систем является целесообразным, однако они не обеспечивают более точную коммуникацию между различными отделами.

Например, с использованием программ электронного документооборота можно зафиксировать предписание об устранении выявленного нарушения. Письмо с предписанием достигнет исполнителя не ранее чем через несколько дней, что может привести к увеличению срока устранения выявленного нарушения.

В то же время программные комплексы, ориентированные на работу производственно-технического отдела, позволяют конкретизировать место нарушения, отметить его на плане, прикрепить фотографии, указать ответственное лицо за выявление нарушения и лицо, ответственное за его устранение. В программных комплексах, предназначенных для работы производственно-технического отдела, все выявленные несоответствия отображаются автоматически. Они сразу становятся доступными для

лиц, ответственных за их устранение, что способствует сокращению сроков устранения обнаруженных нарушений.

Как было отмечено ранее, существуют программные комплексы, которые обеспечивают эффективное взаимодействие между различными подразделениями генподрядчика. Эти системы позволяют руководству генподрядчика или заказчика выявлять и анализировать ключевые проблемы на строительной площадке [8].

Однако для выполнения более специфических задач, относящихся к деятельности конкретного отдела, предпочтительно использовать специализированные программные решения, ориентированные на конкретный функционал данного отдела.

На строительной площадке существует значительная проблема во взаимодействии между подразделениями генерального подрядчика и проектной организацией, занимающейся разработкой рабочей документации.

В идеальном сценарии технологии информационного моделирования (далее ТИМ) должны обеспечивать взаимодействие между разными отделами генподрядчика и проектировщиком, а также обеспечить необходимую интеграцию данных [9]. На ТИМ-модели генеральный подрядчик должен иметь возможность оперативно отслеживать все изменения, внесённые проектировщиком в проектную документацию. Кроме того, генеральный подрядчик должен фиксировать все отклонения от проектной документации, возникающие в процессе строительства.

Также представляется целесообразным использование проектной модели здания для автоматизированного формирования объёмов закупаемых строительных материалов отделом снабжения, а также для фиксации объёмов выполненных работ [10; 11].

Однако на текущий момент указанные функциональные возможности не реализованы в полном объёме [12]. Несмотря на наличие специализированных программных комплексов, предназначенных для автоматизации строительных процессов, они не обеспечивают интеграцию с проектной моделью здания в полной мере.

Программные комплексы, разработанные для автоматизации работ на этапе строительства, часто предусматривают интеграцию технологии информационного моделирования зданий (ТИМ) в свои функциональные возможности. Однако на практике они используют не полноценную ТИМ-модель, а визуальную 3D-графику объекта, к которой не привязаны данные об объёмах, составе конструкций и других параметров, являющиеся обязательными для полноценной ТИМ-модели. Хотя визуализация в 3D может быть удобна для выполнения отдельных задач производственно-технического отдела, она не предоставляет проектировщику необходимой информации для полноценной работы с проектной моделью здания.

### Обсуждение

На разных этапах жизненного цикла объектов строительства применяются специализированные программные системы, которые помогают оптимизировать и автоматизировать различные процессы.

Предпроектный этап: программные системы для комплексного развития территории предоставляют информацию о планируемых и реализуемых проектах, оптимизируют интеграцию нового объекта в городскую среду,

помогают выбрать оптимальное местоположение для строительства.

Этап проектирования: специализированные программные комплексы для оценки несущей способности строительных конструкций выполняют расчёты на основные и особые сочетания нагрузок. Они помогают оптимизировать проектные решения для несущих конструкций зданий и подтверждают их надёжность и безопасность. Также применяются программные комплексы для геотехнического моделирования, которые оптимизируют инженерные решения при строительстве в сложных геологических условиях.

Этап строительства: программные комплексы для автоматизации документооборота и управления проектом помогают оптимизировать деятельность каждого отдела строительной организации и повышают общую эффективность работы компаний.

Внедрение специализированного программного обеспечения в строительной отрасли может значительно повысить эффективность и надёжность реализуемых проектов. Однако существует ряд факторов, затрудняющих объективную оценку целесообразности и экономической выгоды от использования подобных решений.

Во-первых, наблюдается дефицит конкретных примеров практического применения и аналитических данных, подтверждающих положительное влияние программного обеспечения на результаты работы в различных условиях.

Во-вторых, высокая стоимость лицензий и сложность освоения программных продуктов представляют собой существенные барьеры для малых и средних строительных организаций, ограничивая их возможности по внедрению и оценке эффективности программных решений.

Кроме того, стремительное развитие технологий и регулярное обновление программного обеспечения приводят к быстрому устареванию существующих данных и ме-

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апумчик, А. Российский софт на каждуюстройку – это перспектива или завышенное ожидание? / А. Апумчик // Цифра Страй : [сайт]. – 2024. – URL: <https://cifrastroy.ru/posts/rossijskij-soft-na-kazhduju-strojku-eto-perspektiva-ili-zavyshennoe-ozhidanie>. – Дата публикации: 05 июня 2024.
2. Перечень российского программного обеспечения для субъектов градостроительной деятельности в соответствии с данными единого реестра российского программного обеспечения для ЭВМ / Минстрой России : [официальный сайт]. – 2025. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/143878/>.
3. Ващенко, Т. В. Цифровые технологии в строительной отрасли: проблемы и перспективы внедрения / Т. В. Ващенко // Вестник Евразийской науки. – 2024. – Т. 16, № 52. – URL: <https://esj.today/PDF/38FAVN224.pdf>.
4. Попкова, А. А. Комплексное развитие территорий: современное состояние и проблемы реализации / А. А. Попкова, Ю. М. Конев, М. В. Канюков. – DOI 10.31660/1993-1824-2023-2-38-53 // Известия высших учебных заведений. Социология. Экономика. Политика. – 2023. – Т. 16, № 2. – С. 38–53.
5. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ : текст с изменениями, вступающими в силу с 01.09.24 : принят Государственной Думой 23 декабря 2009 года : одобрен Советом Федерации 25 декабря 2009 года. – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2010. – № 1. – Ст. 5. – Текущая редакция: 2021-09-01.
6. Мишин, А. Б. Современные тенденции цифровизации в строительной сфере / А. Б. Мишин, К. А. Восковых // Бюллетень науки и практики. – 2021. – Т. 7, № 11. – С. 284–290.
7. Теличенко, В. И. Информационное моделирование технологий и бизнес-процессов в строительстве : научное издание / В. И. Теличенко, А. А. Лапидус, А. А. Морозенко. – Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 144 с.
8. Каныгина, О. В. Влияние цифровых технологий на построение информационной системы планирования и бюджетирования на предприятиях строительной отрасли / О. В. Каныгина, А. Д. Юдина. – DOI 10.47576/2712-7516\_2022\_6\_6\_466 // Журнал прикладных исследований. – 2022. – Т. 6, № 6. – С. 466–472.
9. Бочаров, М. Е. Информационное моделирование в России / М. Е. Бочаров // Литрес : [интернет-ресурс]. – 2025. – 381 с. – URL: <https://www.litres.ru/book/mihail-evgenovich-bocharov/informacionnoe-modelirovaniye-v-rossii-71780080/>.
10. Бачурина, С. С. Информационное моделирование: методология использования цифровых моделей в процессе перехода к цифровому проектированию и строительству. Часть 1. Цифровой проектный менеджмент полного цикла в градостроительстве. Теория : научное издание / С. С. Бачурина. – Москва : ДМК Пресс, 2021. – 112 с.
11. Бачурина, С. С. Информационное моделирование: методология использования цифровых моделей в процессе перехода к цифровому проектированию и строительству. Часть 2. Переход к цифровому проектированию и строительству : научное издание / С. С. Бачурина. – Москва : ДМК Пресс, 2021. – 128 с.

тодов оценки, что затрудняет проведение сравнительного анализа и формирование обоснованных выводов.

Дополнительно следует отметить существующие ограничения на использование иностранного программного обеспечения в России, что может снижать его доступность и усложнять процесс оценки его эффективности.

## Заключение

В данной статье рассматривается значимость применения программных комплексов на предпроектном, проектном и строительном этапах жизненного цикла строительного объекта.

На предпроектном и строительном этапах законодательство не предъявляет обязательных требований к использованию специализированного программного обеспечения, в отличие от проектного этапа. Тем не менее, применение программных комплексов на этих стадиях способствует проведению аналистики, минимизации ошибок, оптимизации временных, материальных и финансовых ресурсов в процессе реализации строительного проекта.

Наиболее перспективным направлением представляется развитие программных комплексов, предназначенных для использования на строительном этапе жизненного цикла объекта. Внедрение таких систем позволяет снизить количество ошибок, сократить сроки строительства и уменьшить его стоимость.

В рамках дальнейших научных исследований представляется целесообразным продолжить изучение вопросов, связанных с внедрением программных комплексов на этапе строительства. В частности, необходимо провести анализ возможных ошибок, которые могут быть предотвращены с помощью таких комплексов, а также исследовать экономические аспекты и влияние на сроки реализации строительных проектов при использовании программного обеспечения.

ительной сфере / А. Б. Мишин, К.А. Восковых // Бюллетень науки и практики. – 2021. – Т. 7, № 11. – С. 284–290.

7. Теличенко, В. И. Информационное моделирование технологий и бизнес-процессов в строительстве : научное издание / В. И. Теличенко, А. А. Лапидус, А. А. Морозенко. – Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 144 с.

8. Каныгина, О. В. Влияние цифровых технологий на построение информационной системы планирования и бюджетирования на предприятиях строительной отрасли / О. В. Каныгина, А. Д. Юдина. – DOI 10.47576/2712-7516\_2022\_6\_6\_466 // Журнал прикладных исследований. – 2022. – Т. 6, № 6. – С. 466–472.

9. Бочаров, М. Е. Информационное моделирование в России / М. Е. Бочаров // Литрес : [интернет-ресурс]. – 2025. – 381 с. – URL: <https://www.litres.ru/book/mihail-evgenovich-bocharov/informacionnoe-modelirovaniye-v-rossii-71780080/>.

10. Бачурина, С. С. Информационное моделирование: методология использования цифровых моделей в процессе перехода к цифровому проектированию и строительству. Часть 1. Цифровой проектный менеджмент полного цикла в градостроительстве. Теория : научное издание / С. С. Бачурина. – Москва : ДМК Пресс, 2021. – 112 с.

11. Бачурина, С. С. Информационное моделирование: методология использования цифровых моделей в процессе перехода к цифровому проектированию и строительству. Часть 2. Переход к цифровому проектированию и строительству : научное издание / С. С. Бачурина. – Москва : ДМК Пресс, 2021. – 128 с.

12. Милкина, Ю. А. Внедрение современных информационных технологий в строительную отрасль / Ю. А. Милкина, Е. Е. Ма-

## REFERENCES

1. Apumchik, A. Rossijskij soft na kazhduju strojku – ehto perspektiva ili zavyshennoe ozhidanie? [Is Russian software for every construction site a prospect or an overestimated expectation?] / A. Apumchik // Cifrastroy : [website]. – 2024. – URL: <https://cifrastroy.ru/posts/rossijskij-soft-na-kazhduju-strojku-eto-perspektiva-ili-zavyshennoe-ozhidanie>. – Date of publication: June 05, 2024.
2. Perechen' rossijskogo programmnogo obespecheniya dlya sub'ektor gradostroitel'noj deyatel'nosti v sootvetstvii s dannymi edinogo reestra rossijskogo programmnogo obespecheniya dlya EVM [List of Russian software for subjects of urban planning activity in accordance with the data of the unified register of Russian computer software] / Minstroy Rossii [Ministry of Construction of Russia] : [official website]. – 2025. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/143878/>.
3. Vashchenko, T. V. Tsifrovye tekhnologii v stroitel'noj otrassli: problemy i perspektivy vnedreniya [Digital technologies in the construction industry: problems and prospects for implementation] / T. V. Vashchenko // Vestnik Evrazijskoj nauki [Bulletin of Eurasian Science]. – 2024. – Vol. 16, No. 52. – URL: <https://esj.today/PDF/38FAVN224.pdf>.
4. Popkova, A. A. Kompleksnoe razvitiye territorij: sovremennoe sostoyanie i problemy realizatsii [Complex development of territories: current state and problems of implementation] / A. A. Popkova, Yu. M. Konev, M. V. Kanyukov. – DOI 10.31660/1993-1824-2023-2-38-53 // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Sotsiologiya. Ekonomika. Politika [News of higher educational institutions. Sociology. Economy. Politics]. – 2023. – Vol. 16, No. 2. – Pp. 38–53.
5. Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdanij i sooruzhenij: Federal'nyj zakon ot 30.12.2009 № 384-FZ : tekst s izmeneniyami, vstupayushimi v silu s 01.09.24 [Technical Regulations on the safety of buildings and structures : Federal Law No. 384-FZ dated 12/30/2009 : text with amendments effective 09/01/24] : priyat Gosudarstvennoj Dumoj 23 dekabrya 2009 goda : odobren Sovetom Federatsii 25 dekabrya 2009 goda [adopted by the State Duma on December 23, 2009 : approved by the Federation Council on December 25, 2009]. – Sobranie zakonodatel'stva Rossijskoj Federatsii [Collection of legislation of the Russian Federation]. – 2010. – No. 1. – Art. 5.
6. Mishin, A. B. Sovremennye tendentsii tsifrovizatsii v stroitel'noj sfere [Modern trends of digitalization in the construction sector] / A. B. Mishin, K. A. Voskovykh // Byulleten' nauki i praktiki [Bulletin of Science and Practice]. – 2021. – Vol. 7, No. 11 –

## УДК 697.11

# Анализ подходов проектирования с использованием средств информационного моделирования с учётом особенностей этапов жизненного цикла объекта

Analysis of Design Approaches Using Information Modeling Tools Taking into Account the Characteristics of the Stages of the Object's Life Cycle

## Саввин Никита Юрьевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» (БГТУ им. В. Г. Шухова), Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46, n-savvin@mail.ru

## Savvin Nikita Yuryevich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov), Russia, 308012, Belgorod, ulitsa Kostyukova, 46, n-savvin@mail.ru

карова – DOI 10.36622/VSTU.2021.66.40.010 // Организатор производства. – 2021. – Т. 29, № 3. – С. 101–110.

- Pp. 284–290.
7. Telichenko, V. I. Informacionnoe modelirovaniye tekhnologij i biznes-processov v stroitel'stve : nauchnoe izdanie [Information modeling of technologies and business processes in construction : a scientific publication] / V. I. Telichenko, A. A. Lapidus, A. A. Morozenko. – Moscow : Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov [Publishing House of the Association of Construction Universities], 2008. – 144 p.
  8. Kanygina, O. V. Vliyanie tsifrovych tekhnologij na postroenie informatsionnoj sistemy planirovaniya i byudzhetirovaniya na predpriyatiyah stroitel'noj otrassli [The influence of digital technologies on the construction of an information system for planning and budgeting in the construction industry] / O. V. Kanygina, A. D. Yudina – DOI 10.47576/2712-7516\_2022\_6\_6\_466 // Zhurnal prikladnykh issledovanij [Journal of Applied Research]. – 2022. – Vol. 6, No. 6. – Pp. 466–472.
  9. Bocharov, M. E. Informacionnoe modelirovaniye v Rossii [Information modeling in Russia] / M. E. Bocharov // Litres : [online resource]. – 2025. – 381 p. – URL: <https://www.litres.ru/book/mihail-evgenovich-bocharov/informacionnoe-modelirovaniye-v-rossii-71780080/>.
  10. Bachurina, S. S. Informacionnoe modelirovaniye: metodologiya ispol'zovaniya tsifrovych modelej v protsesse perekhoda k tsifrovomu proektirovaniyu i stroitel'stviu. Chast' 1. Tsifrovoj proektnyyj menedzhment polnogo tsikla v gradostroitel'stve. Teoriya : nauchnoe izdanie [Information modeling: a methodology for using digital models in the process of transition to digital design and construction. Part 1. Full-cycle digital project management in urban planning. Teoriya : a scientific publication] / S. S. Bachurina. – Moscow : DMK Press, 2021. – 112 p.
  11. Bachurina, S. S. Informacionnoe modelirovaniye: metodologiya ispol'zovaniya tsifrovych modelej v protsesse perekhoda k tsifrovomu proektirovaniyu i stroitel'stviu. Chast' 2. Perekhod k tsifrovomu proektirovaniyu i stroitel'stviu : nauchnoe izdanie [Information modeling: a methodology for using digital models in the process of transition to digital design and construction. Part 2. Transition to digital design and construction : a scientific publication] / S. S. Bachurina. – Moscow : DMK Press, 2021. – 128 p.
  12. Milkina, Yu. A. Vnedrenie sovremennykh informatsionnykh tekhnologij v stroitel'nyuyu otrassl' [Introduction of modern information technologies in the construction industry] / Yu. A. Milkina, E. E. Makarova – DOI 10.36622/VSTU.2021.66.40.010 // Organizator proizvodstva [Production organizer]. – 2021. – Vol. 29, No. 3. – Pp. 101–110.

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_97

**Овсянников Юрий Григорьевич**

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» (БГТУ им. В. Г. Шухова), Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46, ternovka47@mail.ru

## Ovsyannikov Yuri Grigorievich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov), Russia, 308012, Belgorod, ulitsa Kostyukova, 46, ternovka47@mail.ru

**Феоктистов Алексей Юрьевич**

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» (БГТУ им. В. Г. Шухова), Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46, alexwolf79@mail.ru

## Feoktistov Alexey Yuryevich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov), Russia, 308012, Belgorod, ulitsa Kostyukova, 46, alexwolf79@mail.ru

**Алифанова Алла Ивановна**

Старший преподаватель кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» (БГТУ им. В. Г. Шухова), Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46, alifanova59@bstu.ru

## Alifanova Alla Ivanovna

Senior Lecturer of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov), Russia, 308012, Belgorod, ulitsa Kostyukova, 46, alifanova59@bstu.ru

**Аннотация.**

В статье обсуждаются вопросы методологии оценки жизнен-обеспечения инженерных систем здания, которая играет клю-чевую роль в обеспечении эффективного функционирования и долговечности объектов капитального строительства. Учитывая высокую конкуренцию в строительной отрасли и стремительное развитие цифровых технологий, особое внимание уделено важности системного подхода, который рассматривает объект как целостную систему взаимодействующих элементов.

Приведены примеры методов проектирования, включая традиционные и современные подходы, такие как гибкое управление проектами и ориентация на потребности пользователей с учётом необходимого программного обеспечения для реализации информационной модели.

Значительное место занимает обсуждение роли Building Information Modeling (BIM) – систем в создании точных информационных моделей, обеспечивающих интеграцию инженерных систем на всех этапах жизненного цикла здания. Осущест-

**Abstract.**

The article discusses the methodology for assessing the life support of building engineering systems, which plays a key role in ensuring the efficient operation and durability of capital construction projects. Given the high competition in the construction industry and the rapid development of digital technologies, special attention is paid to the importance of a systems approach that considers an object as an integral system of interacting elements.

Examples of design methods are given, including traditional and modern approaches, such as flexible project management and focus on user needs, taking into account the necessary software for implementing the information model.

A significant place is occupied by the discussion of the role of Building Information Modeling (BIM) systems in creating accurate information models that ensure the integration of engineering systems at all stages of the building life cycle. The marketing ap-

влена адаптация маркетингового подхода с использованием графиков развития проекта к строительной отрасли. Также подчёркивается значение учёта временных изменений и внешних воздействий для адекватной оценки поведения системы. Особое внимание уделено технологии информационного моделирования зданий – BIM, которая позволяет создавать цифровые модели, отражающие весь жизненный цикл строительного объекта. Рассмотрены ключевые этапы процесса информационного моделирования.

Целью работы является разработка методологических основ, обеспечивающих устойчивое функционирование инженерных систем на всех этапах эксплуатации здания. В итоге, статья акцентирует внимание на необходимости внедрения современных методик и технологий для повышения качества проектирования и минимизации рисков.

**Ключевые слова:** моделирование; подходы; жизненный цикл; информационная модель; методы проектирования; методология; инженерные системы.

roach using project development schedules is adapted to the construction industry. The importance of taking into account time changes and external influences for an adequate assessment of the system behavior is also emphasized. Particular attention is paid to building information modeling technology - BIM, which allows you to create digital models reflecting the entire life cycle of a construction project. The key stages of the information modeling process are considered.

The purpose of the work is to develop methodological foundations that ensure the stable functioning of engineering systems at all stages of the building's operation. As a result, the article focuses on the need to implement modern methods and technologies to improve the quality of design and minimize risks.

**Keywords:** modeling; approaches; life cycle; information model; design methods; methodology; engineering systems.

ряют процессы возведения и ввода в эксплуатацию объектов различного назначения во всех странах мира. Уровень конкуренции в строительной отрасли высок как никогда, поэтому внедрение современных программных продук-

тов, системного подхода на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) объекта капитального строительства становится необходимым [1].

Системный подход – это метод анализа и решения задач, который рассматривает объект или явление как целостную систему, включающую в себя взаимосвязанные элементы. Этот подход применяется во множестве дисциплин, таких как инженерия, менеджмент, экология и социальные науки. Рассмотрим ключевые аспекты системного подхода более подробно [2].

Системы обычно состоят из подсистем, которые также могут делиться на элементы. Структурирование объектов по уровням позволяет более эффективно управлять ими и анализировать их воздействие.

Любая система подвержена изменениям во времени. Важным аспектом системного подхода является оценка того, как системы реагируют на внешние или внутренние воздействия. В результате моделирование динамики позволяет предсказывать поведение системы в разных ситуациях.

Поскольку системный подход применяется при решении задач анализа и синтеза систем, то существует ряд составляющих системного подхода. Так, при изучении (анализе) системы можно ограничиться либо изучением структуры, либо изучением функции. Соответственно, применяют структурный или функциональный подходы. В качестве структурной составляющей используется комплекс инженерных систем здания, функционирующих как единый организм. В качестве функционального подхода рассматривается математическая модель потокораспределения в инженерных системах, рассмотренная в [3].

Поскольку системы сложны, современные решения зачастую требуют комплексного подхода. Системный подход позволяет оценить, как предложенные изменения повлияют на систему в целом. Кроме того, использование системного подхода в управлении проектами помогает поэтапно оценивать прогресс и вносить корректировки в стратегии, исходя из анализа системных взаимосвязей [4].

Важным преимуществом системного подхода является улучшение качества решений, поскольку понимание взаимосвязей позволяет лучше оценивать потенциальные риски и минимизировать их влияние. Себестоимость и эффективность можно улучшить за счёт системного подхода, который помогает выявить потенциал для оптимизации [5].

**Задачи исследования:**

1. Осуществить анализ тенденций в области информационного моделирования.
2. Предложить собственную классификацию методов проектирования с учётом необходимого программного обеспечения.
3. Адаптировать маркетинговый подход к оценке жизненного цикла здания.
4. Разработать концепцию методологии оценки жизненобеспечения инженерных систем зданий.

В качестве гипотезы выступает предположение, что информационную модель здания можно представить в виде базы данных, включающей связанные информационные блоки всех этапов жизненного цикла объекта строительства.

**Материалы и методы**

Существует множество методов создания моделей систем, включая графические, алгебраические и симуляции. Модели помогают визуализировать систему и упрощают анализ. В процессе системной динамики изучается, как взаимодействие между элементами системы приводит к изменениям во времени. Этот принцип часто используется в экономике и экологии для прогнозирования последствий различных политик [6].

Отечественные и зарубежные учёные занимаются активной разработкой технологий в области информационного моделирования – не только программных продуктов, но и экономических моделей, баз данных, имитационных конструкторских моделей и т. д. для дальнейшего использования на различных стадиях ЖЦ. Этот процесс называется разработкой CAD-систем (Computer Aided Design), иными словами, это высокотехнологичная методика, позволяющая вносить изменения в реальном времени, оптимизировать процессы, внедрять технологии с помощью специализированных компьютерных программ. CAD-программы нашли широкое применение не только в строительстве, но и в искусстве, дизайне и т. д. Применительно к моделированию объектов капитального строительства с учётом инженерных систем используются BIM-технологии [7–9].

Развитие методов проектирования в современном мире тесно связано с применением компьютерных технологий и системного подхода. Важнейшие шаги в этой области были сделаны рядом выдающихся учёных, чьи разработки оказали значительное влияние на проектирование сложных инженерных систем и архитектурных сооружений. В работе [10] Бойков А. А. предложил инновационную концепцию использования компьютерной графики для создания чертежей и моделей.

Другим ключевым учёным, внёсшим значительный вклад в эту область, стал Беркут В. П., специализирующийся на системном инжиниринге. Он предложил методологию моделирования сложных технических систем, используя принципы системного подхода, что позволило значительно повысить точность и надёжность проектов [11].

В исследовании [12] Хоревым Г. А. и др. представлены алгоритмы автоматической генерации оптимизированных структур для инженерных конструкций, это способствовало значительным улучшениям в проектировании мостов, зданий и других инфраструктурных объектов. Его работы позволили значительно ускорить процесс проектирования и улучшить качество конечного продукта.

Эти и другие учёные [13–16] внесли значительный вклад в развитие методов проектирования, интегрировав передовые технологии и научные подходы в повседневную практику инженеров и архитекторов. Их усилия привели к тому, что современные методы проектирования стали более точными, эффективными и ориентированными на решение сложных задач, стоящих перед человечеством. Основные способы проектирования представлены в таблице 1.

Важно отметить, что различия между традиционными и современными методами касаются подходов, технологий и принципов, используемых при создании проектов.

**Введение**

Строительство в настоящее время невозможно без применения цифровизации. Технологии проектирования, электронного документооборота значительно уско-

Методология	Программное обеспечение	Суть метода
Линейный подход (Waterfall)	AutoCAD, DraftSight	Проектирование осуществляется в строгой последовательности: анализ требований, концепция, проектирование, реализация, проверка и внедрение
Фокус на документации	Onshape, Autodesk Fusion 360	На каждом этапе ЖЦ создаётся пакет документов (чертежи, спецификации, листы описания и т.д.). Он служит основой для обмена информацией между отделами
Нормативное регулирование и стандартизация	Access, Navisworks	Осуществляется строгое соблюдение стандартов и нормативов для обеспечения высокой согласованности и надёжности
Минимальная вовлечённость пользователей	SolidWorks, CATIA, SketchUp	Сбор требований от пользователей осуществляется лишь на начальном этапе
Сфокусированность на технологических решениях	ArcGIS, QGIS	Постоянная адаптация современных технологий для проектирования
Гибкий подход (Agile и Scrum)	SolidWorks, CATIA, Autodesk Inventor	Используются методы, которые позволяют быстро адаптироваться к изменениям и обеспечивают возможность поэтапной разработки с частыми проверками и корректировками
Ориентация на пользователей (Design Thinking)	Siemens NX, SolidEdge	Удовлетворение потребностей конечного пользователя, для этого применяется дизайн-мышление
Кросс-функциональные команды (Lean)	V-Ray, Blender	Использование междисциплинарных команд, включающих специалистов из разных команд
Итеративный процесс (Rapid Prototyping)	Revit, ArchiCAD, Renga	Применение повторяющихся циклов проектирования для улучшения конечного результата
Интеграция технологий	Cloud-Based Integration Services, IBM WebSphere MQ	Написания, редактирование, компиляция, отладка и тестирование программного обеспечения на различных платформах и языках программирования

**Табл. 1. Способы проектирования**  
**Tab. 1. Design methods**

Традиционные методы сложились исторически и основывались на многолетнем опыте, проверенном временем. Их характерными чертами являются ручная разработка проектной документации, адаптированная для программных продуктов, таких как AutoCAD. Сегодня этот этап заменяется компьютерными средствами, но понимание основ ручной графики остаётся необходимым для профессионалов. Основой традиционных методов было многократное повторение проверенных приёмов и решений, основанных на практике предыдущих поколений архитекторов и строителей. Традиционные подходы предполагают тщательную проработку каждого элемента, медленную проверку расчётов и постепенную реализацию идей, что увеличивает сроки выполнения работ.

Современный подход к проектированию сформировался благодаря развитию цифровых технологий и научным достижениям последних десятилетий. Сейчас проекты создаются в цифровом пространстве с помощью специализированных компьютерных программ (BIM-технологии, Autodesk Revit, Renga и др.). Отличительной особенностью современных методов выступает использование математических моделей, например, модели инженерной системы [3]. Кроме того, благодаря автоматизации значительная часть рутинных операций выполняется быстрее и точнее, что сокращает сроки проектирования и снижает вероятность ошибок. Современный подход предполагает разработку проекта в виртуальной трёхмерной среде, точный расчёт конструкций, автоматическое формирование рабочих чертежей и спецификаций материалов.

Таким образом, традиционность методов характеризуется ориентацией на практику и консервативные принципы, тогда как современность связана с активным внедрением цифровых технологий, научно-обоснованными подходами и стремлением к максимальной скорости и ка-

честву проектирования. Оба подхода важны и дополняют друг друга, поскольку традиционный опыт лежит в основе современных методик, а цифровые инструменты расширяют возможности архитектора и инженера.

### Результаты

Опираясь на результаты исследований, а также учитывая выделенные в таблице 1 методы проектирования, авторы предлагают собственную уникальную методику осуществления BIM-проектирования. Её суть заключается в корреляции основных принципов при создании информационных моделей объектов для оценки воздействия инженерных систем на жизненный цикл здания.

В результате можно сформулировать определение процесса моделирования ЖЦ с учётом инженерных систем: это процесс оценки различных стадий существования объекта, начиная с концепции и заканчивая утилизацией, для разработки стратегии повышения эффективности, снижения затрат и минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

Для достижения этой цели необходимо будет запустить процесс взаимодействия (методологию) от поступления начальных задач, т. е. исходных данных, и конечного результата. Этот путь и будет определять весь процесс BIM-моделирования.

В связи с этим становится очевидным тот факт, что каждый этап ЖЦ нуждается в глубоком анализе с целью определения начальных и граничных условий.

Основополагающей концепцией жизненного цикла является Product Life Cycle (PLM), предложенная О. Клеппнером в начале XX в. Важно отметить, что заложенная им основа PLM-систем развила и структурировалась в основные направления – кратко их можно описать так:

- PDM-система – предназначена для хранения и управления данными,
- CAD-система – проектирование изделий,

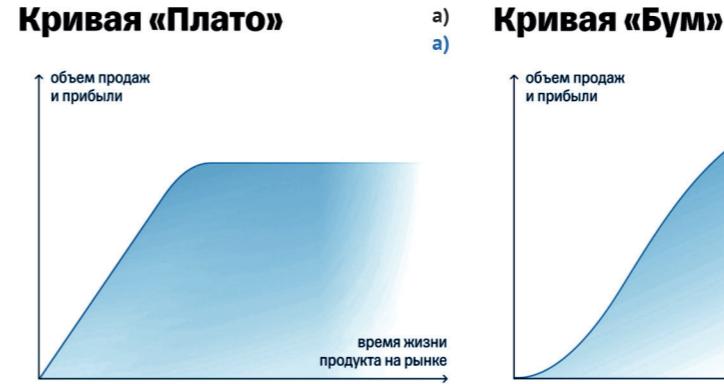
- CAE-система – инженерные расчёты,
- CAPP-система – разработка техпроцессов,
- CAM-система – разработка управляющих программ для станков с ЧПУ,
- MPM-система – моделирование и анализ производства изделия.

Последователем этой концепции стал Йозеф Шумпетер. Он конкретизировал тип нововведений, а также предложил термин «экономическое новаторство». Его работу продолжил Т. Левитт в своей работе «Маркетинговое воображение». Суть его теории заключалась в том, что индивиду необходимо знать в совершенстве то, чем он управляет, для осуществления возможности прогнозирования и выбора стратегии. Отклик его теории находит и в современных исследованиях, так, автор [17] утверждает, что работа со зданиями осуществляется даже после их сноса в виртуальном пространстве, особенно если это было исторически или культурно значимое здание. Соответственно, автор предлагает усовершенствовать определение жизненного цикла, а именно расширить, включив в него период виртуального существования [18].

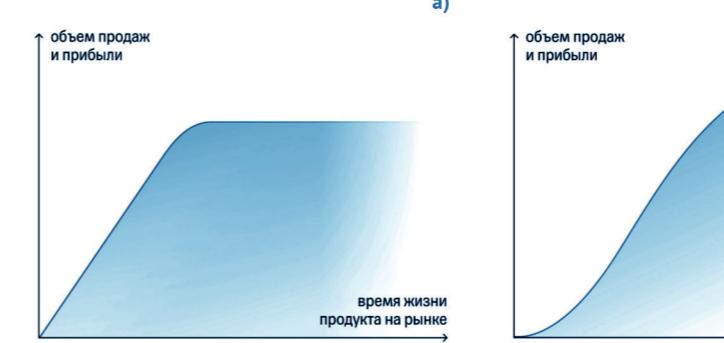
Обоснование маркетингового подхода в жизненном цикле здания заключается в том, что маркетинг на рынке недвижимости помогает повысить привлекательность объекта у инвесторов, покупателей, арендаторов и других целевых групп. В основу научных изысканий по разработке методологии заложены практические результаты по графической визуализации ЖЦ товаров, адаптированных для строительной отрасли. Внешний вид графиков представлен на рисунке 1.

График «Плато» характерен для проектов с длительным периодом исследований или строительства, например, многоквартирные дома, общественные здания и т. д.

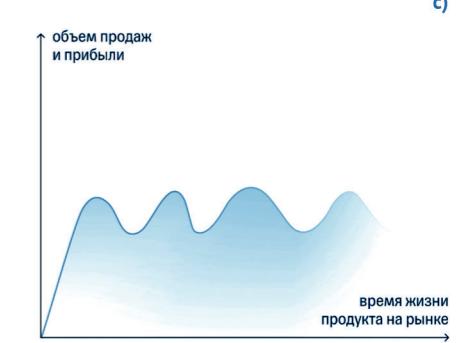
### Кривая «Плато»



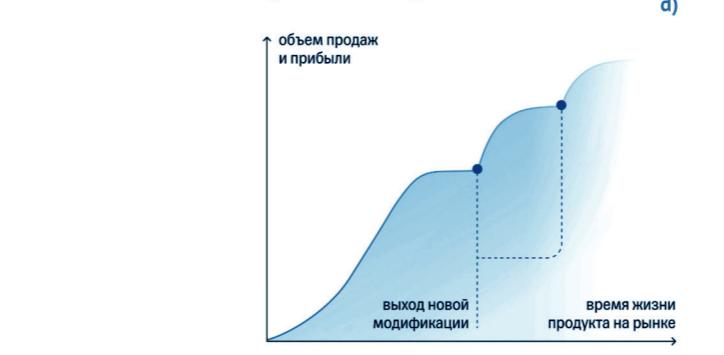
### Кривая «Бум»



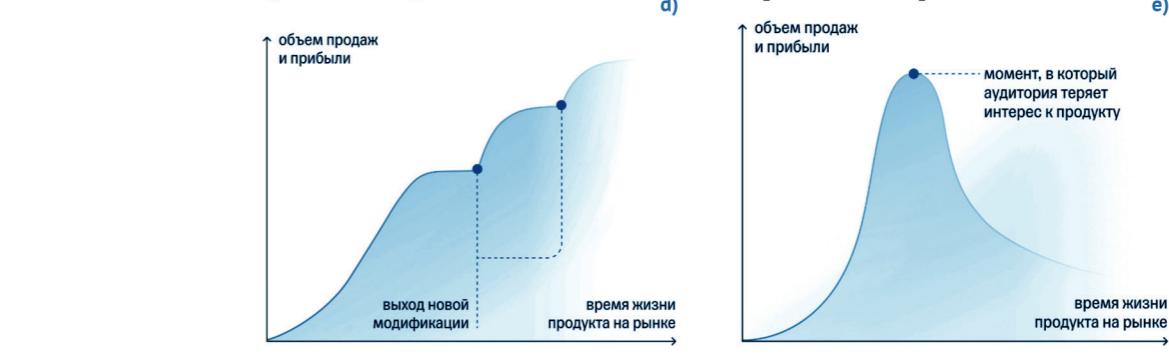
### Кривая «Сезонность»



### Кривая «Гребешок»



### Кривая «Провал»



**Рис. 1. Графики развития объектов во время жизни на рынке:**  
**а) кривая «Плато»; б) кривая «Бум»; в) кривая «Сезонность»; г) кривая «Гребешок»; д) кривая «Провал»**  
**Fig. 1. Graphs of development of objects during their life on the market:**  
**a) "Plateau" curve; b) "Boom" curve; c) "Seasonality" curve; d) "Scallop" curve; e) "Dip" curve**

консервируют и сносят. Разумеется, это всё чревато большими затратами [21].

В результате маркетингового исследования установлена взаимосвязь жизненного цикла строительных объектов с обобщённым жизненным циклом товаров различного назначения, позволяющая прогнозировать необходимость принятия действий, решений, направленных на повышение привлекательности строительных объектов с целью их коммерциализации.

Очевидным становится тот факт, что формирование методологических, системотехнических основ организации жизненного цикла объектов капитального строительства с учётом инженерных систем очень актуально, это позволит экономить значительные денежные и трудовые ресурсы, поскольку намного проще устранить коллизии на этапе проектирования объекта, чем во время его строительства. Прохождение данного пути невозможно представить без применения BIM-технологий как основной составляющей CAD-систем.

Инженерные системы тесно связаны с жизненным циклом здания, так как являются основой его инфраструктуры и призваны обеспечивать комфортные и безопасные условия жизни или пребывания людей в нём.

Важным аспектом при составлении системотехнических основ для поддержания устойчивого состояния работоспособности инженерных систем как единого организма на протяжении жизненного цикла является эксплуатация. Логично, что для этого необходимо разработать модель надёжности методов проектирования,

они представлены в таблице 1. Визуальное изображение модели представлено на рисунке 2, в качестве основы использованы результаты исследования, проведённого в работе [22]. Ось «документация» имеет количественную оценку, выраженную в процентах, где 100 % соответствует пиковое значение на переходе этапа «строительство» к этапу «ввод в эксплуатацию».

Установлено, что применение современных методов в сочетании с традиционными делает процесс разработки документации плавным на всех этапах жизненного цикла объекта и снижает до минимума вероятность потери данных при передаче информации.

Недостатком существующих моделей является отсутствие возможности осуществлять прогнозирование срока службы конструкций и материалов, но с учётом того, что информационная модель позволяет получить доступ к объекту в любой момент времени, возможно увеличение сроков их безопасной эксплуатации.

### Обсуждение

В качестве примера можно рассмотреть монолитные участки здания, в процессе эксплуатации они подвергаются воздействию многих внешних (природных, техногенных, искусственных и т. д.) и внутренних (микроклимат помещений, проведение ремонтных работ и т. д.) факторов, повлекших снижение эксплуатационных показателей. Подобного рода информация и должна храниться в информационной модели объекта с целью возможности принятия упреждающих действий специализированным обслуживающим персоналом.

По своей сути информационная модель здания является базой данных, в которой каждый этап жизненного цикла представляет собой блок с информацией, характерной для этого периода.

### Заключение

В данной работе была рассмотрена методология оценки жизнеобеспечения инженерных систем зданий, подчёркивающая значимость системного подхода в проектировании и управлении строительными объектами. Были проанализированы различные методы проектирования,

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцевич, И. В. Современные тенденции развития цифровых продуктов строительной отрасли как потенциал повышения производительности труда / И. В. Мальцевич // Экономика и банки. – 2023. – № 1. – С. 86–95.
2. Атдаев, Я. Д. Системный анализ как метод решения управленческих задач на основе системного подхода / Я. Д. Атдаев, И. Мухамметырадов, Ш. Моллаева // Академическая публистика. – 2024. – № 5-1. – С. 146–147.
3. Цифровой двойник инженерных систем общественного здания / Т. Н. Ильина, Н. Ю. Саввин, О. А. Аверкова [и др.] // Вестник Евразийской науки. – 2024. – Т 16, № 6. – URL: <https://esj.today/PDF/63SAVN624.pdf>.
4. Зуева, О. А. Системный подход как ключевой методологический подход к исследованию роли национального хозяйства России в условиях трансформации / О. А. Зуева, Р. С. Зуев. – DOI 10.17586/2310-1172-2022-15-1-3-15 // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. – 2022. – № 1. – С. 3–15.
5. Костогрызов, А. И. К методам системной инженерии: вероятностные подходы к анализу процесса управления качеством системы / А. И. Костогрызов. – DOI 10.25559/SITITO.18.202202.227-240 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2022. – Т. 18, № 2. – С. 227–240.
6. Системный подход как основная основа методологии системного анализа / А. Абдыреимов, М. Оразгульева, Г. Маметджумаева, А. Гелдиев // Матрица научного познания. – 2024. – № 11-1. – С. 186–188.
7. Попов, В. В. Имитационная модель процессов информационного обмена в системе управления инженерными подсистемами зданий и сооружений / В. В. Попов // Информационные системы и технологии. – 2021. – № 1 (123). – С. 70–77.
8. Кунгурцев, А. Б. Имитационная модель для исследования эффективности денормализации реляционной базы данных в информационной системе / А. Б. Кунгурцев, С. Л. Зиноватная // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2008. – № 1 (19). – С. 60–68.
9. Сравнительный анализ систем автоматизированного проектирования работ (CAD) и систем информационного моделирования зданий (BIM) / В. А. Ильинова, Р. М. Гулиева, В. К. Антипова [и др.] // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. – 2022. – № 11. – С. 34–37.
10. Бойков, А. А. Использование чертежей с разметкой для проверки электронных чертежей и трёхмерных моделей / А. А. Бойков, А. М. Федотов // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зорнию «Графикон-2018». – 2018. – № 28. – С. 328–331.
11. Беркут, В. П. Системный подход и системный анализ как методологические средства научного исследования / В. П. Беркут, Е. А. Дубинина // Гуманитарный вестник Военной академии Ракетных войск стратегического назначения. – 2020. – № 3 (20). – С. 28–41.
12. Хорев, Г. А. Разработка алгоритмов генерации ложных сетевых информационных объектов для маскирования структуры автоматизированных систем управления / Г. А. Хорев, М. А. Каплин, Д. В. Тимошенко // Вестник современных исследований. – 2018. – № 11.7 (26). – С. 583–586.
13. Гладков, Л. А. Интегрированный подход к решению задач оптимизации на основе методов эволюционного проектирования и мультиагентных технологий / Л. А. Гладков, Н. В. Гладкова // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2019. – № 1 (34). – С. 1–8.
14. Горбанева, Е. П. Передовые методы и технологии подземного строительства и проектирования уникальных зданий и сооружений / Е. П. Горбанева, В. С. Копицын, С. И. Ушаков // Строительство и недвижимость. – 2022. – № 2 (11). – С. 12–20.
15. Абрамов, С. Н. Внедрение передовых технологий автоматизации проектирования: переход от 3D САПР к информационному моделированию / С. Н. Абрамов, П. Г. Клейменов, В. В. Росляков // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2019. – № 1. – С. 20–25.
16. К вопросу о стадиях жизненного цикла строительных систем в контексте принципов информационного моделирования / С. Г. Абрамян, О. В. Бурлаченко, О. В. Оганесян [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 6 (90). – С. 607–620.
17. Kulakov, A. R. Mechanisms for the application of information modelling technologies at individual stages of the life cycle of development projects / A. R. Kulakov, V. A. Akristiniy. – DOI 10.22337/2073-8412-2023-2-56-64 // Real Estate: Economics, Management. – 2023. – No. 2. – Pp. 56–64.
18. Khrustalev, D. A. Changes and the principle of assessment of readiness for changes in the life cycle of buildings / D. A. Khrustalev. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.8.1201-1211 // Vestnik MGSU. – 2023. – Vol. 18, No. 8. – Pp. 1201–1211.
19. Suvorova, M. O. Scientific and theoretical approach to complex assessment of building life cycle from a low-carbon development perspective / M. O. Suvorova, A. E. Naumov. – DOI 10.22337/2073-8412-2023-1-6-10 // Real Estate: Economics, Management. – 2023. – No. 1. – Pp. 6–10.
20. Design of buildings with energy-efficient structures from the perspective of life cycle management of the construction object / S. V. Fedosov, V. N. Fedosev, I. A. Zaitseva [et al.] // Smart Composite in Construction. – 2023. – Vol. 4, Iss. 4. – Pp. 20–29.
21. Leonovich, S. N. 3D-Modeling for Life Cycle of the Structure / S. N. Leonovich, J. Riachi. – DOI 10.21122/2227-1031-2021-20-1-5-9 // Science and Technique. – 2021. – Vol. 20, No. 1. – Pp. 5–9.
22. Беляев, А. В. Жизненный цикл объектов строительства при информационном моделировании зданий и сооружений / А. В. Беляев, С. С. Антипов // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 1. – С. 65–72.

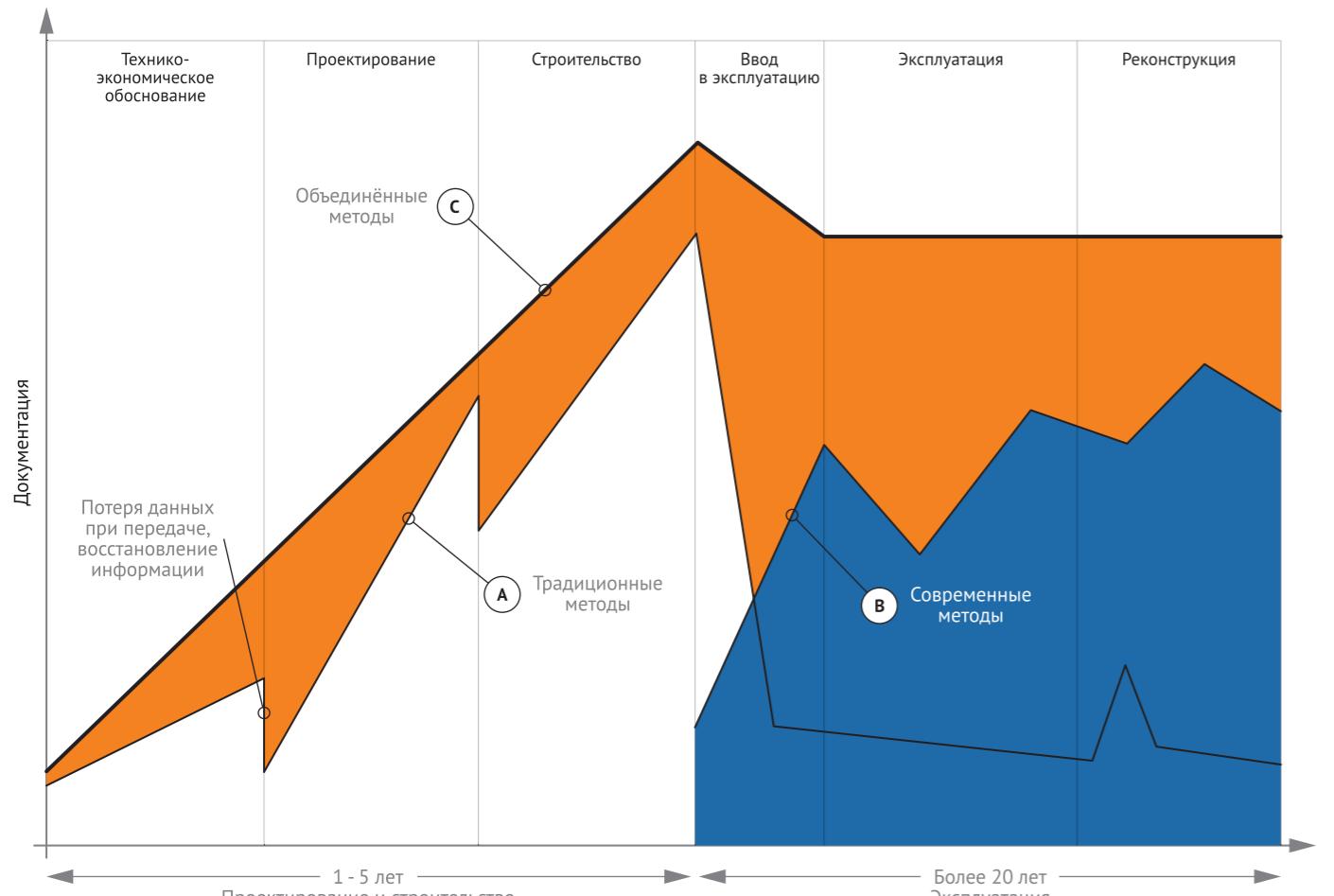


Рис. 2. Количественный процесс использования документации на разных стадиях жизненного цикла  
Fig. 2. Quantitative process of using documentation at different stages of the life cycle

2. Atdayev, Ya. D. Sistemnyj analiz kak metod resheniya upravlencheskikh zadach na osnove sistemnogo podkhoda [Systems analysis as a method for solving management problems based on a systems approach] / Ya. D. Atdayev, I. Mukhametmyradov, Sh. Mollayeva // Akademicheskaya publitsistika [Academic journalism]. – 2024. – No. 5-1. – Pp. 146–147.
3. Tsifrovoy dvojnik inzhenernykh sistem obshhestvennogo zdaniya [Digital twin of engineering systems of a public building] / T. N. Ilyina, N. Yu. Savin, O. A. Averkova [et al.] // Vestnik Evrazijskoj nauki [Bulletin of Eurasian Science]. – 2024. – Vol. 16, No. 6. – URL: <https://esj.today/PDF/63SAVN624.pdf>.
4. Zuyeva, O. A. Sistemnyj podkhod kak klyuchevoj metodologicheskij podkhod k issledovaniyu roli natsional'nogo khozyajstva Rossii v usloviyakh transformatsii [Systems approach as a key methodological approach to the study of the role of the national economy of Russia in the context of transformation] / O. A. Zuyeva, R. S. Zuyev. – DOI 10.17586/2310-1172-2022-15-1-3-15 // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya: Ehkonomika i ehkologicheskij menedzhment [Scientific Journal of the National Research University of ITMO. Series: Economics and Environmental Management]. – 2022. – № 1. – Pp. 3–15.
5. Kostogryzov, A. I. K metodam sistemnoj inzhenerii: veroyatnostnye podkhody k analizu protsessa upravleniya kachestvom sistemy [Towards systems engineering methods: probabilistic approaches to the analysis of the system quality management process] / A. I. Kostogryzov. – DOI 10.25559/SITITO.18.202202.227-240 // Sistemnye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovaniye [Modern information technologies and IT education]. – 2022. – Vol. 18, No. 2. – Pp. 227–240.
6. Sistemnyj podkhod kak osnovnaya osnova metodologii sistemnogo analiza [Systems approach as the main basis of the systems analysis methodology] / A. Abdyreimov, M. Orazgulyyeva, G. Mammetdzhumayeva, A. Geldiyev // Matritsa nauchnogo poznaniya [Matrix of scientific knowledge]. – 2024. – No. 11-1. – Pp. 186–188.
7. Popov, V. V. Imitatsionnaya model' protsessov informatsionnogo obmena v sisteme upravleniya inzhenernymi podsystemami zdanij i sooruzhenij [Simulation model of information exchange processes in the control system of engineering subsystems of buildings and structures] / V. V. Popov // Informatsionnye sistemy i tekhnologii [Information systems and technologies]. – 2021. – No. 1 (123). – Pp. 70–77.
8. Kungurtsev, A. B. Imitatsionnaya model' dlya issledovaniya effektivnosti denormalizatsii relyatsionnoj bazy dannykh v informatsionnoj sisteme [Simulation model for studying the efficiency of denormalization of a relational database in an information system] / A. B. Kungurtsev, S. L. Zinovatnaya // Radioelektronika, informatika, upravleniye [Radio electronics, computer science, management]. – 2008. – No. 1 (19). – Pp. 60–68.
9. Sravnitel'nyj analiz sistem avtomatizirovannogo proyektirovaniya rabot (CAD) i sistem informatsionnogo modelirovaniya zdanij (BIM) [Comparative analysis of computer-aided design (CAD) systems and building information modeling (BIM) systems] / V. A. Il'yenkova, R. M. Guliyeva, V. K. Antipova [et al.] // Konkurentosposobnost' v global'nom mire: ehkonomika, nauka, tekhnologii [Competitiveness in the global world: economics, science, technology]. – 2022. – No. 11. – Pp. 34–37.
10. Boikov, A. A. Ispol'zovaniye chertejey s razmetkoj dlya proverkii elektronnykh chertejey i tryokhmernykh modelej [Using drawings with markup to check electronic drawings and three-dimensional models] / A. A. Boikov, A. M. Fedotov // Trudy Mezhdunarodnoj konferentsii po komp'yuternoj grafike i zreniyu "GrafiKon-2018" [Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision "GrafiCon-2018"]. – 2018. – No. 28. – Pp. 328–331.
11. Berkut, V. P. Sistemnyj podkhod i sistemnyj analiz kak metodologicheskiye sredstva nauchnogo issledovaniya [Systems approach and systems analysis as methodological tools of scientific research] / V. P. Berkut, Ye. A. Dubinina // Gumanitarnyj
- vestnik Voyennoj akademii Raketykh vojsk strategicheskogo naznacheniya [Humanitarian Bulletin of the Military Academy of Strategic Missile Forces]. – 2020. – No. 3 (20). – Pp. 28–41.
12. Khorev, G. A. Razrabotka algoritmov generatsii lozhnykh setevykh informatsionnykh ob'yektov dlya maskirovaniya struktury avtomatizirovannykh sistem upravleniya [Development of algorithms for generating false network information objects to mask the structure of automated control systems] / G. A. Khorev, M. A. Kaplin, D. V. Timoshenko // Vestnik sovremennoj issledovaniy [Bulletin of Modern Research]. – 2018. – No. 11.7 (26). – Pp. 583–586.
13. Gladkov, L. A. Integriruyushchij podkhod k resheniyu zadach optimizatsii na osnove metodov ehvoljutsionnogo proyektirovaniya i mul'tiagentnykh tekhnologij [Integrated approach to solving optimization problems based on evolutionary design methods and multi-agent technologies] / L. A. Gladkov, N. V. Gladkova // Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoye obrazovaniye [Computer Science, computer technology and engineering education]. – 2019. – No. 1 (34). – Pp. 1–8.
14. Gorbaneva, Ye. P. Peredovyye metody i tekhnologii podzemnogo stroitel'stva i proyektirovaniya unikal'nykh zdanij i sooruzhenij [Advanced methods and technologies for underground construction and design of unique buildings and structures] / Ye. P. Gorbaneva, V. S. Kopitsyn, S. I. Ushakov // Stroitel'stvo i nedvizhimost' [Construction and real estate]. – 2022. – No. 2 (11). – Pp. 12–20.
15. Abramov, S. N. Vnedreniye peredovyykh tekhnologij avtomatizatsii proyektirovaniya: perekhod ot 3D SAPR k informatsionnomu modelirovaniyu [Implementation of advanced design automation technologies: the transition from 3D CAD to information modeling] / S. N. Abramov, P. G. Kleymenov, V. V. Roslyakov // Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanij [The World of petroleum products. Bulletin of Oil Companies]. – 2019. – No. 1. – Pp. 20–25.
16. K voprosu o stadiyakh zhiznennogo tsikla stroitel'nykh sistem v kontekste printsipov informatsionnogo modelirovaniya [On the issue of the stages of the life cycle of construction systems in the context of the principles of information modeling Abstract] / S. G. Abramyan, O. V. Burlachenko, O. V. Oganesyan [et al.] // Inzhenernyj vestnik Doma [Engineering Bulletin of the Don]. – 2022. – No. 6 (90). – Pp. 607–620.
17. Kulakov, A. R. Mechanisms for the application of information modelling technologies at individual stages of the life cycle of development projects / A. R. Kulakov, V. A. Akristiniy. – DOI 10.22337/2073-8412-2023-2-56-64 // Real Estate: Economics, Management. – 2023. – No. 2. – Pp. 56–64.
18. Khrustalev, D. A. Changes and the principle of assessment of readiness for changes in the life cycle of buildings / D. A. Khrustalev. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.8.1201-1211 // Vestnik MGSU. – 2023. – Vol. 18, No. 8. – Pp. 1201–1211.
19. Suvorova, M. O. Scientific and theoretical approach to complex assessment of building life cycle from a low-carbon development perspective / M. O. Suvorova, A. E. Naumov. – DOI 10.22337/2073-8412-2023-1-6-10 // Real Estate: Economics, Management. – 2023. – No. 1. – Pp. 6–10.
20. Design of buildings with energy-efficient structures from the perspective of life cycle management of the construction object / S. V. Fedosov, V. N. Fedoseev, I. A. Zaitseva [et al.] // Smart Composite in Construction. – 2023. – Vol. 4, Iss. 4. – Pp. 20–29.
21. Leonovich, S. N. 3D-Modeling for Life Cycle of the Structure / S. N. Leonovich, J. Riachi. – DOI 10.21122/2227-1031-2021-20-1-5-9 // Science and Technique. – 2021. – Vol. 20, No. 1. – Pp. 5–9.
22. Belyaev, A. V. Zhiznennyj tsikl ob'yektov stroitel'stva pri informatsionnom modelirovaniyu zdanij i sooruzhenij [Life cycle of construction projects in information modeling of buildings and structures] / A. V. Belyaev, S. S. Antipov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil engineering]. – 2019. – No. 1. – Pp. 65–72.

УДК 624.042

## Ресурсно-оптимизационный подход при ремонтных работах на объектах энергетического строительства башенного типа

Resource-Optimization Approach to Repair Works at Tower-Type Energy Construction Sites

**Абдуллаев Эдвард Юнусович**

Ректор ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (КГЭУ), Россия, 420066, Казань, улица Красносельская, 51, kgeu@kgeu.ru

**Abdullazyanov Edward Yunusovich**

Rector of Kazan State Energy University (KGEU), Russia, 420066, Kazan, ulitsa Krasnoselskaya, 51, kgeu@kgeu.ru

**Сабитов Линар Салихзанович**

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе 26, sabitov-kgasu@mail.ru

**Sabitov Linar Salikhzhanovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, sabitov-kgasu@mail.ru

**Гарькин Игорь Николаевич**

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Архитектура, реставрация и дизайн», ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы» (РУДН), Россия, 117198, Москва, улица Миклухо-Маклая, 6, igor\_garkin@mail.ru

**Garkin Igor Nikolaevich**

Candidate of Engineering Sciences, Head of the Department of Architecture, Restoration and Design, Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia (RUDN), Russia, 117198, Moscow, ulitsa Miklukho-Maklaya, 6, igor\_garkin@mail.ru

**Закирова Марина Анатольевна**

Заведующий кафедрой «Жилищно-коммунальный комплекс», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, zakirovaMA@mgsu.ru

**Zakirova Marina Anatolyevna**

Head of the Department of Housing and Public Utilities, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, zakirovaMA@mgsu.ru

**Аннотация.**

В данной работе рассматривается ресурсно-оптимизационный подход к организации и проведению ремонтных работ на объектах энергетического строительства башенного типа, таких как линии электропередач, дымовые трубы электростанций, градирни и другие аналогичные сооружения. Подчёркивается необходимость разработки комплексной стратегии технического обслуживания, базирующейся на современных методах оценки технического состояния конструкций, включая неразрушающий контроль, мониторинг с использованием датчиков и визуальные осмотры с применением беспилотных летательных аппаратов. Анализируются процесс идентификации критически важных элементов конструкций, чьё состояние непосредственно влияет на надёжность и безопасность эксплуатации объекта; методы ранжирования этих элементов по степени риска и приоритетности ремонта.

Важной составляющей изложенного подхода является многоуровневое планирование ремонтных работ с учётом ограниченности доступных ресурсов – материальных, трудовых и финансовых. Обсуждаются способы многокритериальной оптимизации распределения ресурсов, позволяющие одновременно учитывать экономические издержки, коэффициенты технической надёжности, необходимость соблюдения сроков и минимизацию простоев в процессе эксплуатации. Описывается внедрение цифровых инструментов мониторинга и управления

ремонтными процессами, что обеспечивает оперативную обработку данных, прогнозирование износа и автоматизацию принятия решений. Особое внимание уделяется внедрению передовых технологий и инновационных материалов, повышающих прочность и долговечность конструкций при снижении затрат на обслуживание.

Приведены примеры интеграции ресурсно-оптимизационного подхода в действующую систему обслуживания энергетических объектов, проведения сравнительного анализа эффективности по критериям экономии, сокращения времени простоев и повышения уровня эксплуатационной надёжности.

Результаты исследования свидетельствуют о значительном потенциале повышения эксплуатационной эффективности и безопасности при оптимизации ремонтных процессов посредством комплексного использования современных технических, организационных и цифровых решений. Рекомендации по дальнейшему внедрению и совершенствованию данного подхода позволяют рассматривать его как перспективное направление развития управления жизненным циклом объектов энергетического строительства башенного типа.

**Ключевые слова:** ресурсно-оптимизационный подход; ремонтные работы; энергетическое строительство; башенный тип; оптимизация; распределение ресурсов; техническое состояние; цифровые технологии; управление; эффективность.

**Abstract.**

This paper considers a resource-optimization approach to organizing and conducting repair work at tower-type energy construction facilities, such as power lines, power plant chimneys, cooling towers and other similar structures. The need to develop a comprehensive maintenance strategy based on modern methods for assessing the technical condition of structures, including non-destructive testing, monitoring using sensors and visual inspections using unmanned aerial vehicles is emphasized. The process of identifying critical structural elements whose condition directly affects the reliability and safety of the facility is analyzed, as well as methods for ranking these elements by risk and repair priority.

An important component of the described approach is multi-level planning of repair work taking into account the limited available resources - material, labor and financial. Methods of multi-criteria optimization of resource allocation are discussed, allowing for simultaneous consideration of economic costs, technical reliability factors, the need to meet deadlines and minimize downtime during operation. The paper describes the implementation of digital tools for monitoring and managing repair process-

es, which ensures prompt data processing, wear prediction and automated decision-making. Particular attention is paid to the implementation of advanced technologies and innovative materials that increase the strength and durability of structures while reducing maintenance costs.

Examples of integrating a resource-optimization approach into the existing maintenance system of energy facilities, conducting a comparative analysis of efficiency based on the criteria of saving, reducing downtime and increasing the level of operational reliability are given.

The results of the study indicate a significant potential for improving operational efficiency and safety when optimizing repair processes through the integrated use of modern technical, organizational and digital solutions. Recommendations for further implementation and improvement of this approach allow us to consider it as a promising direction for the development of life cycle management for tower-type energy construction facilities.

**Keywords:** resource-optimization approach, repair work, power construction, tower type, optimization, resource allocation, technical condition, digital technologies, management, efficiency.

**Введение**

Объекты энергетического строительства башенного типа представляют собой сложные инженерные сооружения, требующие регулярного технического обслуживания и периодического проведения ремонтных работ. К таким объектам относятся градирни тепловых электростанций, ветрогенераторные установки, опоры линий электропередачи высокого напряжения и другие подобные сооружения. Специфика данных объектов заключается в их значительной высоте, сложности конструкции и непрерывном режиме эксплуатации, что создаёт определённые трудности при организации ремонтных работ. В современных условиях возрастающей конкуренции на энергетическом рынке и ужесточения экологических требований особую актуальность приобретает ресурсно-оптимизационный подход, позволяющий минимизировать временные и материальные затраты при сохранении высокого качества ремонтных мероприятий.

Ресурсно-оптимизационный подход представляет собой комплексную методологию, направленную на достижение максимальной эффективности использования доступных ресурсов [1; 2]. В контексте ремонтных работ на объектах башенного типа данный подход включает в себя оптимизацию следующих ресурсных компонентов:

1. Материально-технические ресурсы (строительные материалы, оборудование, инструменты);
2. Трудовые ресурсы (квалифицированные специалисты различного профиля);
3. Временные ресурсы (продолжительность ремонтных работ, время простоя оборудования);
4. Финансовые ресурсы (бюджет ремонтных работ);
5. Информационные ресурсы (техническая документация, результаты диагностики, прогностические модели).

Теоретической основой данного подхода служат методы линейного и нелинейного программирования, теория массового обслуживания, методы сетевого планирования и управления, современные методы цифрового моделирования. Ключевой особенностью данного подхода является формализация задачи ремонта в виде многокритериальной оптимизационной модели, учитывающей как

технические параметры объекта, так и экономические факторы.

**Материалы и методы**

В рамках исследования, посвящённого ресурсно-оптимизационному подходу при проведении ремонтных работ на объектах энергетического строительства башенного типа, была разработана комплексная методика, объединяющая анализ современных конструкционных материалов, инструментальных средств и организационно-технических решений.

В качестве объектов исследования были выбраны башенные сооружения различного назначения, используемые в энергетической отрасли, включая градирни, дымовые трубы и анкерные опоры линий электропередач. Основное внимание уделялось сооружениям, находящимся на разных стадиях эксплуатационного периода: от вновь построенных до находящихся в эксплуатации в течение длительного времени.

Материалы, применяемые при проведении ремонтных работ, были классифицированы по типу основного конструкционного материала сооружения (железобетон, сталь, современные полимерные композиции). Для анализа были выбраны наиболее распространённые ремонтные смеси, антикоррозионные покрытия, а также технологии усиления и восстановления несущей способности башенных конструкций [3; 4].

Методологической основой исследования стал многоэтапный подход, включающий как лабораторные испытания образцов материалов на прочность, долговечность и коррозионную стойкость, так и обзор опытно-производственных испытаний, проводимых непосредственно на действующих энергетических объектах. В лабораторных условиях были апробированы различные рецептуры ремонтных смесей и покрытия, оценены параметры их сцепления с базовыми материалами, временные характеристики набора прочности, а также показатели сопротивления агрессивным внешним средам.

В рамках ресурсно-оптимизационного анализа были применены методы технико-экономического моделирования, позволяющие количественно оценить соотношение затрат и эффекта от внедрения различных ремонтных технологий и материалов. На основании собранной эмпи-

рической информации были разработаны рекомендации по выбору оптимальных ремонтных решений с учётом специфики каждой строительной конструкции, условий эксплуатации, а также организационных ограничений.

Для оценки эффективности предложенного подхода использовались статистические методы анализа эксплуатационных данных, включая сравнение показателей отказоустойчивости, межремонтного ресурса и суммарных затрат на сервисное обслуживание ремонтируемых объектов. Дополнительно привлекались методы экспертных оценок для анализа влияния человеческого фактора и управлеченческих решений на общий ресурс башенных сооружений после проведения ремонтных мероприятий.

**Обсуждение**

Рациональное планирование ремонтных работ начинается со всесторонней диагностики технического состояния объекта башенного типа, в т. ч. на основе неразрушающих методов.

Неразрушающий контроль строительных конструкций представляет особую важность для объектов башенного типа из-за их значительной высоты и ограниченного доступа к отдельным элементам [5]. В последние годы получили распространение методы дистанционного мониторинга с использованием беспилотных летательных аппаратов, оснащённых высокоточными камерами и тепловизорами. Данная технология позволяет выявлять дефекты железобетонных и металлических конструкций на ранних стадиях их развития.

Для объективной оценки технического состояния предлагается использовать комплексный индекс технического состояния (КИТС), рассчитываемый по формуле (1):

$$KITC = \sum (w_i \times I_i), \quad (1)$$

где  $w_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра технического состояния;  $I_i$  – нормированное значение  $i$ -го параметра.

На основании значения КИТС принимается решение о необходимости проведения определённого вида ремонтных работ: текущего, среднего или капитального ремонта.

При планировании ремонтных работ на объектах башенного типа возникает необходимость решения ряда оптимизационных задач. Рассмотрим математическую постановку задачи оптимизации сроков проведения ремонтных работ.

Пусть имеется  $n$  видов ремонтных работ, которые необходимо выполнить на объекте башенного типа. Для каждого вида работ известны:

- $t_i$  – продолжительность  $i$ -й работы;
- $r_i$  – ресурсоёмкость  $i$ -й работы;
- $p_i$  – приоритетность  $i$ -й работы.

Требуется определить оптимальную последовательность выполнения работ, минимизирующую общие временные затраты, с учётом имеющихся ресурсных ограничений и технологических зависимостей между работами.

Данная задача может быть formalизована в виде задачи целочисленного линейного программирования с целевой функцией (2):

$$F = \min (\sum (t_i \times x_i) + \sum (P_{ij} \times x_{ij})), \quad (2)$$

где  $x_i$  – бинарная переменная, принимающая значение 1, если  $i$ -я работа включена в план ремонта, и 0 в противном случае;  $x_{ij}$  – бинарная переменная, определяющая после-

довательность работ;  $P_{ij}$  – временные потери при переходе от  $i$ -й работы к  $j$ -й.

При этом необходимо учитывать ограничения по доступным ресурсам (3):

$$\sum (r_i \times x_i) \leq R_{max}, \quad (3)$$

где  $R_{max}$  – максимально доступный объём ресурсов.

Для эффективного решения рассматриваемой оптимизационной задачи целесообразно использование современных метаэвристических алгоритмов, в числе которых генетические алгоритмы, методы имитации отжига и алгоритмы роя частиц. Данные методы продемонстрировали высокую эффективность в решении задач комбинаторной оптимизации благодаря способности находить приближённые решения в сложных многомерных пространствах поиска.

Ключевым элементом ресурсно-оптимизационного подхода выступает интеграция инновационных технологий, направленных на повышение эффективности ремонтных мероприятий [6].

К числу таких технологий относятся:

- использование композитных материалов с высокой устойчивостью к агрессивному воздействию окружающей среды, что существенно увеличивает межремонтные интервалы эксплуатации башенных сооружений. Результаты исследований подтверждают, что применение углепластиковых ламелей для усиления железобетонных конструкций градирен приводит к увеличению их несущей способности на 30–40 % при относительно низких дополнительных затратах;
- применение технологий 3d-сканирования, обеспечивающих создание высокоточных цифровых моделей объектов. Это имеет особое значение при проектировании и реализации сложных ремонтных работ на высотных сооружениях. Сравнительный анализ результатов периодического сканирования позволяет отслеживать динамику деформационных процессов в конструкциях, что способствует принятию обоснованных управлеченческих решений относительно необходимого усиления отдельных элементов.

Интегральный экономический эффект от внедрения ресурсно-оптимизационного подхода к организации ремонтных работ на энергетических объектах башенного типа представляет собой комплексную характеристику, отражающую совокупность всех экономических выгод за вычетом понесённых затрат. Данный показатель может быть представлен следующей формулой:

$$E = \Delta C + \Delta P + \Delta R - I, \quad (4)$$

где каждое слагаемое отражает соответствующую компоненту экономической эффективности.

Рассмотрим более подробно компоненту, связанную со снижением затрат на проведение ремонтных работ  $\Delta C$  [7]. Данный компонент отражает достигнутую экономию ресурсов в результате оптимизации ремонтных процессов посредством внедрения современных технологий и организационно-управленческих решений. Основными источниками экономии являются:

1. Переход от системы планово-предупредительных ремонтов к ремонту по фактическому техническому состоянию объекта. Традиционная практика, ориентированная на фиксированные нормативные

интервалы обслуживания, зачастую приводит к перерасходу ресурсов из-за преждевременной замены конструктивных элементов. Внедрение систем непрерывного мониторинга и диагностики обеспечивает выполнение ремонтных мероприятий исключительно при наличии объективной необходимости, что способствует сокращению объёмов работ и снижению расходов на комплектующие и запасные части.

2. Оптимизация логистических процессов и материального обеспечения ремонтных работ. Прогнозирование технического состояния оборудования позволяет заблаговременно и рационально планировать снабжение, минимизировать складские издержки и исключать вынужденные закупки по повышенным ценам.
3. Повышение производительности труда ремонтного персонала. Внедрение современных автоматизированных информационных систем, специализированных технологий инспекции и обслуживания (например, применение беспилотных летательных аппаратов для обследования труднодоступных зон, роботизированных систем для очистки и окраски поверхностей, цифровых инструментов планирования) обеспечивает значительное увеличение производительности труда ремонтных бригад.
4. Сокращение затрат на диагностику технического состояния. Использование комплексных систем автоматизированного мониторинга позволяет минимизировать расходы на проведение периодических инспекций, привлечение сторонних специалистов и применение дорогостоящих диагностических приборов.

Величина экономии по рассматриваемому направлению может быть определена разницей между совокупными затратами на ремонтные мероприятия при традиционном и ресурсно-оптимизационной организациях ремонтного процесса за рассматриваемый временной интервал (как правило, за период окупаемости инвестиций):

$$\Delta C = C_0 - C_1, \quad (5)$$

где  $C_0$  – суммарные затраты на ремонтные работы в условиях применения традиционного подхода,  $C_1$  – затраты в условиях использования ресурсно-оптимизационного подхода.

#### Снижение потерь от простоя оборудования ( $\Delta P$ )

Компонент  $\Delta P$  характеризует экономию, связанную с сокращением незапланированных простоев энергетического оборудования и минимизацией продолжительности плановых ремонтов [8; 9]. Данная экономия формируется за счёт:

1) снижения вероятности аварийных остановов. Системы непрерывного мониторинга и прогнозирования технического состояния позволяют выявлять потенциальные неисправности на ранних стадиях и предпринимать превентивные меры, что существенно снижает вероятность внезапных отказов оборудования;

2) сокращения продолжительности плановых ремонтов. Точное планирование объёмов ремонтных работ, основанное на фактическом состоянии оборудования, позволяет минимизировать продолжительность плановых

ремонтов и соответствующие простои энергетического оборудования;

3) повышения координации ремонтных работ. Ресурсно-оптимизационный подход предполагает комплексное планирование ремонтных мероприятий с учётом взаимозависимости различных систем и агрегатов, что позволяет минимизировать общую продолжительность простоев.

Величина  $\Delta P$  может быть рассчитана следующим образом (6):

$$\Delta P = (T_0 - T_1) \times V, \quad (6)$$

где  $T_0$  – суммарная продолжительность простоев оборудования при традиционном подходе,  $T_1$  – суммарная продолжительность простоев при ресурсно-оптимизационном подходе,  $V$  – стоимость единицы времени простоя оборудования (упущенная выгода, штрафные санкции за невыполнение обязательств по поставкам энергии и т. д.).

#### Снижение рисков аварийных ситуаций в стомостном выражении ( $\Delta R$ )

Компонент  $\Delta R$  характеризует экономическую эффективность, обусловленную уменьшением вероятности возникновения аварийных ситуаций и сопутствующих финансовых потерь. Экономический эффект данного рода реализуется за счёт следующих факторов.

Во-первых, достигается снижение вероятности развития крупных аварийных событий. Реализация непрерывного мониторинга состояния оборудования и своевременная идентификация дефектов позволяют предотвращать эскалацию инцидентов до тяжёлых аварий, сопряжённых со значительным материальным ущербом.

Во-вторых, отмечается минимизация экологических рисков. Аварийные ситуации на объектах энергетики зачастую характеризуются выраженными отрицательными последствиями для окружающей среды, что может привести к возникновению штрафных санкций и необходимости проведения дорогостоящих мероприятий по ликвидации аварий. Применение ресурсно-оптимизационного подхода способствует существенному снижению вероятности наступления подобных событий.

В-третьих, наблюдается снижение рисков производственного травматизма персонала. Оперативное выявление и устранение неисправностей оборудования позволяет существенно уменьшить вероятность нанесения вреда здоровью работников, минимизируя соответствующие издержки предприятия на компенсационные выплаты и штрафы.

Наконец, особое значение имеет предотвращение репутационных потерь [10]. Существенные аварии на объектах энергетики способны нанести значимый ущерб деловой репутации эксплуатирующей организации, формируя долгосрочные негативные последствия для её финансово-экономического положения.

Количественная оценка величины  $\Delta R$  осуществляется с применением методологии анализа и оценки рисков, в соответствии с выражением (7):

$$\Delta R = \sum (p_{0i} * S_{0i}) - \sum (p_{1j} * S_{1j}), \quad (7)$$

где  $p_{0i}$  и  $p_{1j}$  обозначают вероятности возникновения аварийной ситуации типа  $i$  при использовании традиционного и ресурсно-оптимизационного подхода соответственно, а  $S_{0i}$  и  $S_{1j}$  – соответствующий ожидаемый ущерб от аварийных событий типа  $i$ .

Компонент  $I$  агрегирует все финансовые вложения, связанные с проектированием и внедрением ресурсно-оптимизационного подхода. Перечень данных затрат включает в себя следующие направления.

Прежде всего, это расходы, связанные с проведением проектных работ и разработкой системы: анализ исходных требований, формирование архитектуры программно-аппаратного комплекса, разработка алгоритмов оптимизации и прогнозирования технического состояния, приобретение программного обеспечения.

Далее учитываются затраты на закупку и монтаж оборудования, необходимых датчиков, систем сбора и передачи данных, вычислительных комплексов и иное аппаратное обеспечение. Немаловажную роль играют издержки, связанные с подготовкой персонала: обучение методикам анализа мониторинговых данных, освоение принципов принятия решений на основе прогнозных моделей и приобретение навыков эксплуатации нового оборудования. Существенную статью расходов составляет интеграция разрабатываемой системы с действующими информационными ресурсами предприятия, в том числе с системами учёта, планирования, управления техническим обслуживанием и ремонтами.

Завершающим этапом являются издержки на пилотное внедрение и последующую отладку системы, что предполагает реализацию опытной эксплуатации на ограниченном количестве объектов с целью идентификации возможных проблем и их своевременного устранения. Все перечисленные категории расходов суммарно образуют интегральный компонент  $I$ .

#### Расчёт интегрального экономического эффекта

Интегральный экономический эффект ( $E$ ) определяется за установленный временной горизонт, как правило, соответствующий предполагаемому сроку службы системы. При этом существенную роль играет фактор временной ценности денежных потоков, поскольку затраты и эффект от реализации мероприятий распределяются по различным временным периодам. Для нивелирования влияния разновременности денежных поступлений и выплат применяется процедура дисконтирования по формуле (8):

$$E = \sum_{t=1}^T \frac{\Delta C_t + \Delta P_t + \Delta R_t - I_t}{(1+t)^t}, \quad (8)$$

где  $t$  – текущий период (как правило, год);  $r$  – ставка дисконтирования, отражающая стоимость капитала или альтернативные издержки предприятия.

Получение положительного значения интегрального экономического эффекта  $E$  свидетельствует о финансовой обоснованности внедрения ресурсно-оптимизационного подхода и подтверждает его экономическую целесообразность.

В процессе прикладной экономической оценки результата от внедрения ресурсно-оптимизационного подхода необходимо учитывать ряд важных обстоятельств:

– во-первых, существенную неопределённость исходных данных. Значения многих входных параметров, используемых в расчётах, обладают значительной вариативностью и могут меняться под воздействием внешних и внутренних факторов. Для коррек-

ции данного влияния применяются современные методы моделирования стохастических процессов, в частности метод Монте-Карло, позволяющий учитывать распределения вероятностей параметров;

- во-вторых, сложную взаимозависимость отдельных компонентов экономического эффекта. Например, инвестиции в усовершенствование системы мониторинга (элемент  $I$ ) могут вызывать существенное снижение вероятности аварийных ситуаций, что отражается на компоненте  $\Delta R$ , формируя дополнительный косвенный экономический результат и повышая интегральный эффект;
- в-третьих, специфику временного распределения эффектов. Значительная часть выгод, обусловленных реализацией ресурсно-оптимизационного подхода, проявляется в долгосрочной перспективе, что затрудняет их точную количественную оценку на этапе предварительного технико-экономического обоснования.

Таким образом, для повышения объективности оценки интегрального экономического эффекта необходимо наряду с финансовыми расчётами учитывать вероятностные сценарии развития событий, производить моделирование альтернативных стратегий с использованием гибких аналитических инструментов, ориентированных на долгосрочную перспективу.

#### Результаты

При анализе результатов работы следует отметить, что проведённое исследование позволяет по-новому взглянуть на проблему эффективного использования материальных, трудовых и временных ресурсов в данной области. Представленный в работе подход основывается на анализе текущих технологий и методов выполнения ремонтных операций, на моделировании ресурсных потоков с учётом специфических особенностей башенных конструкций в энергетике.

Авторами обосновано, что переход к ресурсно-оптимизационной стратегии позволяет не только минимизировать затраты и сроки выполнения работ, но и значительно повысить их качество за счёт рационального распределения ресурсов и внедрения современных организационно-технических решений. Внедрение разработанных алгоритмов и рекомендаций опирается на оценку факторов риска, на применение передовых программных средств и цифровых технологий, что способствует снижению вероятности ошибок и внеплановых простоев.

Особое внимание в работе уделено вопросам интеграции различных этапов проектирования, планирования и непосредственного проведения ремонтных работ. Такой междисциплинарный подход способствует формированию комплексной системы управления ремонтным процессом, при которой достигается максимальная адаптация к реальным условиям объекта и оптимизация взаимодействия между всеми участниками строительной деятельности.

#### Заключение

На основе комплексного анализа экспериментальных данных, собранных в ходе опытно-промышленной эксплуатации, авторами обоснована эффективность внедрения предложенного инженерного подхода. Проведённые исследования позволили определить как непо-

средственное экономические преимущества, так и долгосрочные эксплуатационные эффекты, проявляющиеся в повышении надёжности, оптимизации ресурсных затрат и снижении эксплуатационных расходов, связанных с содержанием башенных сооружений энергетического назначения.

Представленные в работе результаты свидетельствуют о возможности масштабирования полученных разработок: они могут быть интегрированы в процессы модернизации уже действующих промышленных объектов, где

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арискин, М. В. Анализ причин падения башенного крана на основе построения модели в SCAD 11.5 / М. В. Арискин, И. Н. Гарькин // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 10-2. – С. 243–247.
2. Методика расчёта температурных параметров и срока службы кабельных линий напряжением 10 кВ / И. И. Ционь, Э. Ю. Абдуллаев, Е. И. Грачёва, А. Е. Немировский, С. Валтчев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 65–74.
3. О техническом состоянии эстакад под технологические трубопроводы metallurgicheskogo предpriyatiya / В. В. Смирнов, М. А. Святцов, А. Ю. Шилеева [и др.] // Наука, техника и образование. – 2015. – № 10 (16). – С. 119–121.
4. Техническое состояние промышленных зданий, сооружений и их реновация / И. И. Ведяков, Д. В. Конин, В. А. Артамонов, С. М. Конина, П. Д. Арленинов // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 5. – С. 6–18.
5. Пузанов, А. В. Методы обследования коррозионного состояния арматуры железобетонных конструкций / А. В. Пузанов, А. В. Ульбин // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 7 (25). – С. 18–25.
6. Живенко, А. В. Обмен опытом при обследовании эстакад на низких опорах / А. В. Живенко, Б. В. Пожидаев, В. А. Живенко // Потенциал современной науки. – 2015. – № 9 (17). – С. 60–63.
7. Токарева, Л. А. Сравнительный анализ продолжительности устройства фундаментов для ветроэнергетических установок / Л. А. Токарева, С. Б. Зиятдинов // XXVIII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвящённый Дню энергетика, Казань, 5–6 декабря 2024 года : Материалы докладов. В 3-х томах. Том 2. – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 305–308.
8. Коткова, О. Н. Результаты проведённого обследования электрокабельных эстакад / О. Н. Коткова // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность : Сборник статей по материалам 72-й Всероссийской научно-технической конференции, Самара, 06 апреля – 10 октября 2015 года / Самарский государственный архитектурно-строительный университет. – Самара : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный архитектурно-строительный университет», 2015. – С. 414–417.
9. Живенко, А. В. Экспертиза эстакад на низких опорах / А. В. Живенко, Б. В. Пожидаев, В. А. Живенко // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 2. – С. 84–86.
10. Саденко, Д. С. Внутренние дефекты в бетонных конструкциях: диагностика и методика устранения / Д. С. Саденко, И. Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 2 (47). – С. 77–81.

#### REFERENCES

1. Ariskin, M. V. Analiz prichin padeniya bashennogo krana na osnove postroeniya modeli v SCAD 11.5 [Analysis of the causes of the fall of a tower crane based on the construction of a model in SCAD 11.5] / M. V. Ariskin, I. N. Garkin // Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]. – 2016. – No. 10-2. – Pp. 243–247.
2. Metodika raschёta temperaturnykh parametrov i sroka sluzhby kabel'nykh linij napryazheniem 10 kV [Methodology for calculating temperature parameters and service life of 10 kV cable lines] / I. I. Tsitson, E. Y. Abdullaev, E. I. Gracheva, A. E. Nemirovsky, S. Valtchev // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy ehnergetiki [News of higher educational institutions. Energy problems]. – 2024. – Vol. 26, No. 4. – Pp. 65–74.
3. O tekhnicheskem sostoyanii ehstakady pod tekhnologicheskie truboprovody metallurgicheskogo predpriyatiya [On the technical condition of the overpass for technological pipelines of a metallurgical enterprise] / V. V. Smirnov, M. A. Svitsov, A. Yu. Shileeva [et al.] // Nauka, tekhnika i obrazovanie [Science, technology and education]. – 2015. – No. 10 (16). – Pp. 119–121.
4. Tekhnicheskoe sostoyanie promyshlennyykh zdanij, sooruzhenij i ikh renovatsiya [Technical condition of industrial buildings, structures and their renovation] / I. I. Vedyakov, D. V. Konin, V. A. Artamonov, S. M. Konina, P. D. Arlenin // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil engineering]. – 2024. – No. 5. – Pp. 6–18.
5. Puzanov, A. V. Metody obsledovaniya korroziionnogo sostoyaniya armatury zhelezobetonnykh konstruktsij [Methods of
- examining the corrosion condition of reinforcement of reinforced concrete structures] / A. V. Puzanov, A. V. Ulybin // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal [Engineering and Construction Magazine]. – 2011. – No. 7 (25). – Pp. 18–25.
6. Zhivenko, A. V. Obmen opyтом pri obsledovanii ehstakad na nizkikh oporakh [Exchange of experience during the inspection of overpasses on low supports] / A. V. Zhivenko, B. V. Pozhidaev, V. A. Zhivenko // Potentsial sovremennoj nauki [The potential of modern science]. – 2015. – No. 9 (17). – Pp. 60–63.
7. Tokareva, L. A. Sravnitel'nyj analiz prodolzhitelnosti ustrojstva fundamentov dlya vetroehnergeticheskikh ustanovok [Comparative analysis of the duration of the installation of foundations for wind power plants] / L. A. Tokareva, S. B. Ziyatdinov // XXVIII Vserossijskij aspirantsko-magisterskij nauchnyj seminarnyj posvyashchennyj Dnyu ehnergetika, Kazan', 5–6 dekabrya 2024 goda : Materialy dokladov. V 3-kh tomakh. Tom 2 [XXVIII All-Russian Postgraduate and Master's scientific seminar dedicated to the Day of the Power Engineer, Kazan, December 5-6, 2024 : Materials of reports. In 3 volumes. Volume 2]. – Kazan : Kazanskij gosudarstvennyj ehnergeticheskij universitet [Kazan State Power Engineering University], 2024. – Pp. 305–308.
8. Kotkova, O. N. Rezul'taty provedyonnogo obsledovaniya ehlektrokabel'nykh ehstakad [The results of the survey of electric cable trestles] / O. N. Kotkova // Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arhitekturie. Estestvennye nauki i tekhnicheskaya bezopasnost' : Sbornik statej po materialam 72-ii Vserossijskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, Samara, 06 aprelya – 10 oktyabrya 2015 goda [Traditions and innovations in construction and architecture. Natural Sciences and Technosphere safety: A collection of articles based on the materials of

требуется повышение эффективности и продление срока службы строительных конструкций, а также найдут применение на этапе проектирования и строительства новых башенных сооружений энергетического профиля.

Таким образом, разработанный авторами подход обладает универсальным характером и является актуальным инструментом для повышения технологического уровня и конкурентоспособности объектов энергетической инфраструктуры.

the 72nd All-Russian Scientific and Technical Conference, Samara, April 06 - October 10, 2015] / Samarskij gosudarstvennyj arkitekturno-stroitel'nyj universitet [Samara State University of Architecture and Civil Engineering]. – Samara : Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Samarskij gosudarstvennyj arkitekturno-stroitel'nyj universitet» [Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Samara State University of Architecture and Civil Engineering], 2015. – Pp. 414–417.

9. Zhivenko, A. V. Ehkspertiza ehstakad na nizkikh oporakh

УДК 624.15

## Расчёт термонапряжённого состояния при бетонировании нижней плиты коробчатого фундамента здания «Лахта Центр»

Calculation of Thermal Stress State During the Bottom Slab Concreting of the Box Foundation for the Lakhta Center MFC Tower

Никифоров Сергей Владимирович

Заместитель генерального директора по проектированию АО «Синергия»,  
Россия, 191186, Санкт-Петербург, улица Большая Морская, 24, литер A, sergeivnikiforov@gmail.com

Nikiforov Sergey Vladimirovich

Deputy General Director for Design, Synergy JSC,  
Russia, 191186, St. Petersburg, ulitsa Bolshaya Morskaya, 24, letter A, sergeivnikiforov@gmail.com

Травуш Владимир Ильич

Доктор технических наук, профессор, главный конструктор ЗАО «Горпроект»,  
Россия, 105064, Москва, Нижний Сусальный переулок, 5, строение 5А, info@gorproject.ru

Travush Vladimir Ilyich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Structural Engineer in Gorproekt CJSC,  
Russia, 105064, Moscow, Nizhniy Susalny pereulok, 5, building 5A, info@gorproject.ru

Семёнов Кирилл Владимирович

Кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер Научно-испытательной лаборатории «Политех-СКиМ-Тест»,  
Россия, 195251, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, литер A (Гидрокорпус-2), ps-test@spbstu.ru

Semenov Kirill Vladimirovich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Senior Engineer of the Research and Testing Laboratory "Polytech-SKIM-Test", Russia, 195251, St. Petersburg, ulitsa Politekhnicheskaya, 29, Building A (Hydrocorpus-2), ps-test@spbstu.ru

#### Аннотация.

**Введение.** В статье описываются результаты расчёта термонапряжённого состояния при бетонировании массивных бетонных конструкций на примере нижней плиты фундамента высотного здания «Башня многофункционального комплекса «Лахта Центр» в Санкт-Петербурге.

**Цель исследования.** Разработка способов оценки температурной трещиностойкости и анализ термонапряжённого состояния при бетонировании массивных конструкций фундамента высотного здания «Башня комплекса «Лахта Центр».

**Метод исследования.** Для достижения поставленной цели были выполнены расчёты температурных полей и термонапряжений в бетонной конструкции при твердении бетона в строительный период и определены критерии трещиностойкости.

**Результаты исследования.** Представлено описание особен-

#### Abstract.

**Introduction.** The article describes the results of calculating the thermal stress state during concreting of massive concrete structures using the example of the lower slab of the foundation of the high-rise building, the Tower of the multifunctional complex "Lakhta Center" in St. Petersburg.

**Research method.** To achieve this goal, calculations of temperature fields and thermal stresses in the concrete structure during hardening of concrete during the construction period were performed and crack resistance criteria were determined.

**Research results.** A description of the design features of the

ностей устройства коробчатого фундамента башни МФК «Лахта Центр». Определены параметры уравнения тепловыделения и физические характеристики бетона нижней плиты фундамента высотного здания. Приведены графические зависимости для полей температур и термонапряжений в контрольных точках. На основании анализа результатов расчётов термонапряжённого состояния при бетонировании массивных конструкций даны рекомендации по обеспечению температурной трещиностойкости при твердении бетона в строительный период. Основные результаты данного исследования могут быть применены при проектировании и устройстве массивных фундаментных конструкций уникальных зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** бетонные конструкции; термонапряжённое состояние; трещиностойкость; тепловыделение; контроль температур; уход за бетоном.

state during concreting of massive structures of the foundation of the high-rise building, the Tower of the multifunctional complex "Lakhta Center".

**Research method.** To achieve this goal, calculations of temperature fields and thermal stresses in the concrete structure during hardening of concrete during the construction period were performed and crack resistance criteria were determined.

**Research results.** A description of the design features of the

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_111

box foundation of the tower of the multifunctional complex "Lakhta Center" is presented. The parameters of the heat release equation and physical characteristics of the concrete of the lower slab of the foundation of the high-rise building are determined. Graphic dependencies for temperature fields and thermal stresses at control points are given. Based on the analysis of the results of calculations of the thermal stress state during concreting of massive structures, recommendations are given to ensure temperature crack resistance during the hardening of concrete during the construction period. The main results of this study can be applied in the design and construction of massive foundation structures of unique buildings and structures.

**Keywords:** concrete structures; thermal stress state; crack resistance; heat generation; temperature control; concrete curing.

## Введение

27 марта 2015 года представители АО «МФК «Лахта Центр» получили сертификат Книги рекордов Гиннесса, подтверждающий установление мирового достижения в области непрерывной заливки бетона. Рекорд был достигнут во время строительства фундаментной плиты небоскрёба «Лахта Центр» (рисунок 1): процесс длился 49 часов – с вечера 27 февраля до 21:00 1 марта 2015 года [1]. За это время было использовано 19 624 м<sup>3</sup> бетонной смеси, что превысило предыдущий мировой рекорд более чем на 3 000 м<sup>3</sup>.

Для реализации проекта был разработан технологический регламент бетонирования, предусматривающий непрерывную подачу бетона по всей толщине плиты. Согласно регламенту, смесь распределялась равномерно, с последовательным перемещением зоны заливки от нижних слоёв к верхним.

Однако при реализации такой технологии необходимо учитывать эффект разогрева конструкции из-за экзотермических реакций, сопровождающих гидратацию цемента. Это приводит к значительным перепадам температуры внутри массива, вызывающим растягивающие напряжения. На первом этапе деформации возникают на поверхности плиты, а затем смещаются в её центральные участки. Особую опасность подобные процессы представляют в зимний период, когда внешние температурные условия усиливают риски растрескивания [2; 3].

Для обеспечения трещиностойкости и контроля состояния массивных бетонных конструкций необходимо выполнить расчёты термонарежёного состояния, учитывающие разогрев плиты за счёт тепловыделения при гидратации. Это позволяет прогнозировать зоны критических напряжений и разрабатывать меры по обеспече-



Рис. 1. Бетонирование фундаментной плиты коробчатого фундамента  
Fig. 1. Concreting the foundation slab of a box foundation

нию трещиностойкости, особенно в условиях сезонных колебаний температуры [4; 5].

## Материалы и методы

### 1. Особенности устройства коробчатого фундамента башни МФК «Лахта Центр»

Фундамент здания «Башня МФК «Лахта Центр»» [6] в плане имеет пятиугольную конфигурацию с длиной каждой из боковых граней 57,25 м, состоит из нижней и верхней плит, стен и промежуточного перекрытия, что придаёт конструкции коробчатую форму. Общая высота конструкции 16,60 м, общий объём бетона 46,3 тыс. м<sup>3</sup>. Разрез коробчатого фундамента здания «Башня» представлен на рисунке 2 и включает в себя:

- нижнюю плиту толщиной 3,6 м из монолитного железобетона класса по прочности на сжатие B60;
- центральную часть фундамента высотой 11,00 м с конструкциями стен из монолитного железобетона класса по прочности на сжатие B80 и железобетонного перекрытия толщиной 0,40 м из бетона B60;
- верхнюю плиту толщиной 2,0 м из монолитного железобетона класса по прочности на сжатие B80.

Конструкция обеспечивает повышенную устойчивость за счёт коробчатой формы и многоуровневого армирования, что соответствует требованиям для высотных сооружений.

Нижняя монолитная железобетонная плита коробчатого фундамента имеет пятиугольную в плане конфигурацию с длиной боковой грани 57,25 м, размерами по диагоналям 88...93 м и по высоте 3,6 м, опирается на свайное основание и бетонную подготовку. Отметки плиты: низ – 21,250 м, верх – 17,650 м. Схема плиты представлена на рисунке 3.



Рис. 2. Разрез коробчатого фундамента  
Fig. 2. Section of a box foundation

Пятиугольная плита усиlena арматурными каркасами из стержней A500C (Ø32–36 мм). Горизонтальные сетки с шагом 150 мм распределены по высоте конструкции с интервалом 200–300 мм. Средний расход арматуры – 452 кг/м<sup>3</sup>. Защитный слой бетона – 68 мм, с дополнительной противоусадочной сеткой 5Вр-1 (ячейка 100×100 мм) на расстоянии 25 мм от поверхности.

### 2. Оценка температурной трещиностойкости фундаментных конструкций

Анализ термонарежёного состояния бетонных массивов в строительный период представляет значительную инженерную сложность. Для оптимизации процессов бетонирования фундаментов Лахта Центра и оценки их трещиностойкости привлекались специали-

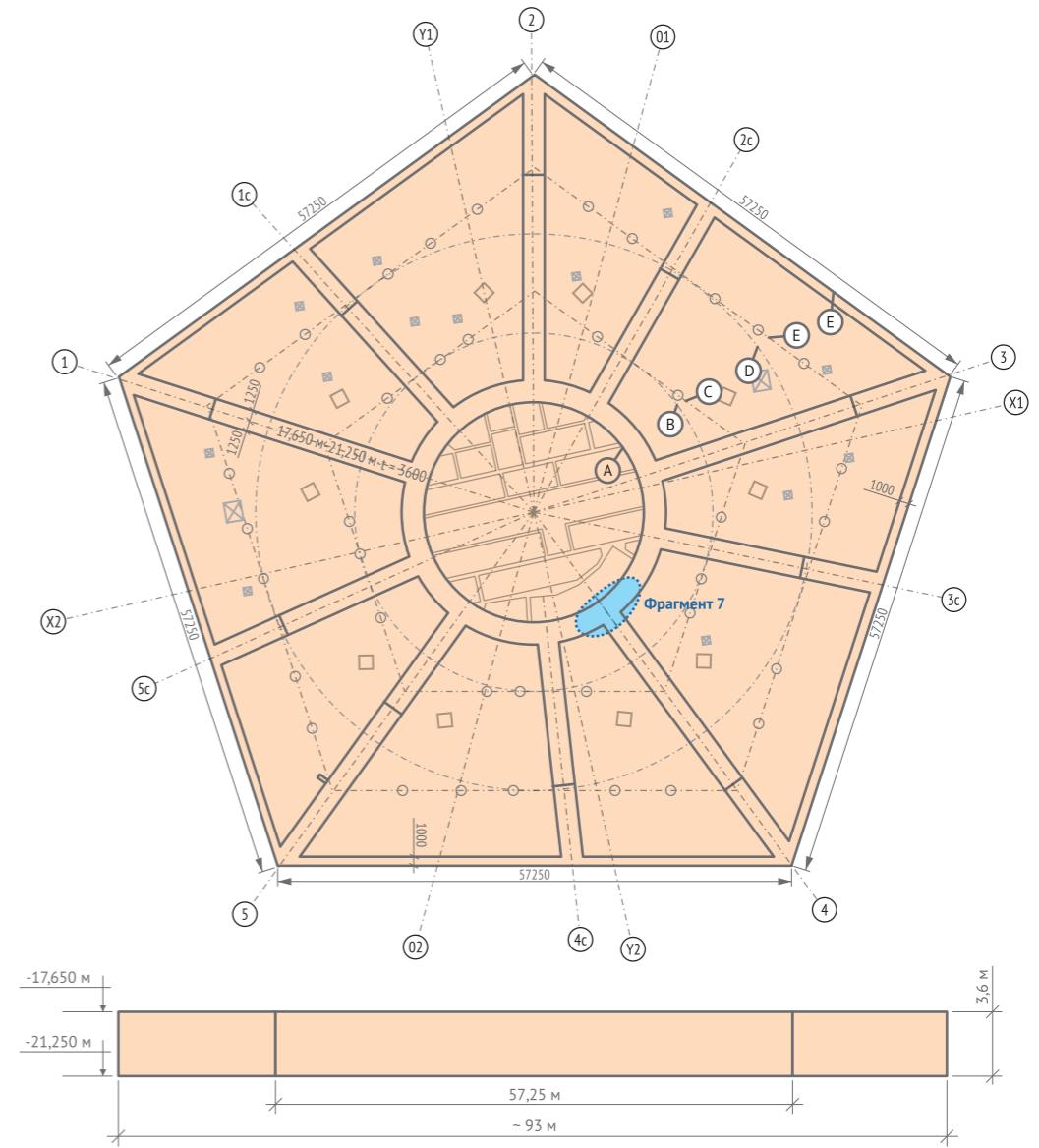


Рис. 3. Схема нижней плиты коробчатого фундамента  
Fig. 3. Scheme of the bottom plate of the box foundation

стых СПбГПУ им. Петра Великого, которые разработали технологические регламенты и выполнили расчёты. Исследования показали, что через 72 часа после укладки растягивающие напряжения на поверхности плиты достигают значений, близких к пределу прочности бетона класса B25 при осевом растяжении [7].

#### Ключевые аспекты методики

Для оценки трещиностойкости нижней плиты коробчатого фундамента высотного здания «Башня» использовался деформационный критерий П. И. Васильева, регламентированный СП 41.13330.2012. Согласно ему, относительные деформации удлинения бетона не должны превышать его предельной растяжимости. Деформационный критерий задаётся неравенством (1):

$$\sigma(t) \leq \gamma_{cm} \gamma_h \varepsilon_{lim} \phi(t) E_b(t), \quad (1)$$

где  $\sigma(t)$  – температурные напряжения в нижней плите коробчатого фундамента для момента времени  $t$ ;

$\gamma_h$  – коэффициент зависимости напряжений от градиента температурных деформаций в нижней плите коробчатого фундамента, принимаемый в соответствии с СП 41.13330.2012;

$\varepsilon_{lim}$  – экспериментальное значение предельной растяжимости бетона;

$\phi(t)$  – коэффициент зависимости предельной растяжимости бетона от возраста;

$\gamma_{cm}$  – коэффициент условий работы, принимаемый для массивных сооружений 1,1, для остальных сооружений – 1,0;

$E_b(t)$  – начальный модуль упругости бетона.

Формулу (1) можно переписать как:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_b(t)} \leq \gamma_{cm} \gamma_h \phi(t) \varepsilon_{lim}, \quad (2)$$

где в левой части неравенства (2) относительные деформации удлинения в момент времени  $t$ , а в правой – предельные деформации удлинения в этот же момент времени.

#### Компьютерное моделирование в программе TERM

Расчёты выполнялись с помощью программы TERM, разработанной в СПбГПУ. Программа реализует двухэтапный подход:

1. **Температурный анализ** – решение нестационарного уравнения теплопроводности методом конечных элементов с учётом:

- кинетики тепловыделения бетона;
- граничных условий III рода (опалубка, теплоизоляция, тепляк) на верхних и боковых поверхностях;
- условий IV рода на контакте «плита – подбетонка – грунт».

2. **Расчёт напряжений** – решение интегродифференциальных уравнений, учитывающих:

- гипотезу плоских сечений;
- линейную наследственную теорию ползучести через функции  $R(t,r)$ ;
- влияние температуры на деформативные и теплофизические свойства бетона.

Программа позволяет моделировать нестационарные температурные поля с высокой точностью, интегрируя данные о тепловыделении цемента и внешних условиях. При расчёте напряжений применяется численное интегрирование, что обеспечивает учёт как мгновенных деформаций, так и ползучести. Это особенно важно для

массивных конструкций, где температурные градиенты и скорость нагружения критически влияют на трещинообразование.

Таким образом, сочетание экспериментальных данных, нормативных критериев и численного моделирования обеспечивает надёжную оценку трещиностойкости фундаментов в условиях значительных термических воздействий.

#### Результаты исследований

##### 3. Анализ термонапряжённого состояния нижней плиты коробчатого фундамента

###### Исходные данные для расчёта

Тепловыделение бетона изучено в соответствии со стандартом ГОСТ 310.5-88. В качестве объектов исследования использовались три идентичных образца бетона на основе портландцемента ЦЕМ 1-42,5 Н. Эксперименты проводились изотермическим методом при постоянной температуре 20 °C. Полученные данные визуализированы на рисунке 4.

Для математического моделирования тепловыделения при гидратации принята зависимость И. Д. Запорожца [9]:

$$Q = Q_{max} \left[ 1 - (1 + A_t \tau)^{-\frac{1}{m-1}} \right], \text{ кДж}, \quad (3)$$

где  $Q_{max}$  – полное тепловыделение бетона;

$A_t$  – коэффициент, характеризующий кинетику тепловыделения при температуре  $t$ ;

$m$  – порядок реакции гидратации цемента;

$\tau$  – время, прошедшее с момента затворения.

Параметры уравнения тепловыделения (3) для выбранного состава бетона характеризуются значениями:  $Q_{max} = 490 \text{ кДж/кг}$ ;  $A_{20} = 6,55 \text{ сут}^{-1}$ ;  $m = 0,385$ . Указанные значения приняты для расчётов термонапряжённого состояния бетона.

Испытания для определения модуля деформации бетона выполнены согласно ГОСТ 24452-80 на призматических образцах 100×100×400 мм. Нагружение осуществлялось ступенями до 0,4 от разрушающей нагрузки с интервалами 0,1  $R_{pasp}$  и выдержкой 4,5 мин. на каждой ступени. Изучение деформаций проводилось через 1, 10,

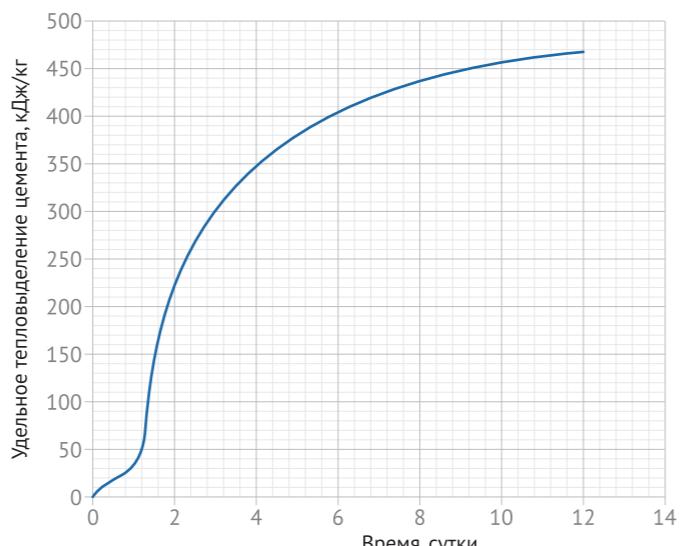


Рис. 4. Удельное тепловыделение цемента при температуре 20 °C

Fig. 4. Specific heat release of cement at a temperature of 20 °C

#### Зависимость деформаций бетона на липецком цементе от приложенных напряжений в возрасте 10 суток



Рис. 5. Зависимость «напряжение – деформация»

Fig. 5. Stress-strain relationship

#### Изменение КЛТР в процессе твердения бетона

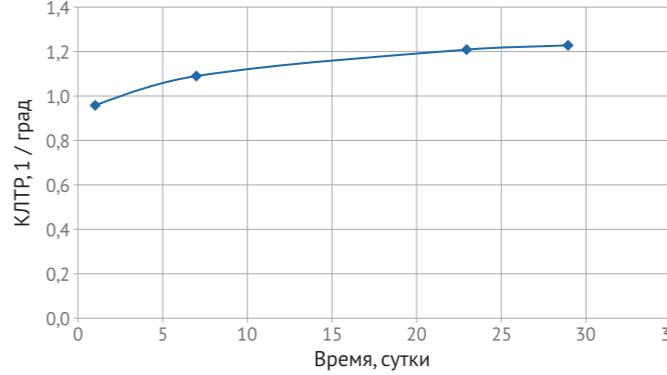


Рис. 6. Изменение КЛТР в процессе твердения бетона

Fig. 6. Change in the coefficient of thermal expansion during the hardening of concrete

28 и 56 суток. Зависимость «напряжение – деформация» представлена на рисунке 5.

Коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) бетона определяли на образцах-призмах размерами 70×700×280 мм. КЛТР бетона увеличивается в процессе твердения со значения 0,959·10<sup>-5</sup> (в возрасте 1 суток) до значения 1,23·10<sup>-5</sup> 1/град. (в возрасте 28 суток). В расчётах термонапряжённого состояния учитывается зависимость КЛТР от возраста бетона. На рисунке 6 показано изменение КЛТР в процессе твердения бетона.

Удельную теплёмкость бетона  $C_b$  можно рассчитать по правилу аддитивности:

$$C_b = (C_u \cdot \Pi + C_b \cdot B + C_{\Pi} \cdot \Pi + C_{kp} \cdot Kp) / \gamma_b, \quad (4)$$

где  $C_u = 0,81$ ,  $C_b = 4,18$ ,  $C_{\Pi} = 0,75$ ,  $C_{kp} = 0,79$  – удельные теплоёмкости, кДж/(кг·°C), соответственно, цемента, воды, песка и крупного заполнителя,  $\Pi$ ,  $B$ ,  $\Pi$ ,  $Kp$  – расходы материалов в кг/м<sup>3</sup>.

По формуле (4) получаем  $C_b = 0,97 \text{ кДж/(кг·°C)}$ .

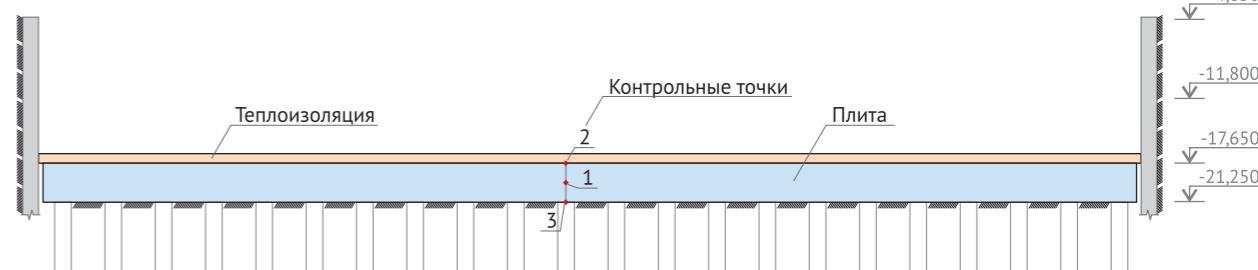


Рис. 8. Расчётная схема фундаментной плиты: 1, 2, 3 – контрольные точки

Fig. 8. Calculation scheme of the foundation slab: 1, 2, 3 – control points

#### Изменение коэффициента теплопроводности в процессе твердения бетона

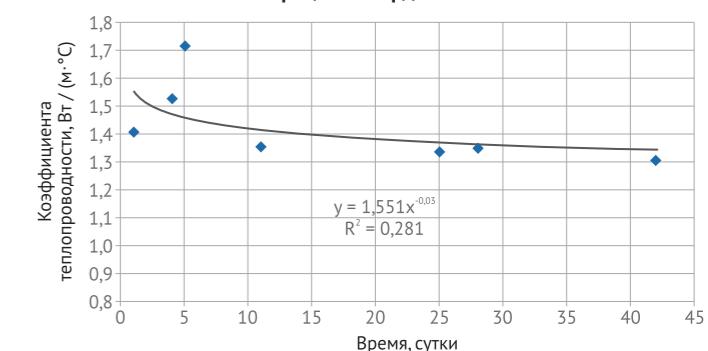


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплопроводности от возраста бетона

Fig. 7. Dependence of the thermal conductivity coefficient on the age of concrete

Коэффициент внутренней теплопроводности определяли по ГОСТ 7076-99. Графическая интерпретация зависимости отражена на рисунке 7, где видна тенденция к понижению коэффициента теплопроводности  $\lambda$  с возрастом бетона  $t$ . Эта тенденция может быть аппроксимирована степенной функцией  $\lambda = 1,551t^{0,03}$ .

Все экспериментальные данные и аналитические зависимости были использованы для комплексного моделирования термонапряжённого состояния конструкции, что обеспечило учёт временных изменений свойств бетона в процессе твердения.

Анализ термомеханических процессов в фундаментной плите при различных условиях бетонирования

В расчётах предполагаются следующие условия моделирования:

- бетон укладывается непрерывно горизонтальными слоями по 200–300 мм;
- в основании имеет место абсолютно жёсткая заделка на плотном свайном поле;
- исследуются два сценария: без терморегуляции и с применением мер по регулированию теплового режима твердения бетона (теплоизоляция, защита верхнего слоя, временное укрытие).

Теплоизоляция укладывается на верхнюю поверхность плиты сразу после окончания заливки. Толщина теплоизоляционного слоя  $\delta$  подлежит расчёту в зависимости от температурных условий.

Каждый вариант расчёта предполагает задание исходных данных и внешних условий. Программа по результатам расчёта выдаёт в табличной форме и в виде диаграмм распределение температуры и термонапряжений по сечению с изменением их во времени и степень соответствия критерию трещиностойкости.

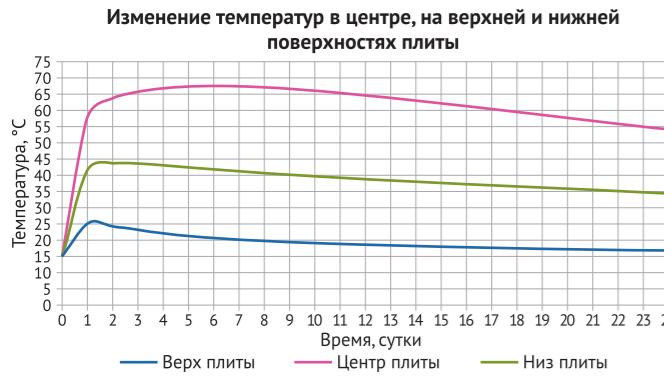


Рис. 9. Температура плиты в контрольных точках  
Fig. 9. Plate temperature at control points

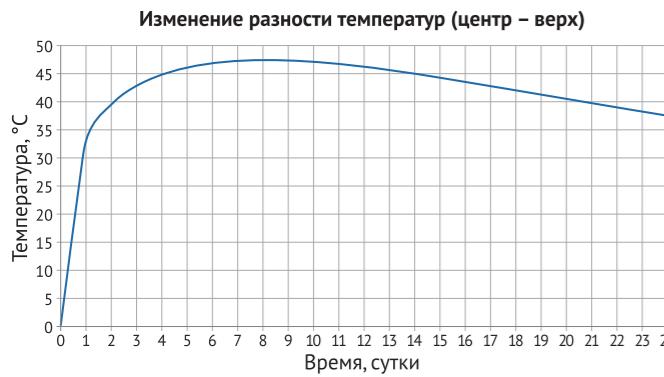


Рис. 10. Перепад температур плиты: центр – верх  
Fig. 10. Temperature difference between the center and top of the plate

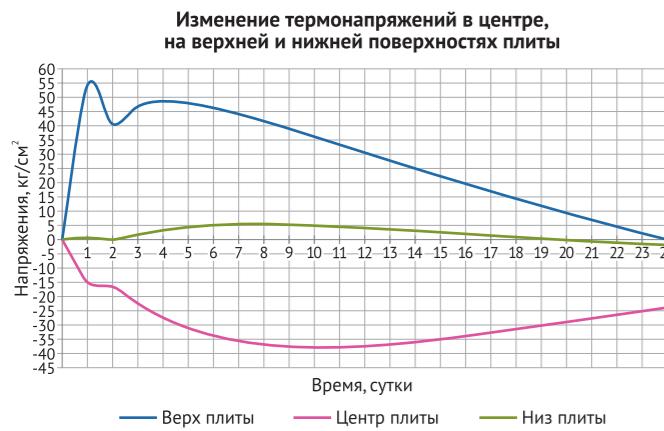


Рис. 11. Термонаружения в контрольных точках  
Fig. 11. Thermal stresses at control points

Контрольные точки (1 – центр, 2 – верх, 3 – низ сечения) выбраны для оценки максимальных градиентов температуры (рисунок 8). Результаты представлены в таблицах и графиках, отражающих динамику температур и напряжений, а также соответствие критериям трещиностойкости.

#### Сценарий 1: бетонирование без термозащиты

##### Условия:

- температура воздуха и основания:  $-20^{\circ}\text{C}$ ;
- начальная температура бетона:  $+15^{\circ}\text{C}$ ;
- отсутствие теплоизоляции.

Результаты расчёта (рисунки 9–11) показывают, что при отсутствии мер по регулированию теплового режима трещиностойкость бетона не обеспечена:

- Пиковые растягивающие напряжения на поверхности превышают допустимые значения на 490 % в первые сутки.

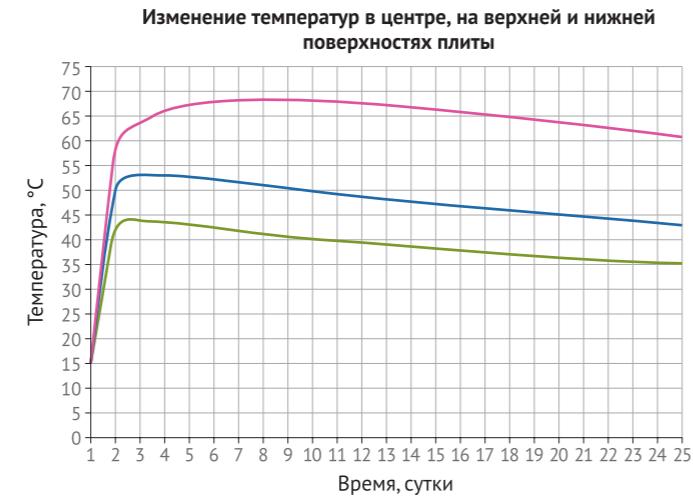


Рис. 12. Температура плиты в контрольных точках  
Fig. 12. Plate temperature at control points

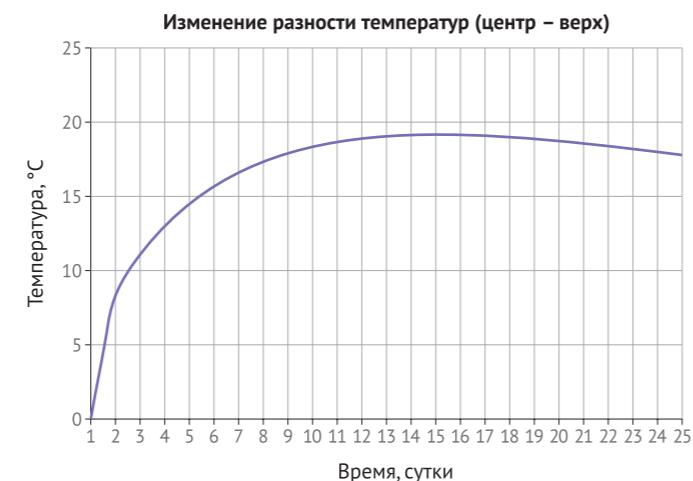


Рис. 13. Перепад температур плиты: центр – верх  
Fig. 13. Temperature difference between the center and top of the plate

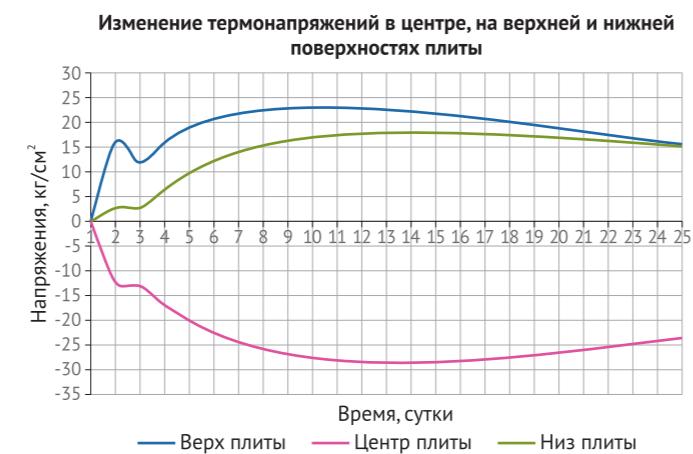


Рис. 14. Термонаружения в контрольных точках  
Fig. 14. Thermal stresses at control points

- Трещинобразование начинается через 24 часа и продолжается до 9-х суток.
- К 8-м суткам несоответствие критериям снижается до 0,75 %.

Выход: отказ от терморегуляции приводит к критическим дефектам в структуре бетона.

#### Сценарий 2: применение теплоизоляции

Условия: на поверхности плиты устанавливается теплоизоляция с  $\beta_{np} = 0,75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ , что соответствует

слою теплоизоляции толщиной 4,0 см для материала «Этафом» с  $\lambda = 0,03 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ .

Результаты расчёта (рисунки 12–14):

- Максимальные напряжения ( $16 \text{ кгс}/\text{см}^2$  на 2-е сутки) остаются ниже критического порога;
- Перепады температуры между центром и поверхностью не превышают допустимых значений.

Вывод: четырёхслойное укрытие «Этафом» полностью предотвращает трещинообразование.

#### Сценарий 3: оптимизация сроков демонтажа теплоизоляции и тепляка

Результаты расчёта показывают, что при температуре воздуха  $-10^{\circ}\text{C}$  минимальный срок снятия тепляка (без теплоизоляции) составляет 4 суток. На рисунках 15–17 приведены графики изменения температуры и термонаружений во времени для контрольных точек.

После снятия тепляка на 4-е сутки перепад температуры (тепловой удар) составит  $12,5^{\circ}\text{C}$  (рисунок 16), на 5-й день твердения, что не представляет опасности для бетона. Растягивающие напряжения, которые на 2-е сутки поднялись до  $20 \text{ кгс}/\text{см}^2$  (рисунок 17) не приведут к образованию трещин.

Вывод: снятие теплозащиты на 4-е сутки безопасно при соблюдении параметров теплоизоляции.

#### Заключение

Использование многослойной изоляции и поэтапный демонтаж тепляка обеспечивают соблюдение нормативов трещиностойкости. Критическим фактором является контроль перепадов температуры в первые 72 часа твердения. Результаты подтверждают необходимость терморегуляции при низких температурах окружающей среды.

Проведённые исследования подтверждают, что отсутствие контроля температурного режима на этапе твердения бетона приводит к образованию трещин в фундаментных конструкциях уже на 2–9 сутки. Для предотвращения дефектов необходимо внедрение комплексных мер, включающих временные укрытия (тепляки) и поверхностную теплоизоляцию.

#### Рекомендации по теплозащите:

- При температуре воздуха от  $-5$  до  $+5^{\circ}\text{C}$  и поддержании под тентом  $+10^{\circ}\text{C}$  коэффициент теплоизоляции должен быть  $\leq 0,75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ . Для материала «Этафом» ( $\lambda = 0,03 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ ) минимальная толщина слоя составляет 4 см. Установку изоляции проводят после частичного затвердевания верхнего слоя бетона.
- Прогрев основания перед бетонированием обязателен (минимум  $+3^{\circ}\text{C}$ ). Максимальный нагрев в ядре массива достигает  $68^{\circ}\text{C}$  при исходной температуре смеси  $+15^{\circ}\text{C}$  и  $63^{\circ}\text{C}$  при  $+10^{\circ}\text{C}$ .

#### Сроки демонтажа тепляка:

- при температуре до  $-10^{\circ}\text{C}$ : не ранее 6 суток после укладки;
- при температуре ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ : 7–11 суток.

#### Термозащита арматурных элементов:

Перед снятием тента холодные выпуски арматуры изолируют тремя слоями «Этафома» или комбинацией «Этафома» с термочехлами «Вилатерм». После демонтажа укрытия монтируют леса для армокаркасов стен с повторным натяжением тента. Внутри поддерживают перепад температур между бетоном и воздухом  $\leq 17^{\circ}\text{C}$ , после чего снимают изоляцию с арматуры.

#### Критические температурные градиенты:

- между центром и верхней поверхностью:  $17^{\circ}\text{C}$  (допустимо  $+3^{\circ}\text{C}$ );
- между центром и нижней поверхностью:  $20^{\circ}\text{C}$ .

В первые 9 суток данные параметры являются критическими. В последующие периоды допустимы более высокие перепады благодаря увеличению модуля деформации бетона.

#### Требования к мониторингу температур:

- максимум в ядре блока:  $+55^{\circ}\text{C}$ ;
- разница между датчиками на разных уровнях (ядро – поверхность, ядро – низ блока):  $\leq 14^{\circ}\text{C}$ ;
- разница в одном сечении на одном уровне:  $\leq 14^{\circ}\text{C}$ .

Реализация указанных мер минимизирует риск трещинообразования и обеспечит долговечность конструкций.

#### Изменение температур в центре, на верхней и нижней поверхностях плиты

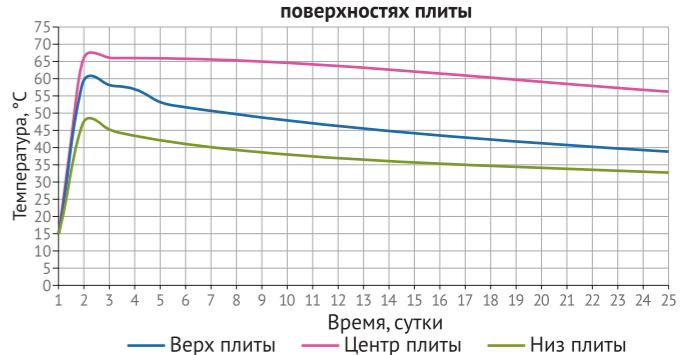


Рис. 15. Температура плиты в контрольных точках  
Fig. 15. Plate temperature at control points

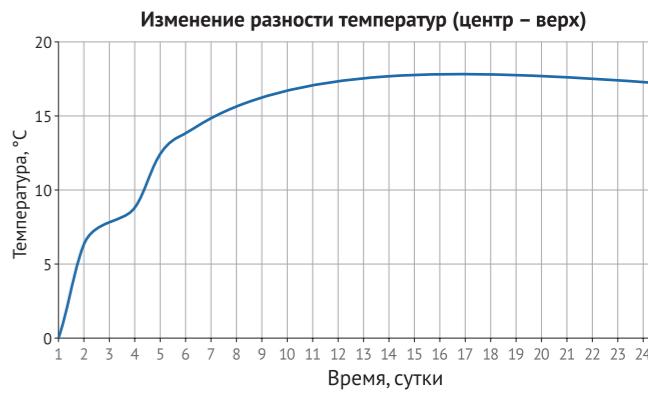


Рис. 16. Перепад температур плиты: центр – верх  
Fig. 16. Temperature difference between the center and top of the plate

#### Изменение термонаружений в центре, на верхней и нижней поверхностях плиты

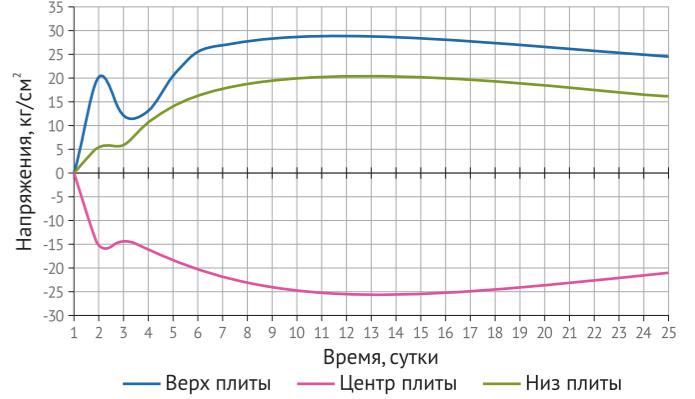


Рис. 17. Термонаружения в контрольных точках  
Fig. 17. Thermal stresses at control points

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Травуш, В. И. Бетонирование нижней плиты коробчатого фундамента башни комплекса «Лахта центр» / В. И. Травуш, А. И. Шахворостов // Высотные здания. – 2015. – № 1. – С. 92–101.
2. Jeon, S.-J. Advanced Assessment of Cracking due to Heat of Hydration and Internal Restraint / S.-J. Jeon, // American Concrete Institute Materials Journal. – 2008. – № 105. – Pp. 325–333.
3. Numerical study on crack thermal resistance effect on thermo-mechanical coupled behavior of concrete structure at room temperature / L. Shen, Q. Ren, G. Cusatis, M. Cao, L. Xu, Y. Yang // International Journal of Solids and Structures. – 2020. – Vol. 182–183, No. 1. – Pp. 141–155.
4. Каприлов, С. С. Опыт бетонирования массивной густоармированной конструкции с обеспечением термической трещиностойкости / С. С. Каприлов, А. В. Шейнфельд, С. И. Иванов // Строительные материалы – 2023. – № 10. – С. 15–24.
5. Nguyen, T-Ch. Thermal Cracks in Concrete Structure – The Basic Issues to Be Understood / T-Ch. Nguyen, K. A. Bui, Q. L. Hoang // Structural Health Monitoring and Engineering Structures. – 2021. – № 6. – Pp. 229–240.

## REFERENCES

1. Travush, V. I. Betonirovanie nizhnjej plity korobchatogo fundamenta bashni kompleksa «Lakhta tsentr» [Concreting the bottom slab of the box foundation of the tower of the Lakhta Center complex] / V. I. Travush, A. I. Shakhvorostov // Vysotnye zdaniya. – 2015. – № 1. – Pp. 92–101.
2. Jeon, S.-J. Advanced Assessment of Cracking due to Heat of Hydration and Internal Restraint / S.-J. Jeon, // American Concrete Institute Materials Journal. – 2008. – № 105. – Pp. 325–333.
3. Numerical study on crack thermal resistance effect on thermo-mechanical coupled behavior of concrete structure at room temperature / L. Shen, Q. Ren, G. Cusatis, M. Cao, L. Xu, Y. Yang // International Journal of Solids and Structures. – 2020. – Vol. 182–183, No. 1. – Pp. 141–155.
4. Kapriev, S. S. Opyt betonirovaniya massivnoj gustoarmirovannoj konstruktsii s obespecheniem termicheskoy treshinostojkosti [Experience of concreting a massive densely reinforced structure with thermal crack resistance] / S. S. Kapriev, A. V. Sheinfeld, S. I. Ivanov // Stroitel'nye materialy. – 2023. – № 10. – Pp. 15–24.
5. Nguyen, T-Ch. Thermal Cracks in Concrete Structure – The Basic Issues to Be Understood / T-Ch. Nguyen, K. A. Bui, Q. L. Hoang // Structural Health Monitoring and Engineering Structures. – 2021. – № 6. – Pp. 229–240.

УДК 69.003.12

## Технико-экономическое сравнение строительства зданий с применением аддитивной и традиционной технологий производства

Feasibility Study of Building Construction Using Additive and Conventional Manufacturing Technologies

## Галишникова Вера Владимировна

Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная и теоретическая механика», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, GalishnikovaVV@mgsu.ru

## Galishnikova Vera Vladimirovna

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, GalishnikovaVV@mgsu.ru

## Коренева Александра Игоревна

Аспирант Инженерной академии, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН), Россия, 117198, Москва, улица Миклухо-Маклая, 6; преподаватель кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, sasha.korenova@mail.ru

## Korenova Alexandra Igorevna

Postgraduate student of the Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (РУДН), Russia, 117198, Moscow, ulitsa Miklukho-Maklaya, 6; Teacher of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, sasha.korenova@mail.ru

## Аннотация.

Аддитивные технологии производства, в частности 3D-печать зданий, являются одними из перспективных вариантов повышения доли автоматизированных процессов на строительной площадке. Однако возникает вопрос об экономической целесообразности применения аддитивных технологий и затратах, которые понесёт строительная компания, решившаяся использовать 3D-печать на строительной площадке. Целью настоящего исследования является экономическое сравнение затрат на строительство здания с использованием технологии 3D-печати и традиционной технологии каменной кладки из газосиликатных блоков.

Затраты определены на строительство одноэтажного жилого здания без подвала. Затраты на аддитивный процесс производства несъёмной опалубки контура стен здания сравниваются с затратами на процесс кладки аналогичных стен из мелкоштучных газобетонных блоков. В расчётах был принят строительный 3D-принтер «АМТ» S-300. Удельная стоимость возведения стен

## Abstract.

Additive manufacturing technologies, in particular 3D printing building technology, are one of the promising directions of automated processes quantity promotion on the construction site. However, the question arises about the economic feasibility of using additive technologies and the costs incurred by a construction company that decides to use 3D printing on a construction site. The purpose of this study is to compare the economic costs of the building construction using 3D printing technology to the construction using traditional masonry technology from gas silicate blocks.

The costs associated with the construction of a one-story residential building without a basement are determined. The costs connected with the additive manufacturing process for the production of permanent formwork for the building walls contour are compared with the costs connected with the process of the similar walls masonry from gas silicate blocks having small di-

## Введение

Одним из вариантов автоматизации процессов на строительной площадке является строительная 3D-печать, в ходе которой происходит последовательное частичное или полностью автоматизированное послойное создание элементов здания за счёт повторения одних и тех же действий по заранее подготовленному в электронном виде заданию на печать [1–4].

К преимуществам данной технологии относится повышение безопасности труда и качества продукции за счёт исключения человека из производственного процесса [5]. К недостаткам мы можем отнести, прежде всего, существующие на данный момент ограничения по объёмно-планировочному и конструктивному решениям зданий, которые можно построить с применением технологии 3D-печати на строительной площадке, а также ограниченную номенклатуру конструктивных элементов, печатаемых 3D-принтером. Однако, даже если мы рассматриваем здание, которое технологически можно напечатать с использованием строительного 3D-принтера, неизбежно возникает вопрос об экономической целесообразности использования передовой технологии вместо существующих на сегодняшний день традиционных технологий строительства. Проведённое сравнение исследований по

здания с применением 3D-принтера составила 4 268 руб., для варианта с газобетонными блоками – 5 298 руб. в текущих ценах. Сравнение затрат на возведение стен выявило снижение стоимости на 20 % при использовании аддитивных технологий. Снижение продолжительности работ составило 1 день.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об экономической целесообразности применения аддитивных технологий, позволяющих снизить стоимость и продолжительность строительства. Был проанализирован эффект от внедрения аддитивных технологий производства, заключающийся в повышении безопасности труда, увеличении доли высококвалифицированных специалистов, занятых в строительстве, снижении использования одноразовой деревянной опалубки.

**Ключевые слова:** 3D-печать; аддитивные технологии; аддитивное строительное производство; автоматизация строительства; технико-экономическое сравнение; несъёмная опалубка; газосиликатные блоки.

dimensions. The 3D construction printer AMT S-300 was used in the calculations. The unit cost of building walls construction using 3D printer amounted 4 268 rubles, alternative method using gas silicate blocks amounted 5 298 rubles based on current prices. Comparison of wall construction costs revealed a 20% cost reduction with the application of additive technologies. The decrease of the construction period was found out to be 1 day.

The results obtained has led us to the conclusion that it is economically feasible to utilize additive technologies that can reduce the construction cost and period. It lies in the fact that level of labour safety will be increased, the amount of highly qualified specialists employed in construction will be increased and the use of disposable wooden formwork will be reduced.

**Keywords:** 3D printing; additive technologies; additive manufacturing technology; construction automation; technical and economic comparison; permanent formwork; gas silicate blocks.

данному вопросу и анализ полученных авторами результатов [6–11] указывают на конкурентные возможности рассматриваемой технологии на строительном рынке. Несмотря на это, для её оценки требуется проведение более тщательного анализа и соответствующего экономического сравнения.

## Материалы и методы

В статье рассмотрены основные экономические затраты, необходимые для реализации технологии аддитивного производства на примере 3D-печати. Область применения аддитивной технологии при выполнении данного анализа связана с созданием несъёмной опалубки контура стен. Для определения себестоимости получаемой с помощью рассматриваемой технологии продукции определены затраты на производство самого элемента несъёмной опалубки с помощью 3D-принтера, которые складываются из затрат на оборудование, сырьё и материалы, энергоносители, транспорт, амортизационные отчисления, из заработной платы основного персонала и её отчислений. При проведении данного экономического сравнения не принимаются во внимание затраты на сбыт и постпродажное обслуживание.

Для определения удельных затрат на возведение 1 м<sup>2</sup> стены здания рассмотрена 3D-печать одноэтажного зда-

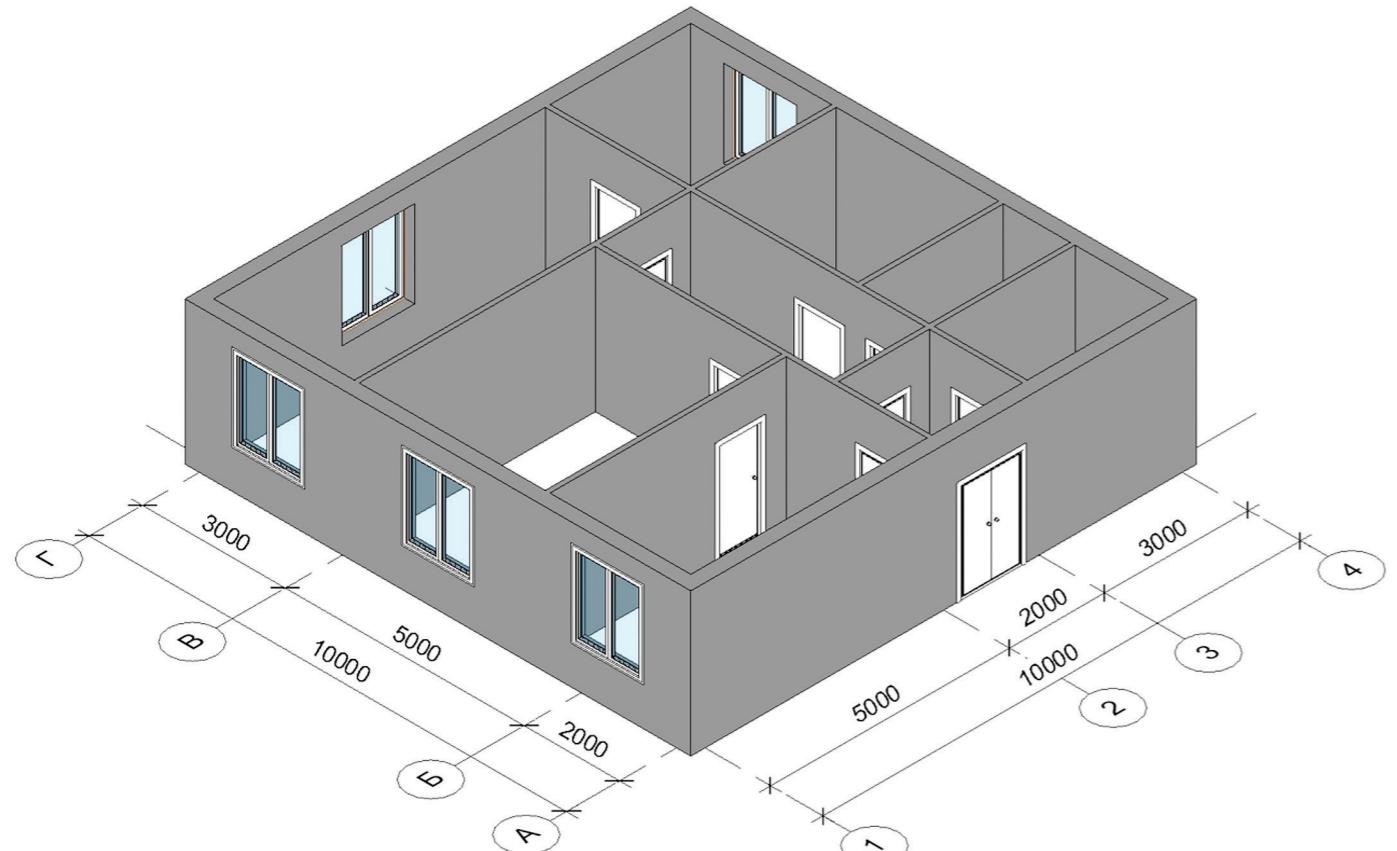
Характеристика	Значение
Размеры, м	10 × 10 × 3
Объём стен без проёмов, м <sup>3</sup>	33,44
Площадь проёмов, м <sup>2</sup>	27,78
Объём несъёмной печатаемой опалубки, м <sup>3</sup>	14,11
Площадь несъёмной печатаемой опалубки, м <sup>2</sup>	64,42
Масса несъёмной печатаемой опалубки, т	21,87
Объём заливаемого бетона, м <sup>3</sup>	19,32
Масса арматуры, т	0,07

**Табл. 1. Исходные данные проектируемого одноэтажного здания**

**Tab. 1.** Initial data of the designed one-story building

ния без подвала. Исходные данные представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Для возведения несъёмной опалубки стен одноэтажного здания был принят строительный 3D-принтер «АМТ» S-300 группы компаний «АМТ-СПЕЦАВИА», который работает по технологии СЕР (Construction Extrusion Printing) – технологии строительной печати. 3D-принтер поставляется в базовой комплектации. При приобретении 3D-принтера компания обучает специалистов заказчика бесплатно<sup>1</sup>. Для максимальной автоматизации процесса строительства требуется дополнительная растворная мешалка, которая не входит в базовую комплектацию. Производителем заявлено, что средняя стоимость регламентного месячного обслуживания 3D-принтера составляет 3 500 рублей. Технические характеристики принятого 3D-принтера представлены на сайте компании-изготовителя<sup>1</sup>.



**Рис. 1.** Возводимые стены проектируемого одноэтажного здания  
**Fig. 1.** The erected walls of the designed one-story building

**Табл. 2. Локальный сметный расчёт ресурсно-индексным методом**  
**Tab. 2. Local cost estimate calculation using the resource-index method**

№ пп.	Обоснование	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество			Сметная стоимость, руб.				
				на единицу измерения	коэффициенты	всего с учётом коэффициентов	на единицу измерения в базисном уровне цен	индекс	на единицу измерения в текущем уровне цен	коэффициенты	всего в текущем уровне цен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		оплата труда (ОТ)									79 658,89
		эксплуатация машин и механизмов									12 458,89
		оплата труда машинистов (ОТм)									11 818,70
		материалные ресурсы									262 133,44
		в том числе									262 133,44
		материалные ресурсы без учёта дополнительной перевозки									91 477,59
		Всего ФОТ (справочно)									100 625,35
		Всего сметная прибыль									63 119,54
		<b>Справочно</b>									
		затраты труда рабочих	148,1392								
		затраты труда машинистов	14,7136								

**Табл. 2 (продолжение).** Локальный сметный расчёт ресурсно-индексным методом  
**Tab. 2 (continued).** Local cost estimate calculation using the resource-index method

Наименование затрат	Количество	Единицы измерения	Наименование затрат	Количество	Единицы измерения
<b>Сметная стоимость</b>	529,81	тыс. руб.			
			Средства на оплату труда рабочих	79,66	тыс. руб.
в том числе:			Средства на оплату труда машинистов	11,82	тыс. руб.
строительных работ	529,81	тыс. руб.	Нормативные затраты труда рабочих	148,1392	чел.-ч.
монтажных работ	0,00	тыс. руб.	Нормативные затраты труда машинистов	14,7136	чел.-ч.
оборудования	0,00	тыс. руб.			
прочих затрат	0,00	тыс. руб.			

**Табл. 3.** Итоговые данные по локальному сметному расчёту ресурсно-индексным методом  
**Tab. 3.** Final data on local cost estimate calculation using the resource-index method

ВИМ-моделлера. Проводимое экономическое сравнение произведено исходя из вышеперечисленных допущений и ограничений.

Сравниваемая с аддитивной технологией производства традиционная технология рассматривалась применительно к возведению стеновых конструкций из мелкоштучных газобетонных блоков.

Место строительства – Московская область. Период проведения строительных работ – лето. Количество смен – в одну смену.

При этом использование аддитивной технологии производства рассматривалось с точки зрения приобретения необходимого оборудования и его будущей окупаемости, в то время как применение традиционных методов строительства учитывало аренду необходимого оборудования и приобретение расходных материалов.

#### Результаты

Определим удельную стоимость 1 м<sup>2</sup> стены одноэтажного здания при возведении с помощью аддитивной технологии и сравним с её удельной стоимостью при традиционной технологии производства.

Затраты при использовании мелкоштучных газобетонных блоков при возведении указанного ранее одноэтажного здания без подавала с теми же исходными данными приведены ниже. Возвведение здания выполняется с использованием блоков из ячеистых бетонов на цементном растворе М150.

Для определения сметной стоимости традиционной технологии производства с использованием газобетон-

ных блоков воспользуемся ресурсно-индексным методом согласно п. 10, подпункту «в» на основании данных ФГИС ЦС [11].

Результаты расчёта приведены в таблицах 2, 3.

Для определения сметной стоимости аддитивной технологии производства с использованием 3D-принтера воспользуемся конъюнктурным анализом согласно п. 13 на основании сбора информации о текущих ценах на 2025 г. [11], совместив с ресурсно-индексным методом.

Затраты на 3D-принтер «АМТ» группы компаний «АМТ-СПЕЦАВИА» S-300 составляют его цену для приобретения на территории РФ 8 460 000 рублей [12]. Затраты на приобретение растворной мешалки для увеличения автоматизации производственного процесса, включая НДС и доставку, составляют 30 000 руб. Транспортные расходы связаны с доставкой 3D-принтера на строительную площадку, с исходными данными для расчёта составят 58 000 руб.

Для определения стоимости 1 ч. работы 3D-принтера найдём стоимость 1 ч. работы каждого отдельного механизма автоматизации, дополнительно применяемого в производстве, включая себестоимость оборудования, стоимость доставки и обслуживания относительно всего срока службы механизма по формуле:

$$\frac{S_{\pi} + S_{\pi 1} + S_{\pi 1} + S_{\pi 1}}{t_{\pi 1}} + \frac{S_{\pi} + S_{\pi 2} + S_{\pi 2} + S_{\pi 2}}{t_{\pi 2}}, \quad (1)$$

где  $S_{\pi}$  – текущая отпускная цена принтера за единицу измерения без НДС, руб.;

№ пп.	Обоснование	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество			Сметная стоимость, руб.				
				на единицу измерения	коэффициенты	всего с учётом коэффициентов	на единицу измерения в базисном уровне цен	индекс	на единицу измерения в текущем уровне цен	коэффициенты	всего в текущем уровне цен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Печать стен</b>											
1	КАЦ	3D-принтер	маш.-ч.	7		7	289,48	1,24	358,96	289,48	2 026,36
		<b>Всего по позиции</b>									<b>2 026,36</b>
2	КАЦ	Оператор 3D-принтера	чел.-ч.	20		20	1 035,62				20 712,40
		ФОТ									20 712,40
		<b>Всего по позиции</b>									<b>1 035,62</b>
											<b>20 712,40</b>
3	ГЭСН 06-16-003-01	Монтаж и демонтаж блочной опалубки стен	10 м <sup>2</sup>	2,778		2,778					
	1	ОТ (ЗТ)	чел.-ч.				38,66976				<b>18 809,36</b>
	1-100-20	Средний разряд работы 2,0	чел.-ч.	13,92		38,66976					18 809,36
	2	ЭМ									<b>6 485,16</b>
	91.05.01-017	ОТм (ЗТм)	чел.-ч.				8,69514				<b>6 277,27</b>
	91.05.01-017	Краны башенные, грузоподъёмность 8 т	маш.-ч.	1,67		4,63926	622,62	1,36	846,76		3 928,34
	4-100-060	ОТм (ЗТм) Средний разряд машинистов 6	чел.-ч.	1,67		4,63926					803,25
	91.05.05-015	Краны на автомобильном ходу, грузоподъёмность 16 т	маш.-ч.	0,22		0,61116					1 552,12
	4-100-060	ОТм (ЗТм) Средний разряд машинистов 6	чел.-ч.	0,22		0,61116					490,91
	91.06.06-051	Подъёмники строительные грузопассажирские, грузоподъёмность до 0,8 т, высота подъёма до 80 м	маш.-ч.	0,8		2,2224					402,96
	4-100-040	ОТм (ЗТм) Средний разряд машинистов 4	чел.-ч.	0,8		2,2224					597,98
	91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъёмность до 5 т	маш.-ч.	0,44		1,22232	477,92	1,22	583,06		712,69
	4-100-040	ОТм (ЗТм) Средний разряд машинистов 4	чел.-ч.	0,44		1,22232					597,98
	4	М									<b>1 794,93</b>
	01.7.15.06-0111	Гвозди строительные	т	0,004		0,011112	70 296,20	1,25	87 870,25		976,41
	11.1.03.05-0066	Доска необрезная хвойных пород, естественной влажности, длина 2–6,5 м, ширина 100–250, толщина 30–50 мм, сорт IV	м <sup>3</sup>	0,02		0,05556	7 555,00	1,95	14 732,25		818,52
		<b>Итого прямые затраты</b>									<b>33 366,72</b>
		ФОТ									<b>25 086,63</b>
	Пр/812-006.1-1	НР Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве с применением индустриальных видов опалубки	%	108		108					<b>27 093,56</b>
	Пр/774-006.1	СП Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве с применением индустриальных видов опалубки	%	55		55					<b>13 797,65</b>
	4	04.3.02.11-0011	Смеси сухие цементные								

№ пп.	Обоснование	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Сметная стоимость, руб.							
				Количество			Сметная стоимость, руб.				
				на единицу измерения	коэффициенты	всего с учётом коэффициентов	на единицу измерения в базисном уровне цен	индекс	на единицу измерения в текущем уровне цен	коэффициенты	всего в текущем уровне цен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	4-100-060	ОТм (3Тм) Средний разряд машинистов 6	чел.-ч.	0,09	0,0063		803,25			5,06	
	91.14.02-001	Автомобили бортовые, грузоподъёмность до 5 т	маш.-ч.	0,13	0,0091	477,92	1,22	583,06		5,31	
	4-100-040	ОТм (3Тм) Средний разряд машинистов 4	чел.-ч.	0,13	0,0091		597,98			5,44	
	4	М								30,76	
	08.3.03.04-0012	Проволока светлая, диаметр 1,1 мм	т	0,005	0,00035	88 783,86	0,99	87 896,02		30,76	
		<b>Итого прямые затраты</b>								934,26	
		ФОТ								867,07	
	Пр/812-006.1-1	НР Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве с применением индустриальных видов опалубки	%	108	108					936,44	
	Пр/774-006.1	СП Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве с применением индустриальных видов опалубки	%	55	55					476,89	
		<b>Всего по позиции</b>					33 537,00		2 347,59		
6	08.4.03.03-0003	Прокат арматурный для железобетонных конструкций, класс A500C, диаметр 10 мм	т	0,07	0,07	58 288,00	0,89	51 876,32		3 631,34	
		<b>Всего по позиции</b>					51 876,29		3 631,34		
7	ГЭСН 06-16-004-10	Бетонирование конструкций наружных стен, с помощью автобетононасоса в крупнотитовой, объёмно-переставной и блочной опалубках, толщиной: до 30 см	10 м <sup>2</sup>	6,44	6,44						
	1	ОТ (3Т)	чел.-ч.		23,5704					12 674,51	
	1-100-31	Средний разряд работы 3,1	чел.-ч.	3,66	23,5704		537,73		12 674,51		
	2	ЭМ								24 363,58	
		ОТм (3Тм)	чел.-ч.		7,728					6 621,35	
	91.07.02-011	Автобетононасосы, производительность 65 м <sup>3</sup> /ч	маш.-ч.	1,2	7,728	2 390,07	1,31	3 130,99		24 196,29	
	4-100-070	ОТм (3Тм) Средний разряд машинистов 7	чел.-ч.	1,2	7,728		856,80			6 621,35	
	91.07.04-001	Вибраторы глубинные	маш.-ч.	2,02	13,0088	10,37	1,24	12,86		167,29	
	4	М								647,43	
	01.3.04.08-0012	Масло антраценовое	т	0,0042	0,027048	26 894,82	0,89	23 936,39		647,43	
		<b>Итого прямые затраты</b>								44 306,87	
		ФОТ								19 295,86	
	Пр/812-006.1-1	НР Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве с применением индустриальных видов опалубки	%	108	108					20 839,53	
	Пр/774-006.1	СП Бетонные и железобетонные монолитные конструкции и работы в строительстве с применением индустриальных видов опалубки	%	55	55					10 612,72	
		<b>Всего по позиции</b>					11 763,84		75 759,12		
8	04.1.02.05-0006	Смеси бетонные тяжёлого бетона (БСТ), класс В15 (М200)	м <sup>3</sup>	19,6098	19,6098		6 740,04		132 170,84		
		<b>Всего по позиции</b>					6 740,04		132 170,84		
		<b>Итого прямые затраты по разделу 1</b>								352 989,81	
		<i>в том числе:</i>									
		оплата труда								53 032,60	
		эксплуатация машин и механизмов								32 911,53	
		оплата труда машинистов (ОТм)								12 929,36	
		материальные ресурсы								254 116,32	
		<i>в том числе:</i>									
		материальные ресурсы без учёта дополнительной перевозки								254 116,32	
		Всего ФОТ (справочно)								65 961,96	
		Всего накладные расходы								48 869,53	

Табл. 4 (продолжение). Локальный сметный расчёт ресурсно-индексным методом  
Tab. 4 (continued). Local cost estimate calculation using the resource-index method

№ пп.	Обоснование	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Сметная стоимость, руб.							
				Количество			Сметная стоимость, руб.				
				на единицу измерения	коэффициенты	всего с учётом коэффициентов	на единицу измерения в базисном уровне цен	индекс	на единицу измерения в текущем уровне цен	коэффициенты	всего в текущем уровне цен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Всего сметная прибыль									24 887,26
		<b>Итого по разделу</b>									426 746,60
		<i>Справочно</i>									
		затраты труда рабочих					63,92856				
		затраты труда машинистов					16,46374				
		<b>ИТОГИ ПО СМЕТЕ</b>									
		<b>ВСЕГО строительные работы</b>									426 746,60
		<i>в том числе</i>									352 989,81
		Всего прямые затраты									
		<i>в том числе</i>									352 989,81
		оплата труда (ОТ)									53 032,60
		эксплуатация машин и механизмов									32 911,53
		оплата труда машинистов (ОТм)									12 929,36
		материальные ресурсы									254 116,32
		<i>в том числе</i>									
		материальные ресурсы без учёта дополнительной перевозки									254 116,32
		Всего ФОТ (справочно)									65 961,96
		Всего накладные расходы									48 869,53

Табл. 4 (продолжение). Локальный сметный расчёт ресурсно-индексным методом  
Tab. 4 (continued). Local cost estimate calculation using the resource-index method

Наименование затрат	Количество	Единицы измерения	Наименование затрат		Количество	Единицы измерения
			Сметная стоимость	426,75	тыс. руб.	
			Средства на оплату труда рабочих			53,03
			Средства на оплату труда машинистов			12,93
			строительных работ	426,75	тыс. руб.	Нормативные затраты труда

Наименование затрат	Аддитивная технология производства с использованием 3D-принтера	Традиционная технология с использованием газобетонных блоков
Всего прямые затраты на оплату труда (ОТ), тыс. руб.	53,03	79,66
Всего прямые затраты на эксплуатацию машин и механизмов, тыс. руб.	32,91	12,46
Всего прямые затраты на оплату труда машинистов (ОТм), тыс. руб.	12,93	11,82
Всего прямые затраты на материальные ресурсы, тыс. руб.	254,12	262,13
Всего ФОТ, тыс. руб.	65,96	91,48
Всего накладные расходы, тыс. руб.	48,87	100,63
Всего сметная прибыль, тыс. руб.	24,89	63,12
Всего прямые затраты, тыс. руб.	352,99	366,07
Средства на оплату труда рабочих, тыс. руб.	53,03	79,66
Средства на оплату труда машинистов, тыс. руб.	12,93	11,82
Нормативные затраты труда рабочих, чел.-ч.	63,92856	148,1392
Нормативные затраты труда машинистов, чел.-ч.	16,46374	14,7136
Сметная стоимость строительных работ, тыс. руб.	426,75	529,81
Общая сметная стоимость, тыс. руб.	426,75	529,81

**Табл. 6. Сравнение строительства с использованием аддитивной технологии производства и традиционной технологии с применением газобетонных блоков с точки зрения их применения строительной компанией**

**Tab. 6. Comparison of construction using additive manufacturing technology and traditional technology applying aerated concrete blocks in the terms of their application by a construction company**

Наименование затрат	Аддитивная технология производства с использованием 3D-принтера	Традиционная технология с использованием газобетонных блоков
Общая стоимость строительства, тыс. руб.	426,75	529,81
Продолжительность строительства	3 дня	4 дня
Количество рабочих	3 человека	6 человек
Удельная стоимость 1 м <sup>2</sup> стены, руб.	4 268	5 298

**Табл. 7. Сводная таблица**  
**Tab. 7. Summary table**

условия. Кроме этого, увеличим трудозатраты, связанные с аддитивной технологией производства, учитывая необходимость подготовки оборудования и бетонной смеси к 3D-печати.

Результаты расчёта приведены в таблицах 4, 5.

Прямые затраты, обуславливающие себестоимость получаемой продукции, которые необходимы для вычисления удельных затрат на возведение 1 м<sup>2</sup> стены здания, приведены в таблице 6.

#### Обсуждение

Сравнение общих затрат представлено в таблице, которая наглядно демонстрирует экономическую выгоду в 20 % при возведении несъёмной опалубки стен одноэтажного здания с использованием аддитивной технологии производства по сравнению с традиционной технологией возведения здания с применением газобетонных блоков. Так как рекомендаемая производителем оборудование<sup>1</sup> численность персонала – 2 оператора 3D-принтера, то будем исходить из того, что все необходимые сопутствующие работы (монтаж и демонтаж опалубки для проёмов, установка конструктивных стержней арматуры и бетонирование внутренней полости печатаемых стен) выполняются этими же 2 операторами и плюс 1 машинистом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пустовгар, А. П. Технология и организация аддитивного строительства / А. П. Пустовгар, А. О. Адамцевич, А. А. Волков // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 9. – С. 12–20.
- Koroteev, D. D. The application of additive manufacturing technologies in the construction industry by the example of 3D-model design and printing / D. D. Koroteev, A. I. Koreneva, N. Yu. Kolupaev // AIP Conference Proceedings / Proceedings of the International Conference on Engineering Research 2021 (Icer 2021), Moscow, Russia. – 2022. – Vol. 2559, No. 040004. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0099008>.
- Молодин, В. В. Технология 3D-печати одностадийным полистиролбетоном [Single-stage polystyrene concrete 3D printing technology] / В. В. Молодин, И. И. Гасенко, П. Л. Тимин. – DOI 10.33942/sit.nes033 // Nauka i innovatsionnye tekhnologii [Science and Innovative Technologies]. – 2020. – № 1 (14). – Pp. 278–287.

Наука и инновационные технологии. – 2020. – № 1 (14). – С. 278–287. – URL: <https://doi.org/10.33942/sit.nes033>.

4. Коротеев, Д. Д. Применение аддитивных технологий производства в строительстве на примере разработки 3D-модели с последующей печатью / Д. Д. Коротеев, А. И. Коренева // Системные технологии. – 2021. – № 2 (39). – С. 21–30.

5. 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector / R. Robayo-Salazar, R. Mejía de Gutiérrez, M. A. Villaquirán-Caicedo, S. D. Arjona // Automation in Construction. – 2023. – Vol. 146, No. 104693. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693>.

6. Славчева, Г. С. Комплексная оценка конкурентоспособности строительных 3D-принтеров / Г. С. Славчева, И. И. Акулова, П. Ю. Юров // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2023. – № 1. – С. 8–18. – URL: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2022-8-1-8-18>.

7. Акулова, И. И. Технико-экономическая оценка эффективности применения 3D-печати в жилищном строительстве / И. И. Акулова, Г. С. Славчева, Т. В. Макарова // Жилищное строительство. – 2019. – № 12. – С. 52–56. – URL: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-12-52-56>.

8. Орлов, А. К. Организационно-экономические аспекты применения аддитивной технологии при реализации девелоперских проектов в малоэтажном строительстве / А. К. Орлов, К. В. Зайченко // Недвижимость: экономика, управление. – 2018. – № 2. – С. 32–36.

#### REFERENCES

- Pustovgar, A. P. Tekhnologiya i organizatsiya additivnogo stroitel'stva [Technology and organization of additive construction] / A. P. Pustovgar, A. O. Adamtsevich, A. A. Volkov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. – 2018. – №. 9. – Pp. 12–20.
- Koroteev, D. D. The application of additive manufacturing technologies in the construction industry by the example of 3D-model design and printing / D. D. Koroteev, A. I. Koreneva, N. Yu. Kolupaev // AIP Conference Proceedings / Proceedings of the International Conference on Engineering Research 2021 (Icer 2021), Moscow, Russia. – 2022. – Vol. 2559, No. 040004. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0099008>.
- Molodin, V. V. Tekhnologiya 3D-pechati odnostadijnym polistirolobetonom [Single-stage polystyrene concrete 3D printing technology] / V. V. Molodin, I. I. Gasenko, P. L. Timin. – DOI 10.33942/sit.nes033 // Nauka i innovatsionnye tekhnologii [Science and Innovative Technologies]. – 2020. – № 1 (14). – Pp. 278–287.
- Koroteev, D. D. Primenenie additivnykh tekhnologij proizvodstva v stroitel'stve na primere razrabotki 3D-modeli s posleduyushchey pechat'yu [An experimental study of the additive manufacturing technology application in the construction industry using the example of 3D-model design and printing] / D. D. Koroteev, A. I. Koreneva // Sistemnye tekhnologii [System Technologies]. – 2021. – №. 2 (39). – Pp. 21–30.
- 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector / R. Robayo-Salazar, R. Mejía de Gutiérrez, M. A. Villaquirán-Caicedo, S. D. Arjona // Automation in Construction. – 2023. – Vol. 146, No. 104693. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693>.
- Slavcheva, G. S. Kompleksnaya otsenka konkurentosposobnosti stroitel'nykh 3D-printerov [Comprehensive assessment of 3D-build printer competitiveness] / Slavcheva G. S., I. I. Akulova, P. Y. Yurov. – DOI 10.34031/2071-7318-2022-8-1-8-18 // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuhova [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]. – 2023. – № 1. – Pp. 8–18.
- Akulova, I. I. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka effektivnosti primeneniya 3D-pechati v zhilishchnom stroitel'stve [Technical and economic estimate of efficiency of using 3D printing in housing construction] / I. I. Akulova, G. S. Slavcheva, T. V. Makarova. – DOI 10.31659/0044-4472-2019-12-52-56 // Zhilishchnoe stroitel'stvo [Housing Construction]. – 2019. – № 12. – Pp. 52–56.
- Orlov, A. K. Organizatsionno-ekonomicheskie aspekty primeneniya additivnoj tekhnologii pri realizatsii developerskikh proektov v maloetazhnom stroitel'stve [Organizational and economic aspects of additive technologies application during development projects implementation in low-rise construction] / A. K. Orlov, K. V. Zaychenko // Nedvizhimost': ekonomika, upravlenie [Real Estate: Economics, Management]. – 2018. – № 2. – Pp. 32–36.
- 3D concrete printing for sustainable and economical construction: A comparative study / M. Batikha, R. Jotangia, M. Yasser Baaj, I. Mousleh // Automation in Construction. – 2022. – Vol. 134, No. 104087. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104087>.
- Sustainability tradeoffs in the adoption of 3D Concrete Printing in the construction industry / M. Adaloudis, J. B. Roca // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 307, No. 127201. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127201>.
- Ob utverzhdenii Metodiki opredeleniya smetnoy stoimosti stroitel'stva, rekonstruktsii, kapital'nogo remonta, snosa ob'ektorov kapital'nogo stroitel'stva, rabot po sokhraneniyu ob'ektorov kul'turnogo naslediya (pamyatnikov istorii i kul'tury) narodov Rossiyskoy Federatsii na territorii Rossiyskoy Federatsii (s izmeneniyami na 23 yanvarya 2025 goda) : Prikaz Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 04.08.2020 N 421/pr : zaregistrirovano v Ministerstve yustitsii RF 23 sentyabrya 2020 goda, reg. № 59986 [Prikladnoye pravovye dokumenty «Kodeks»] // Elektronnyj fond aktual'nykh pravovykh i normativno-tehnicheskikh dokumentov «Kodeks» [Electronic Fund of relevant legal and regulatory documents «Codex】. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/565649004>.
- Demidenko, A. K. Perspektivy primeneniya 3D-pechati v stroitel'nom komplekse Rossijskoj Federatsii [Prospects of 3D-printing in the building complex of the Russian Federation] / A. K. Demidenko, A. V. Kulibaba, M. F. Ivanov. – DOI 10.18720/CUBS.63.4 // Stroitel'stvo unikal'nykh zdanij i sooruzhenij [Construction of Unique Buildings and Structures]. – 2017. – № 12 (63). – Pp. 71–96. – URL: <https://doi.org/10.18720/CUBS.63.4>.

## Определение затрат труда на разработку рабочей документации раздела «Конструктивные решения»

Determination of Labor Costs for the Development of Working Documentation for the Section «Design Solutions»

**Коротеев Дмитрий Дмитриевич**

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, KoroteevMGSU@yandex.ru

Koroteev Dmitry Dmitrievich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, KoroteevMGSU@yandex.ru

**Максименко Ростислав Вадимович**

Магистрант кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, maximenko.rostislav08@yandex.ru

Maksimenko Rostislav Vadimovich

Master student of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, maximenko.rostislav08@yandex.ru

### Аннотация.

Статья посвящена расчёту затрат труда инженеров-проектировщиков на разработку рабочей документации раздела «Конструктивные решения» с применением нейронных сетей. Авторы предлагают интегрированный подход, объединяющий количественный анализ трудозатрат на проектирование и метод экспертной оценки трудоёмкости в зависимости от различных факторов.

Для количественной оценки объёма применяется ранжирование графических элементов по пяти уровням сложности, что обеспечивает получение объективной числового характеристики проекта. В свою очередь, качественные особенности проектов учитываются с помощью метода экспертных оценок, позволяющего учёт уникальные аспекты и специфику каждого объекта. Такой подход делает расчёты более гибкими и адап-

### Abstract.

The article is devoted to the calculation of the labor costs of design engineers for the development of working documentation for the "Design Solutions" section using neural networks. The authors propose an integrated approach that combines a quantitative analysis of design labor costs and an expert assessment method for labor intensity depending on various factors.

For a quantitative assessment of the volume, graphic elements are ranked by five levels of complexity, which ensures an objective numerical characteristic of the project. In turn, the qualitative features of projects are taken into account using the expert assessment method, which allows for the unique aspects and specifics of each object. This approach makes the calculations more

### Введение

Разработка проектной и рабочей документации на этапе архитектурно-строительного проектирования жизненного цикла объектов капитального строительства является сложной и многоступенчатой задачей, требующей чёткого взаимодействия всех субъектов инвестиционно-строительного процесса, таких как архитектурные бюро, проектно-конструкторские подразделения, инженерно-технические службы, генеральный подрядчик, технический заказчик (застройщик), экспертные организации.

тивными к различным условиям проектирования.

Анализ результатов обучения и тестирования модели свидетельствует об её эффективности. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) достигает значений 0,952 на обучающей выборке и 0,933 на тестовой, что указывает на способность модели объяснять изменчивость данных. Средняя абсолютная ошибка (MAE), равная 182,07 чел.-часа на тестовой выборке, подтверждает приемлемую точность расчёта даже при использовании синтетических данных. Эти результаты свидетельствуют о практической применимости разработанного подхода для расчёта затрат труда на проектирование.

**Ключевые слова:** определение трудозатрат; проектная и рабочая документация; конструктивные решения; оптимизация процессов проектирования; планирование затрат ресурсов.

flexible and adaptive to various design conditions.

Analysis of the training and testing results of the model indicates its effectiveness. The determination coefficient ( $R^2$ ) reaches values of 0.952 on the training sample and 0.933 on the test sample, which indicates the ability of the model to explain data variability. The mean absolute error (MAE) equal to 182.07 man-hours on the test sample confirms the acceptable accuracy of the calculation even when using synthetic data. These results indicate the practical applicability of the developed approach for calculating labor costs for design.

**Keywords:** determination of labor costs; design and working documentation; design solutions; optimization of design processes; planning of resource costs.

Однако междисциплинарное взаимодействие между ними часто сопровождается координационными трудностями, что может стать причиной срывов сроков реализации проектов, а также неоправданного роста затрат ресурсов. Особенно остро эта проблема стоит в современных условиях строительного рынка, где высокая конкуренция и жёсткие временные рамки выполнения контрактов создают дополнительное давление [1].

В связи с этим целью данного исследования является разработка механизма расчёта трудозатрат инженеров-проектировщиков на разработку проектной и рабочей

документации. Так как архитектурно-строительное проектирование включает в себя различные разделы проекта, каждый из которых имеет свою специфику, в качестве объекта исследования был выбран процесс разработки комплексов чертежей раздела «Конструктивные решения» (КР), поскольку этот этап является одним из ключевых.

В качестве инструмента для расчёта трудозатрат на разработку чертежей раздела КР выбраны нейронные сети, являющиеся одной из ключевых технологий искусственного интеллекта, демонстрирующие впечатляющие результаты в решении задач, которые ранее считались исключительно человеческой прерогативой. Например, в распознавании образов свёрточные нейронные сети (CNN) успешно справляются с идентификацией объектов и сегментацией изображений [2]. Такие технологии применяются в промышленном контроле качества, медицинской диагностике [3]. Генеративно-состязательные сети (GAN) дополняют эту область, позволяя модифицировать или создавать изображения с высокой детализацией [4].

Параллельно развивается обработка естественного языка (NLP), где архитектуры типа трансформеров, такие как BERT и GPT, совершили революцию. Эти модели не только улучшили качество автоматического перевода и генерации текста, но и стали основой для чат-ботов, анализа тональности и других инструментов, меняющих коммуникацию во многих сферах деятельности человека [5; 6].

Ещё одно важное направление – это прогнозирование. Нейросети, анализируя данные, выявляют сложные взаимосвязи, что позволяет предсказывать рыночные тренды в финансах, погодные изменения в метеорологии, спрос на товары в экономике или риски заболеваний в медицине. В строительной отрасли нейронные сети начинают всё больше применяться как на различных этапах жизненно-циклического цикла объектов капитального строительства, так и при реализации различных форм воспроизводства основных фондов строительных объектов [7–9]. Их применение позволяет трансформировать подходы к управлению проектами: алгоритмы прогнозируют сроки выполнения работ, оценивают риски срывов и автоматизируют планирование ресурсов [10; 11].

### Материалы и методы

Методика расчёта трудозатрат на разработку комплексов рабочей документации раздела «Конструктивные ре-

Тип переменных	Значения переменных
Независимые переменные	Объём проектирования
	Продолжительность проектирования
	Сложность объекта
	Состав команды конструкторов
Целевая переменная	Затраты труда

**Табл. 1. Независимые переменные для обработки нейронной сети**

**Tab. 1. Independent variables for processing by a neural network**

шения» базируется на системном анализе ключевых параметров проекта, таких как масштаб и сложности.

На вход нейронной сети поступают предварительно обработанные независимые переменные, включая такие параметры, как объём работ, сложность проекта, продолжительность проектирования и состав команды конструкторов. Целевая переменная представляет собой затраты труда. Все независимые переменные, а также целевая, описаны в таблице 1.

Схема определения трудозатрат на разработку чертежей раздела КР представлена на рисунке 1.

Процесс определения объёма проектирования включает в себя:

1. Анализ альбомов «Конструктивные решения».

На этом этапе проводится детальный анализ каждого листа альбомов раздела КР. Листы содержат графические элементы, такие как планы, разрезы, схемы и узлы. Для каждой графической единицы информации определяется ранг сложности по шкале от 1 до 5:

1 – простая единица;

2 – единица средней сложности;

3 – единица повышенной сложности;

4 – сложная единица;

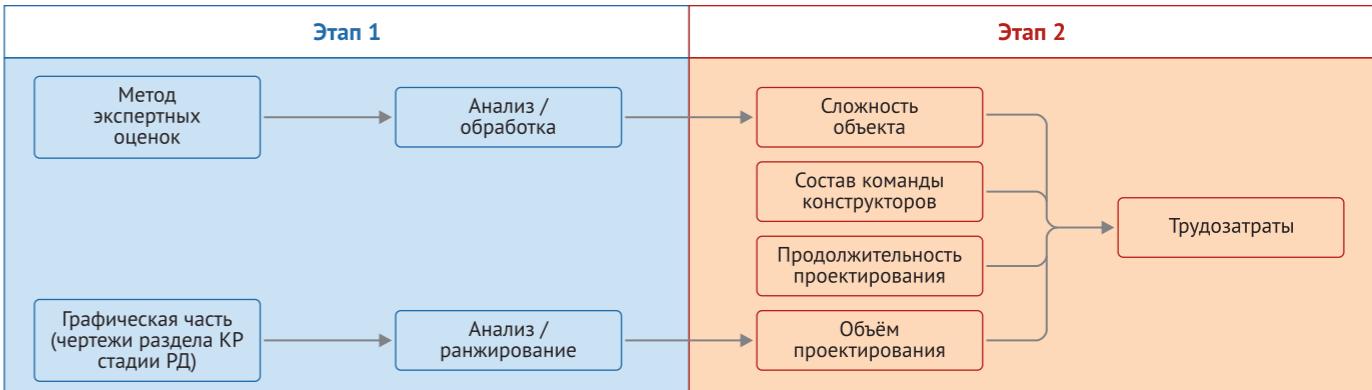
5 – очень сложная единица.

2. Расчёт сводной сложности альбома.

После присвоения рангов всем графическим элементам на листе вычисляется сводная сложность для всего альбома. Для этого суммируются ранги всех единиц информации, после чего полученное значение делится на их общее количество. Такой подход позволяет получить усреднённую оценку сложности альбома.

3. Расчёт объёма проектирования для объекта.

Объём проектирования для всего объекта рассчитывается путём суммирования сводных сложностей всех альбомов КР, относящихся к данному объекту. В результате формируется интегральная оценка объёма проектирования, которая служит основой для дальнейших расчётов.



**Рис. 1. Схема определения трудозатрат**  
**Fig. 1. Workload Definition Scheme**

Для оценки сложности проектирования применяется метод экспертизы оценок. Его использование обусловлено тем, что сложность объекта часто не может быть полностью формализована или измерена с помощью только объективных данных. Опыт и профессиональная интуиция квалифицированных специалистов позволяют учесть множество факторов, влияющих на трудоёмкость процесса, которые сложно или невозможно отразить в строгих математических моделях. К таким факторам относятся: нестандартные конструктивные решения, сложные геологические условия, повышенные требования к безопасности и надёжности конструкций, необходимость применения инновационных материалов и технологий, а также ограничения по срокам и бюджету.

Параметры объёма и сложности проектирования, используемые в модели, характеризуют разные аспекты трудоёмкости: объём отражает количественную насыщенность проекта графическими элементами, а сложность – качественные, экспертно оцениваемые особенности, влияющие на трудозатраты. Их совместное использование обеспечивает комплексную и сопоставимую оценку трудоёмкости проектирования.

На втором этапе исследования для определения функциональной зависимости между независимыми переменными и целевой переменной используется полно связная нейронная сеть – многослойный персептрон. Входные данные представляются в виде действительных чисел, соответствующих независимым переменным, а выходом сети является действительное число, отражающее затраты труда на проектирование.

В нейросетевых моделях выделяются два основных типа параметров: гиперпараметры и обучаемые параметры. Гиперпараметры задаются до начала обучения и оказывают значительное влияние на архитектуру модели и её производительность. К ключевым гиперпараметрам относятся количество скрытых слоёв, число нейронов в

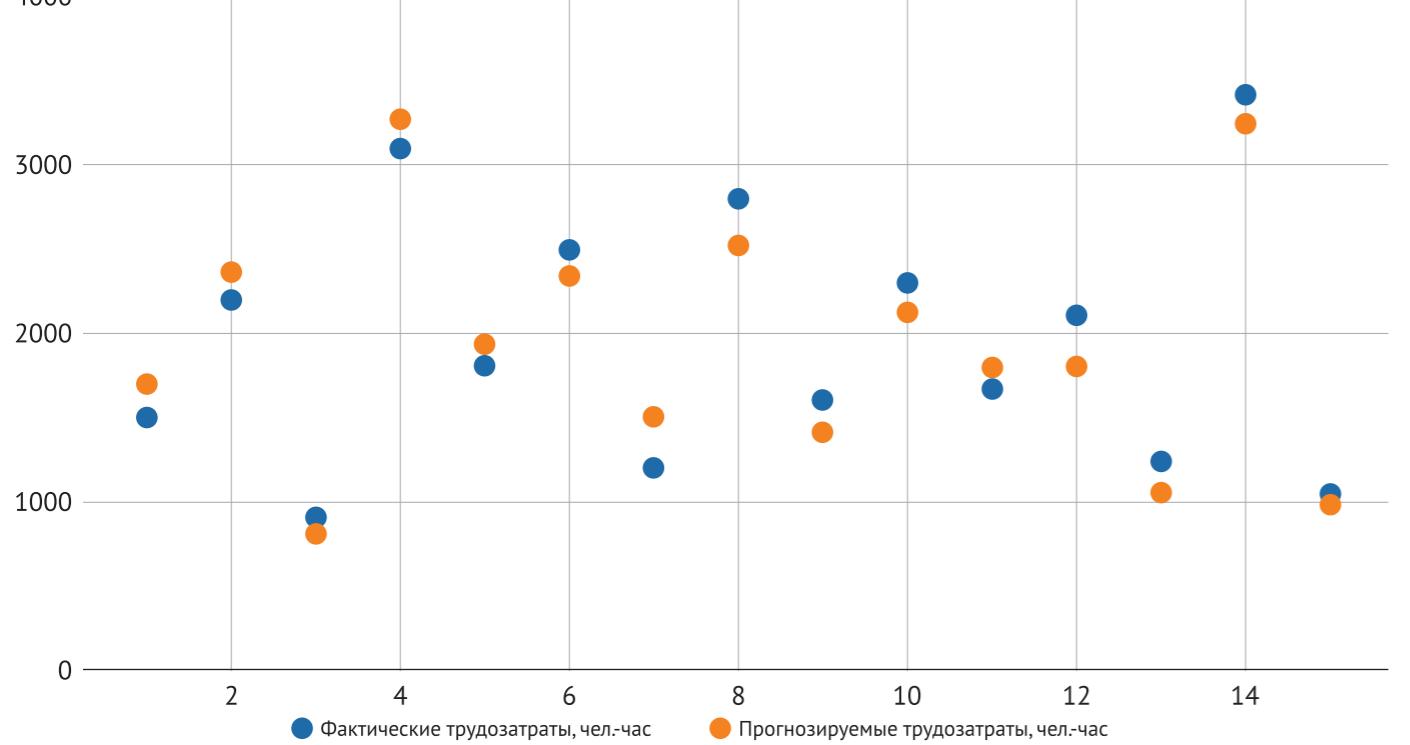


Рис. 2. Диаграмма рассеяния тестовой выборки  
Fig. 2. Test Sample Scatter

Метрика	Обучающая выборка	Тестовая выборка
MAE (чел.-час)	124,29	182,07
R	0,952	0,933

Табл. 2. Результаты обучения и тестирования нейронной сети  
Tab. 2. Neural Network Training and Testing Results

каждом слое, скорость обучения, размер минипакета и количество эпох. Коэффициенты регуляризации помогают предотвратить переобучение, а выбор функции активации и метода оптимизации существенно влияет на результаты работы сети [12].

Обучаемые параметры, в отличие от гиперпараметров, корректируются в процессе обучения. К ним относятся веса нейронов, определяющие силу связей между ними, и смещения, которые добавляются к выходу каждого нейрона для повышения точности предсказаний. Эти параметры обновляются на каждой итерации обучения в соответствии с выбранным алгоритмом оптимизации. Они играют ключевую роль в способности нейросети обобщать информацию и делать достоверные прогнозы [13].

Оптимальный выбор гиперпараметров и эффективное обучение параметров являются основополагающими для успешного применения нейросети как инструмента в данном исследовании, а также в решении широкого спектра практических задач.

#### Результаты и их обсуждение

Для оценки эффективности разработанного инструмента расчёта трудозатрат на разработку комплектов строительных чертежей раздела КР была проведена серия экспериментов с использованием нейронной сети на основе архитектуры многослойного персептрана. В условиях отсутствия реальных данных о трудозатратах был создан синтетический набор данных, имитирующий различные проекты и включающий 150 записей (жилые и общественные здания на стадии эксплуатации, раздел КР,

стадия рабочей документации). При формировании данных учитывались зависимости между характеристиками объектов, уровнем сложности проекта и трудозатратами. Для проведения эксперимента данные были разделены на обучающую выборку (90 %) и тестовую выборку (10 %), что позволило провести анализ на основе 15 проектов.

Обучение модели осуществлялось с использованием алгоритма обратного распространения ошибки и оптимизатора Adam. Архитектура нейронной сети состояла из трёх скрытых слоёв, содержащих 128, 64 и 32 нейрона соответственно, с функцией активации ReLU. Для повышения точности прогнозирования в модель был интегрирован дополнительный входной параметр – экспертные оценки сложности проектов, сгенерированные на основе заданных характеристик.

В процессе обучения отслеживались ключевые метрики для оценки качества модели:

- Средняя абсолютная ошибка (MAE), которая показывает среднее отклонение прогнозируемых значений трудозатрат от фактических (синтетических) данных;
- Коэффициент детерминации ( $R^2$ ), характеризующий способность модели объяснять изменчивость данных и демонстрирующий степень соответствия между прогнозируемыми и реальными значениями.

Результаты обучения и тестирования модели представлены в таблице 2.

Несмотря на то, что использовались синтетические данные, полученные результаты демонстрируют высокий потенциал предложенной методики. Значения коэффициента детерминации ( $R^2$ ), равные 0,952 на обучающей выборке и 0,933 на тестовой, свидетельствуют о значительной степени соответствия между прогнозируемыми и фактическими значениями трудозатрат в рамках сгенерированного набора данных. Средняя абсолютная ошибка на тестовой выборке составила 182,07 чел.-часа, что под-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Жданова, М. В. Сокращение продолжительности сроков жизненного цикла строительного проекта / М. В. Жданова, А. А. Лапидус // Строительство и архитектура. – 2024. – Т. 12, № 4 (45). – С. 6.
- Akash Guna, R. T. Interpreting CNN predictions using conditional Generative Adversarial Networks / R. T. Akash Guna, O. K. Sikha, Raul Benitez // Knowledge-Based Systems. – 2024. – Vol. 302. – Art. 112340. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.112340>.
- Big Model Strategy for Bridge Structural Health Monitoring Based on Data-Driven, Adaptive Method and Convolutional Neural Network (CNN) Group / Y. Xu, W. Hong, M. Noori, W. A. Altabey, A. Silik, N. Farhan // SDHM Structural Durability and Health Monitoring. – 2024. – Vol. 18, No. 6. – Pp. 763–783. – URL: <https://doi.org/10.32604/sdhm.2024.053763>.
- Yu, C. Improving generative adversarial network inversion via fine-tuning GAN encoders / C. Yu, W. Wang, R. Bugioliacci // Applied Soft Computing. – 2024. – Vol. 166. – Art. 112201. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112201>.
- Unraveling the dynamics of social governance innovation: A synergistic approach employing NLP and network analysis / Y. Shu, Y. Ma, W. Li, G. Hu, X. Wang, Q. Zhang // Expert Systems with Applications. – 2024. – Vol. 255, Part C. – Art. 124632. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124632>.
- A comparative analysis on using GPT and BERT for automated vulnerability scoring / S. L. Mirtaheri, A. Pugliese, N. Movahed, R. Shahbazian // Intelligent Systems with Applications. – 2025. – Vol. 26. – Art. 200515. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200515>.
- Гуреев, М. В. Модель прогнозирования материальных ресурсов и сметной стоимости на ранних этапах жизненного цикла объектов строительства / М. В. Гуреев, А. Н. Макаров // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 11. – С. 1835–1849.
- Коротеев, Д. Д. Прогнозирование стоимости и продолжительности ремонта зданий в Сирийской Арабской Республике с применением нейронных сетей / Д. Д. Коротеев, Р. Ибрагим // Строительное производство. – 2023. – № 2. – С. 43–46.
- Лапидус, А. А. Искусственные нейронные сети как математический аппарат для расчета комплексного показателя качества организационно-технологических решений при возведении конструктивных элементов многоэтажных железобетонных зданий / А. А. Лапидус, В. А. Муря // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – № 7 (97). – С. 28–34.
- Huang, J. Machine learning-based demand response in PV-based smart home considering energy management in digital twin / J. Huang, D. Koroteev, M. Rynkovskaya // Solar Energy. – 2023. – Vol. 252. – Pp. 8–19. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.044>.
- Actual construction cost prediction using hypergraph deep learning techniques / H. Liu, M. Li, J. C. P. Cheng, C. Anumba, L. Xia // Advanced Engineering Informatics. – 2025. – Vol. 65. – Art. 103187. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103187>.

твёрдует приемлемую точность модели даже при работе с искусственными данными.

Для наглядной иллюстрации результатов прогнозирования на рисунке 2 представлен график зависимости фактических и прогнозируемых трудозатрат для тестовой выборки, включающей 15 проектов. График демонстрирует высокую согласованность между реальными и предсказанными значениями, что дополнительно подчёркивает эффективность модели.

Тестирование показало, что модель способна достоверно объяснять изменчивость данных: коэффициент детерминации ( $R^2$ ) достиг значений 0,952 на обучающей выборке и 0,933 на тестовой. При этом MAE на тестовой выборке составила 182,07 чел.-часа, что свидетельствует о том, что итоговый расчёт трудозатрат по модели может отличаться от фактических данных примерно на 180–200 чел.-часов.

#### Заключение

Проведённое исследование подтвердило значительный потенциал применения нейронных сетей для расчёта трудозатрат при разработке проектной и рабочей документации, в частности комплектов рабочих чертежей раздела КР. Методика основана на системном подходе, количественно-качественном анализе данных и использовании многослойного персептрана для выявления функциональных зависимостей между характеристиками проектов и затратами труда.

Практическая значимость исследования заключается в возможности более точного планирования трудовых ресурсов, сокращения времени на разработку документации и минимизации рисков. Это особенно важно в современных условиях строительного рынка, где соблюдение сроков и оптимизация затрат являются ключевыми факторами успешной реализации проектов. Дальнейшее развитие исследования может включать использование реальных данных для обучения модели, что повысит её точность и расширит область применения.

12. Alizadeh, R. Mathematical models and concepts for blockchain network design in supply chain / R. Alizadeh, M. R. A. Jokar // Computers & Industrial Engineering. – 2025. – Vol. 204. – Art. 111118. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111118>.
13. Liu, X. Leader-follower synchronization of heterogeneous dynamical networks with unknown parameters / X. Liu, H. Zhang // Nonlinear Analysis: Real World Applications. – 2025. – Vol. 85. – Art. 104341. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2025.104341>.

## REFERENCES

- Zhdanova, M. V. Sokrashhenie prodolzhitel'nosti srokov zhiznennogo tsikla stroitel'nogo proekta [Reducing the life cycle of a construction project] / M. V. Zhdanova, A. A. Lapidus // Stroitel'stvo i arkhitektura [Construction and Architecture]. – 2024. – Vol. 12, No. 4 (45). – P. 6.
- Akash Guna, R.T. Interpreting CNN predictions using conditional Generative Adversarial Networks / R. T. Akash Guna, O.K. Sikha, Raul Benitez // Knowledge-Based Systems. – 2024. – Vol. 302. – Art. 112340. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.112340>.
- Big Model Strategy for Bridge Structural Health Monitoring Based on Data-Driven, Adaptive Method and Convolutional Neural Network (CNN) Group / Y. Xu, W. Hong, M. Noori, W. A. Altabey, A. Silik, N. Farhan // SDHM Structural Durability and Health Monitoring. – 2024. – Vol. 18 (6). – Pp. 763–783. – URL: <https://doi.org/10.32604/sdhm.2024.053763>.
- Yu, C. Improving generative adversarial network inversion via fine-tuning GAN encoders / C. Yu, W. Wang, R. Bugiachchi // Applied Soft Computing. – 2024. – Vol. 166. – Art. 112201. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112201>.
- Unraveling the dynamics of social governance innovation: A synergistic approach employing NLP and network analysis / Y. Shu, Y. Ma, W. Li, G. Hu, X. Wang, Q. Zhang // Expert Systems with Applications. – 2024. – Vol. 255, Part C. – Art. 124632. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124632>.
- Mirtaheri, S. L. A comparative analysis on using GPT and BERT for automated vulnerability scoring / S. L. Mirtaheri, A. Pugliese, N. Movahed, R. Shahbazian // Intelligent Systems with Applications. – 2025. – Vol. 26. – Art. 200515. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200515>.
- Gureev, M. V. Model' prognozirovaniya material'nykh resursov i smetnoj stoimosti na rannikh ehtapakh zhiznennogo tsikla ob'ektorov stroitel'stva [Model for forecasting material resources and estimated costs at early stages of the life cycle of construction projects] / M. V. Gureev, A. N. Makarov // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. – 2024. – Vol. 19, No. 11. – Pp. 1835–1849.
- Koroteev, D. D. Prognozirovaniye stoimosti i prodolzhitel'nosti remonta zdaniy v Siriyskoj Arabskoj Respublike s primenieniem nejronnykh setej [Predicting the Cost and Duration of Building Repairs in the Syrian Arab Republic Using Neural Networks] / D. D. Koroteev, R. Ibragim // Stroitel'noe proizvodstvo [Building Production]. – 2023. – No. 2. – Pp. 43–46.
- Lapidus, A. A. Isskustvennye nejronnye seti kak matematicheskij apparat dlya rascheta kompleksnogo pokazatelya kachestva organizatsionno-tehnologicheskikh reshenij pri vozvedenii konstruktivnykh elementov mnogoetazhnykh zhelezobetonnykh zdaniy [Artificial neural networks as a mathematical apparatus for calculating a complex indicator of the quality of organizational and technological solutions in the construction of structural elements of multi-story reinforced concrete buildings] / A. A. Lapidus, V. A. Murya // Nauka i biznes: puti razvitiya [Science and Business: Paths of Development]. – 2019. – No. 7 (97). – Pp. 28–34.
- Huang, J. Machine learning-based demand response in PV-based smart home considering energy management in digital twin / J. Huang, D. Koroteev, M. Rynkovskaya // Solar Energy. – 2023. – Vol. 252. – Pp. 8–19. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.044>.
- Actual construction cost prediction using hypergraph deep learning techniques / H. Liu, M. Li, J. C. P. Cheng, C. Anumba, L. Xia // Advanced Engineering Informatics. – 2025. – Vol. 65. – Art. 103187. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103187>.
- Alizadeh, R. Mathematical models and concepts for blockchain network design in supply chain / R. Alizadeh, M. R. A. Jokar // Computers & Industrial Engineering. – 2025. – Vol. 204. – Art. 111118. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111118>.
- Liu, X. Leader-follower synchronization of heterogeneous dynamical networks with unknown parameters / X. Liu, H. Zhang // Nonlinear Analysis: Real World Applications. – 2025. – Vol. 85. – Art. 104341. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2025.104341>.

УДК 69.059.2:519.237.5

## Анализ сроков разработки проектной документации на конструктивные элементы для проведения работ по капитальному ремонту

Analysis of Design Documentation Development Timelines for Structural Components in Capital Repairs Projects

Кузьмина Татьяна Константиновна

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, kuzmina\_tk@mail.ru

Kuzmina Tatiana Konstantinovna

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, kuzmina\_tk@mail.ru

Бабушкина Диана Дмитриевна

Аспирант, старший преподаватель кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, babushkinadd@mgsu.ru

Babushkina Diana Dmitrievna

Postgraduate student, Senior Lecturer of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, babushkinadd@mgsu.ru

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_132

Федорова Ульяна Алексеевна

Студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, uliana1754@gmail.com

Fedorova Uliana Alekseevna

Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, uliana1754@gmail.com

Касьянов Даниил Сергеевич

Студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, pinktomato2812@gmail.com

Kasyanov Daniil Sergeevich

Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, pinktomato2812@gmail.com

Сухоруков Алексей Евгеньевич

Студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, alexey06112003@gmail.com

Sukhorukov Aleksey Evgenievich

Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, alexey06112003@gmail.com

## Аннотация.

Капитальный ремонт многоквартирных домов требует тщательной подготовки, включая подготовку проектной документации (ПД), сроки разработки которой законодательно не регламентированы, что усложняет планирование ремонтных работ. В статье представлен статистический анализ сроков разработки ПД на основе анализа данных выборки государственных закупок с платформы «Контур.Закупки». Исследование охватывает пять ключевых конструктивов: инженерные системы, крышу, подвальные помещения, фасад и фундамент.

Методология включала четыре этапа: выгрузку данных по 150 контрактам, реализованным в рамках государственных закупок, анализ тендерной документации, структурирование статистики и математическую обработку в Google Colab (Python). Результаты, подкрепленные реальным опытом отрасли, выявили

## Abstract.

Capital repairs of multi-apartment buildings necessitates thorough preparation, including the development of design documentation, the deadlines for which are not legally regulated, thereby complicating the planning of repair works. The article presents a statistical analysis of design documentation development timelines based on the analysis of public procurement data from the «Kontur.Zakupki» platform. The study covers five key structural elements: engineering systems, roof, basement, facade, and foundation.

The methodology comprised four stages: data extraction from 150 contracts, implemented within the framework of public procurement, analysis of tender documentation, statistics structuring, and mathematical processing in Google Colab (Python). The find-

## Введение

Капитальный ремонт многоквартирных домов (МКД) – стратегически значимое направление в строительной сфере, обеспечивающее поддержание надлежащего технического состояния объектов, оптимизацию энергопотребления и существенное увеличение эксплуатационного ресурса сооружений [1].

Проведению работ по капитальному ремонту многоквартирных домов предшествует комплекс подготовительных процедур, которые играют важную роль в успешной реализации ремонтных работ. На данном этапе подготовки формируется перечень необходимых ремонтных работ, определяются их объёмы и сроки выполнения.

ли зависимость сроков проектирования от объёмов работ (площади конструктива [м<sup>2</sup>] или строительного объёма [м<sup>3</sup>]), классифицированных по пороговым значениям категориальных групп. Например, для инженерных систем сроки варьируются от 20 дней (до 1000 м<sup>3</sup>) до 40+ дней (свыше 10 000 м<sup>3</sup>), для фундамента – от 10 до 30 дней в зависимости от объёма.

Исследование подтвердило, что дифференцированный анализ конструктивов повышает точность планирования. Полученные данные могут служить ориентиром для региональных программ капремонта, минимизируя риски нарушения графиков выполнения работ.

**Ключевые слова:** капитальный ремонт; проектная документация; тендер; фасад; фундамент; крыша; подвальные помещения; инженерные системы.

ings, supported by industry experience, revealed a dependency of design timelines on the scope of work (structural area [m<sup>2</sup>] or construction volume [m<sup>3</sup>]), classified by threshold values of categorical groups. For instance, for engineering systems, the timelines range from 20 days (up to 1000 m<sup>3</sup>) to 40+ days (over 10,000 m<sup>3</sup>), while for the foundation, they range from 10 to 30 days depending on the volume.

The study confirmed that differentiated analysis of structural elements enhances planning accuracy. The obtained data can serve as a reference for regional overhaul programs, minimizing the risks of work schedule disruptions.

**Keywords:** capital repairs; design documentation; tender; facade; foundation; roof; basements; engineering systems.

Особенностями подготовки к проведению работ по капитальному ремонту являются такие процедуры [2], как обследование объекта, разработка проектной документации (ПД) и организация тендерных процедур для выбора подрядных организаций [3]. Однако, если тендерные процедуры регулируются нормативно-правовыми актами [4], то процедуры по разработке проектной документации и обследованию здания остаются ненормированными [5]. Из-за этого возникают сложности в планировании и оценке сроков, что может негативно сказаться на реализации ремонтных работ в части соответствия установленным в региональных программах срокам проведения капитального ремонта.

В связи с отсутствием регламентирующих документов, устанавливающих сроки выполнения отдельных процедур по подготовке капитального ремонта МКД, предлагается рассмотреть опыт отрасли на примере процедуры по разработке ПД на предмет установки существующих сроков выполнения подготовительных процедур. Предполагается, что изучение выполненных договоров, реализованных в рамках завершённых государственных закупок (тендерная документация), позволит установить среднее значение сроков разработки проектной документации.

Для получения информации по выполненным договорам завершённых государственных закупок применялась выгрузка из системы мониторинга и поиска по электронным торговым площадкам «Контур.Закупки» (<https://zakupki.kontur.ru>) [6]. «Контур.Закупки» – специализированный электронный ресурс, на котором размещают сведения о закупках товаров, работ и услуг. Он позволяет получить доступ к информации о заключённых контрактах, включая сроки выполнения работ.

Целью статьи является ориентировочный статистический анализ сроков выполнения процедуры по разработке проектной документации на проведение работ по капитальному ремонту многоквартирных домов.

#### Материалы и методы

В ходе исследования разработан алгоритм анализа сроков выполнения процедуры разработки ПД, который включает в себя 4 этапа:

1. Выгрузка исходных данных из «Контур.Закупки». Сбор информации о закупках, соответствующих заданным критериям.

1.1. Ключевые слова: использован запрос «разработка проектной документации» для поиска контрактов, связанных с разработкой ПД, а также наименования конструктивов – «инженерные системы», «крыша», «подвальные помещения», «фасад», «фундамент».

1.2. Тип торгов: отбор осуществлялся по Постановлению Правительства Российской Федерации № 615 (615 ПП РФ) [3], которое соответствует отбору работ по капитальному ремонту, и по Федеральному закону № 44-ФЗ (44-ФЗ) [4], который позволяет определить государственные и муниципальные закупки [7].

1.3. Этап закупок: рассматривались исключительно завершённые закупки, чтобы обеспечить достоверность данных.

1.4. В качестве дополнительного фильтра в разделе «Отрасль» были выбраны «Ремонтные работы (внутренний и внешний ремонт, капитальный ремонт)» из «Строительства».

2. Анализ тендерной документации: изучение технического задания [8] и завершённых государственных закупок.

3. Сбор статистических данных: структурирование полученных данных по продолжительности процедуры.

Процесс сбора статистических данных включает в себя систематизацию информации о сроках разработки ПД. Полученные данные группировались в таблицу, где для каждого контракта фиксировались следующие значения: объём работ в единицах измерения, соответствующих определённому конструктиву, и сроки выполнения работ.

Для обеспечения достоверности и обоснованности результатов исследования минимальный объём договоров, подлежащих анализу, должен составлять не менее 30. Данное требование основано на принципах математической статистики.

#### 4. Математическая обработка данных.

После структурирования и систематизации данных проводится их математическая обработка с целью выявления фактического срока разработки ПД. С помощью интегрированной среды разработки баз данных Google Colab [9] на основе высококодированного языка программирования Python происходит анализ числовых данных на выбросы и отклонения, их систематизация и построение наглядных схем числовых распределений.

Созданный программный код – алгоритм обработки данных – осуществляет комплексный статистический анализ и визуализацию данных о зависимости сроков разработки проектной документации при капитальном ремонте. Процесс обработки включает загрузку CSV-файла с разделителем «;» и преобразование числовых значений объёма работ ( $\text{м}^3$ ) и сроков проектирования (рабочие дни) в корректный формат.

Статистический анализ охватывает расчёт базовых характеристик распределения (среднее значение, стандартное отклонение, минимум, максимум, квартили), а также выявление аномалий двумя методами: Z-оценкой с порогом 3 и межквартильным размахом с порогом 1.5 [10]. Визуализация данных представлена точечной диаграммой (диаграммой рассеяния) [11].

Основное назначение программы заключается в выявлении закономерностей между объёмом строительных работ и сроками разработки проектной документации, обнаружении аномалий в данных.

#### Результаты

В ходе исследования было принято решение осуществлять выгрузку данных 150 контрактов на разработку ПД на капитальный ремонт конкретных конструктивов (по 30 договоров на каждый конструктив, что подтверждает репрезентативность выборки), определённых законодательством РФ [12]:

- 1) ремонт внутридомовых инженерных систем электро-, тепло-, газо-, водоснабжения, водоотведения;
- 2) ремонт крыши;
- 3) ремонт подвальных помещений, относящихся к общему имуществу в многоквартирном доме;
- 4) ремонт фасада;
- 5) ремонт фундамента многоквартирного дома.

Методология исследования требовала детального анализа, включая сравнение сроков проектирования ПД на единицу площади ремонтируемого конструктива ( $\text{м}^2$ ) или строительного объёма всего здания ( $\text{м}^3$ ) для различных конструкций. Агрегация данных в категорию «капитальный ремонт МКД» в целом сделала бы невозможным выявление указанных закономерностей.

Влияние на процесс проектирования также оказывают различная нормативная база и требования, применяемые к каждому виду конструктивов. Для фундамента действуют положения СП 50-101-2004 [13], для крыши – СП 17.13330.2017 [14], а проектирование инженерных систем осуществляется в соответствии с СП 30.13330.2016 [15]. Сбор данных по всем видам работ мог бы привести к статистическим погрешностям из-за

Зависимость срока разработки ПД для капитального ремонта внутридомовых инженерных систем электро-, тепло-, водоснабжения и водоотведения от строительного объёма

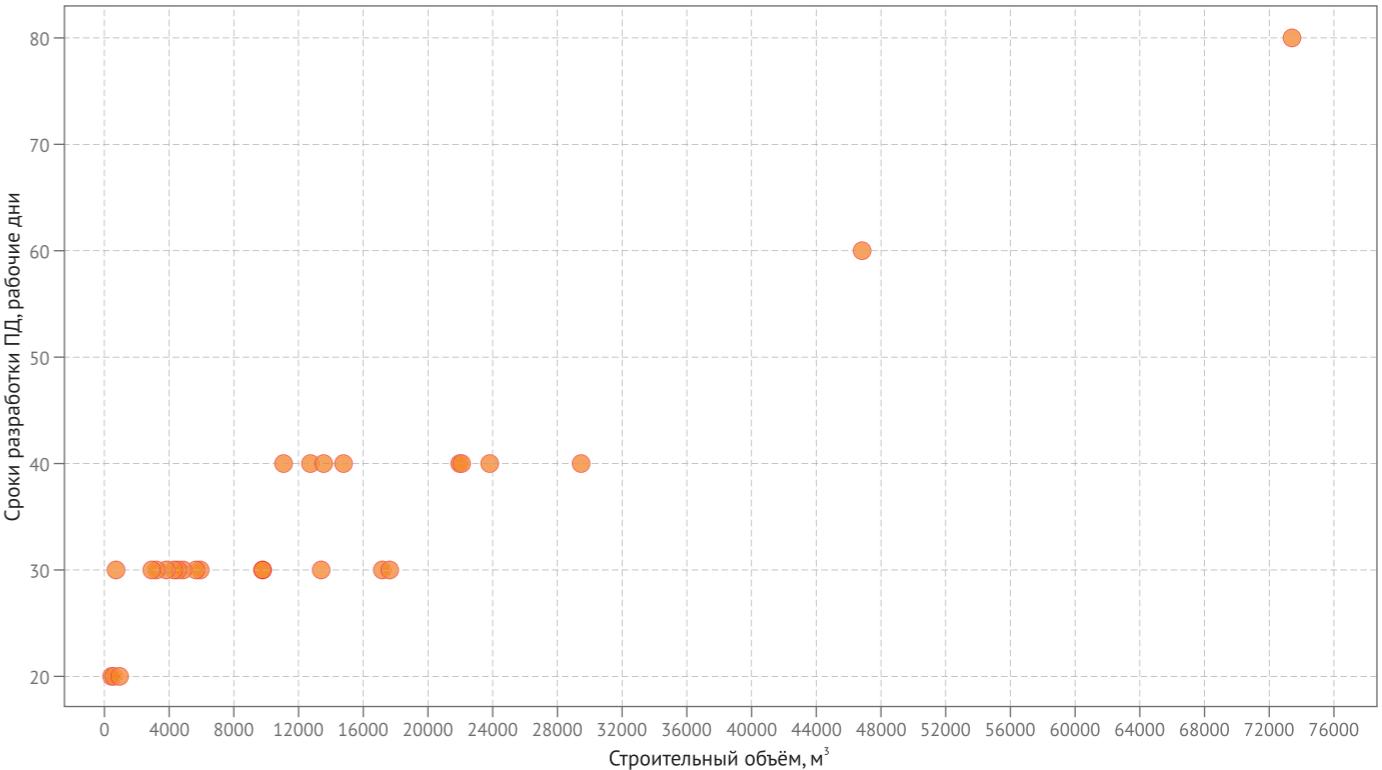


Рис. 1. Зависимость срока разработки ПД для капитального ремонта внутридомовых инженерных систем электро-, тепло-, водоснабжения и водоотведения от строительного объема

Fig. 1. Dependence of the development period of the design documentation for capital repairs of in-house engineering systems of electricity, heat, water supply, and sewerage on the construction volume

непоследовательности требований различных нормативных документов.

Таким образом, раздельная выгрузка данных обеспечила необходимую точность, сопоставимость и практическую ценность проведённого исследования.

Структурированные результаты анализа данных контрактов:

#### 1. Капитальный ремонт внутридомовых инженерных систем электро-, тепло-, газо-, водоснабжения, водоотведения

Единицей измерения объёма работ по капитальному ремонту инженерных сетей в тендерной документации чаще всего выступает строительный объём здания ( $\text{м}^3$ ).

По результатам анализа полученных числовых данных срок разработки ПД на капитальный ремонт данного конструктива можно разделить на 3 категории, в зависимости от строительного объёма ремонтируемого здания:

- 1) до 1000  $\text{м}^3$  – средний срок проектирования составляет 20 дней;
- 2) до 10 000  $\text{м}^3$  – средний срок проектирования составляет 30 дней;
- 3) свыше 10 000  $\text{м}^3$  – средний срок проектирования составляет 40 дней и выше для зданий с сильно большим объёмом (60–80 дней). Также на срок проектирования влияет наличие требований энергоэффективности [16].

Графическую зависимость числовых данных можно наблюдать на рисунке 1.

#### 2. Капитальный ремонт крыши

Единицей измерения этого конструктива в тендерной документации выступает площадь кровли МКД ( $\text{м}^2$ ).

Срок разработки ПД на капитальный ремонт крыши можно разделить на 2 категории, в зависимости от площади кровли, которой требуется ремонт:

- 1) до 1000  $\text{м}^2$  – средний срок проектирования составляет 20 дней;
- 2) свыше 1000  $\text{м}^2$  – средний срок проектирования составляет 30 дней, а в случаях капитального ремонта объектов культурного наследия [17] – до 45 дней.

Графические результаты обработки данных представлены на рисунке 2.

#### 3. Капитальный ремонт подвальных помещений, относящихся к общему имуществу в многоквартирном доме

В спецификациях к тендерной документации параметры подвальных помещений выражаются в  $\text{м}^2$  площади подвала ремонтируемого здания.

Срок разработки ПД на капитальный ремонт подвальных помещений можно разделить на 2 категории, в зависимости от площади конструктива:

- 1) до 1000  $\text{м}^2$  – средний срок проектирования составляет 20 дней;
- 2) свыше 1000  $\text{м}^2$  – средний срок проектирования составляет 30 дней.

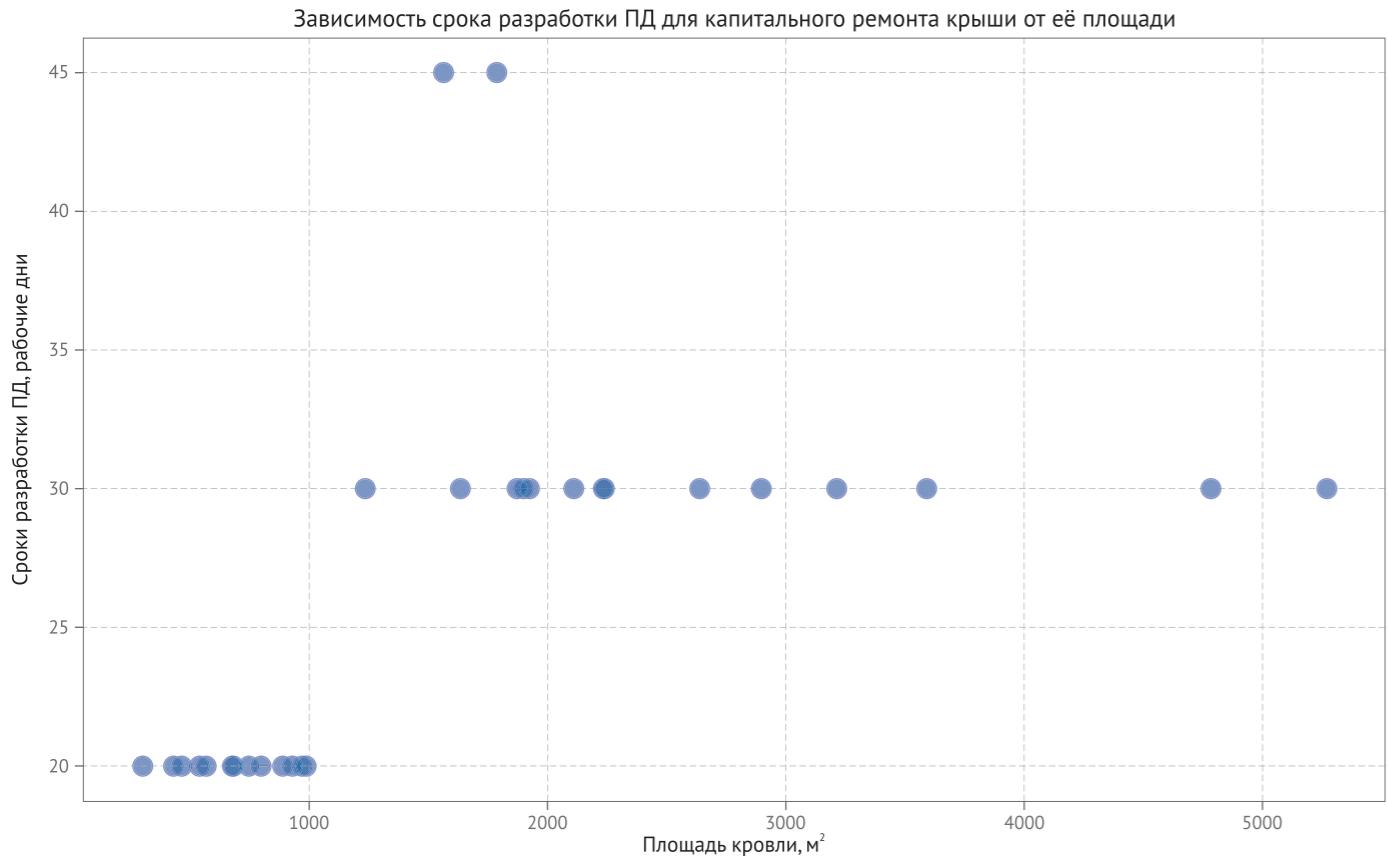
Визуализация результатов анализа данных отображена на рисунке 3.

#### 4. Капитальный ремонт фасада

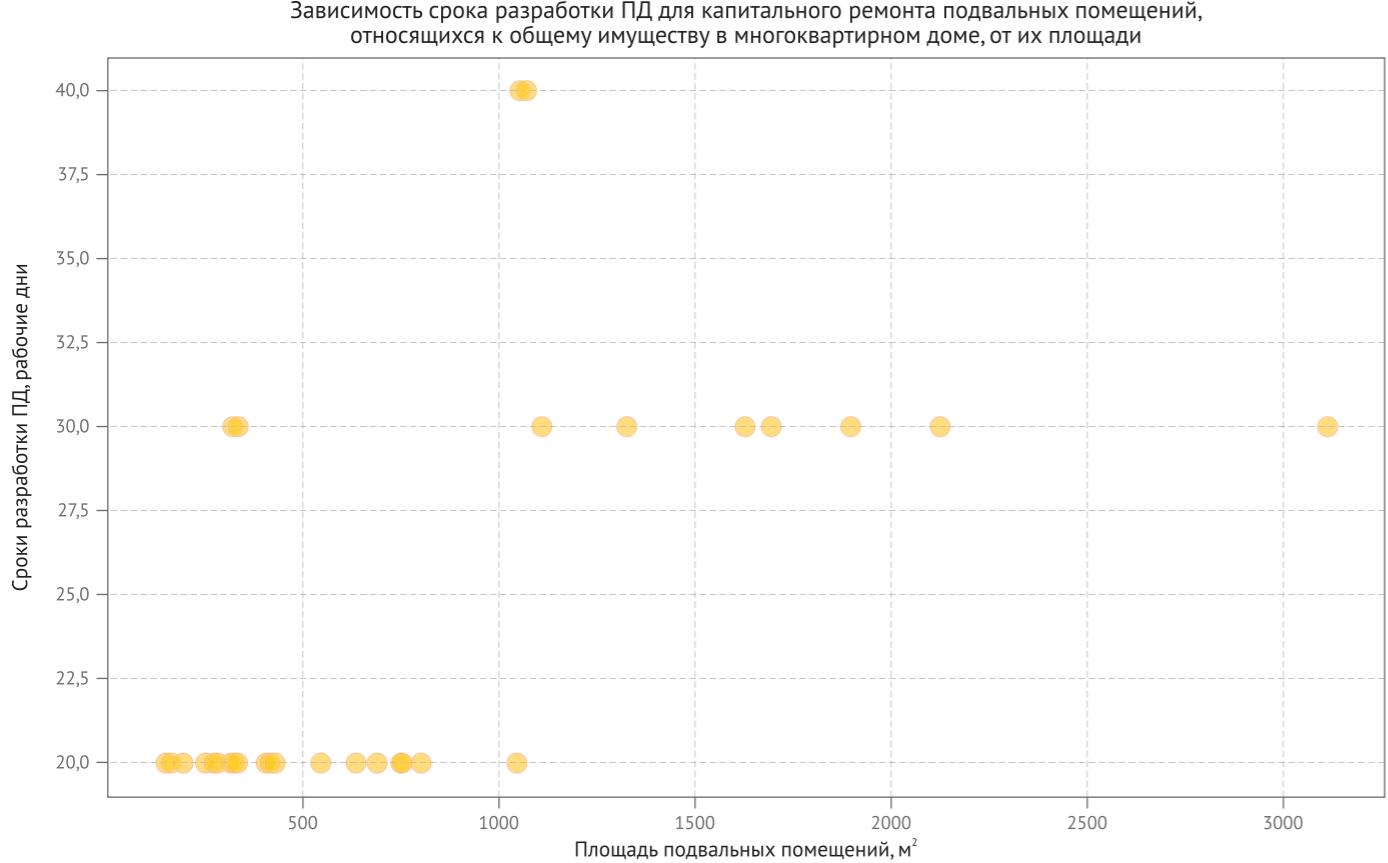
В тендерной документации площадь фасада в  $\text{м}^2$  используется в качестве единицы измерения при описании конструктивных элементов, подлежащих капремонту.

Срок разработки ПД можно разделить на 2 категории, в зависимости от площади ремонтируемого конструктива:

- 1) до 1000  $\text{м}^2$  – средний срок проектирования составляет 20 дней;



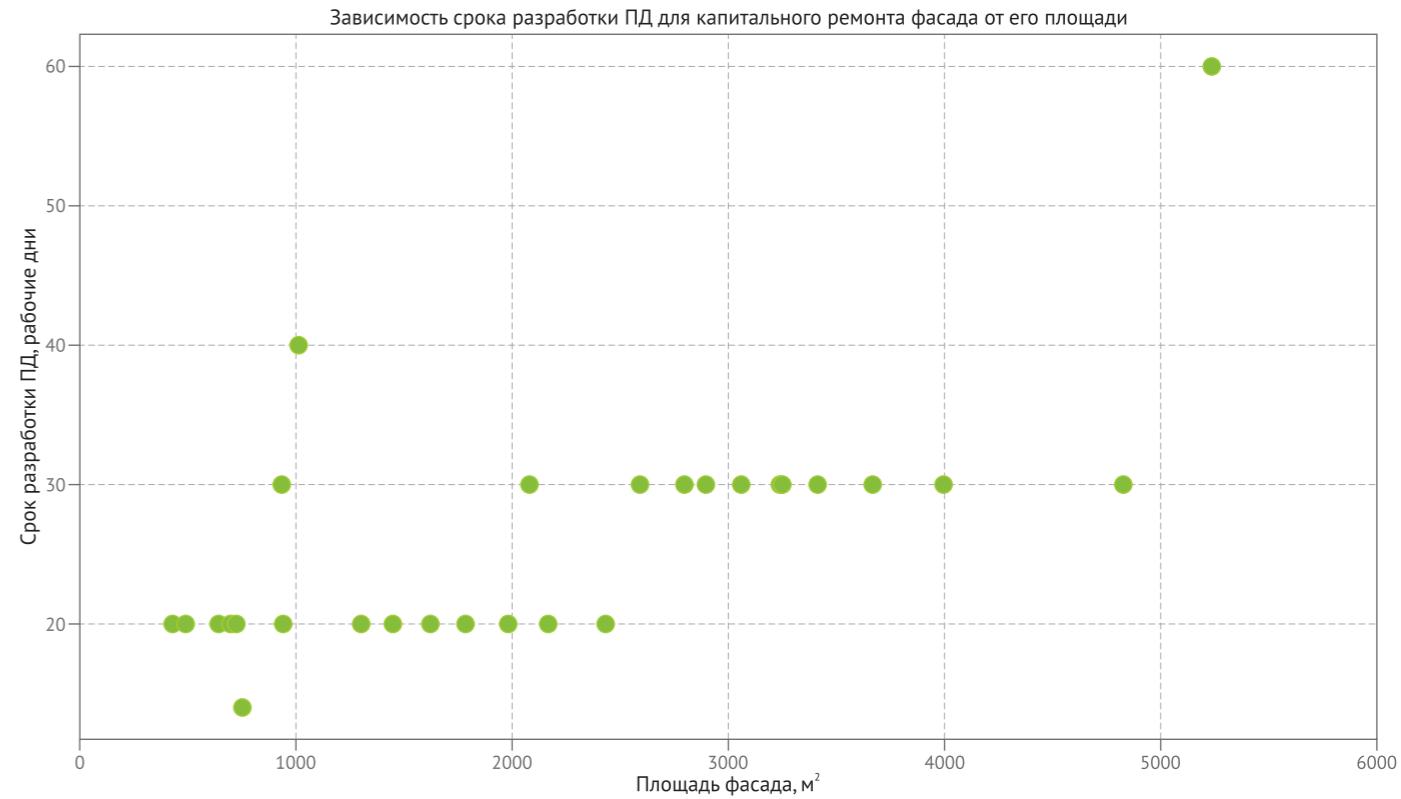
**Рис. 2. Зависимость срока разработки ПД для кремонта крыши от её площади**  
**Fig. 2. Dependence of the development period of the design documentation for capital repairs of the roof on its area**



**Рис. 3. Зависимость срока разработки ПД для кремонта подвальных помещений, относящихся к общему имуществу в многоквартирном доме, от их площади**  
**Fig. 3. Dependence of the development period of the design documentation for capital repairs of basements related to common property in an apartment building on its area**

2) свыше 1000 м<sup>2</sup> – средний срок проектирования составляет 30 дней, однако иногда, в зависимости от

специфических условий проектирования или специального ТЗ, он может отличаться.



**Рис. 4. Зависимость срока разработки ПД для кремонта фасада от его площади**  
**Fig. 4. Dependence of the development period of the design documentation for capital repairs of the facade on its area**

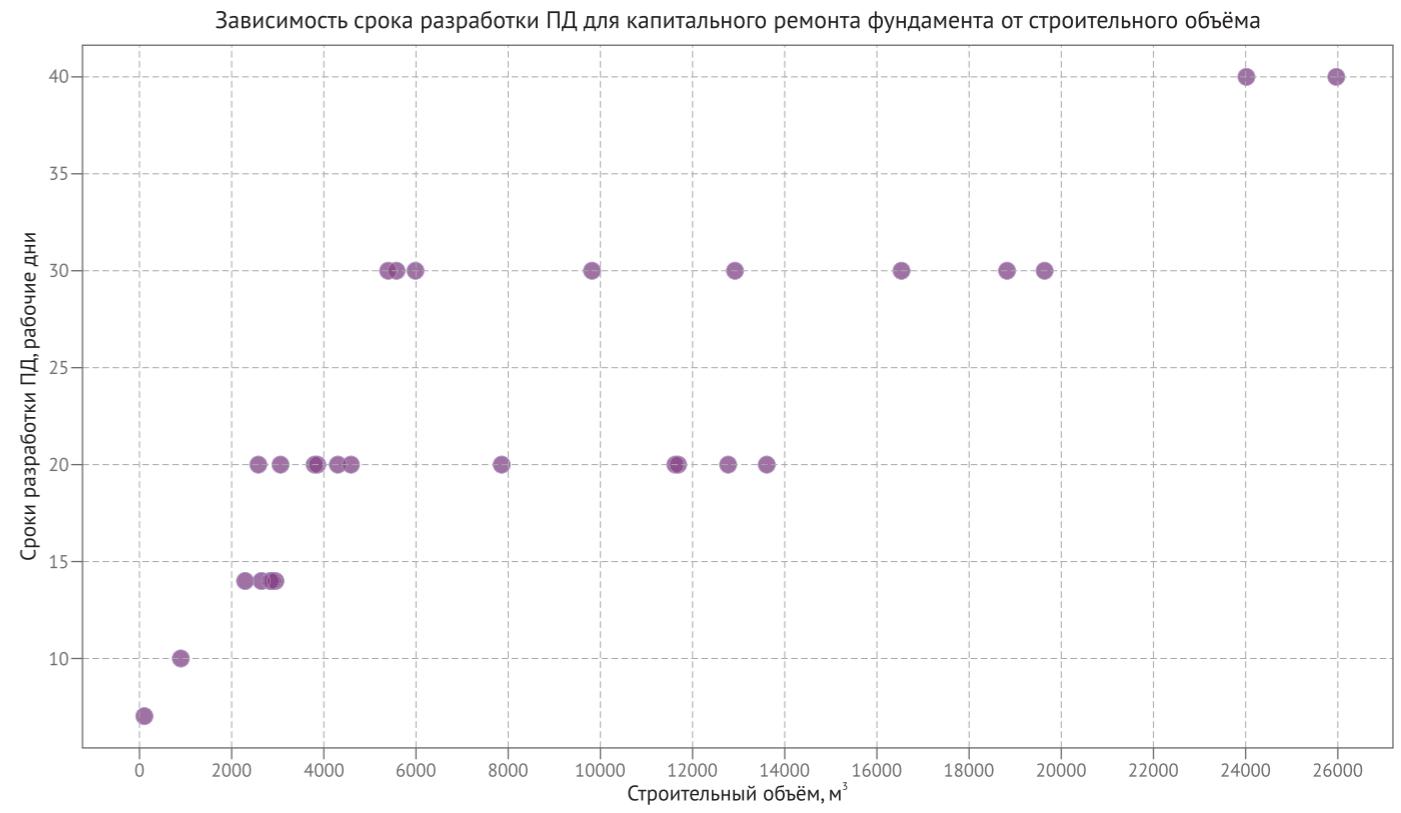
Графическая интерпретация полученных данных представлена на рисунке 4.

##### 5. Капитальный ремонт фундамента МКД

Характеристики конструкций в конкурсной документации зачастую приводятся в единицах строительного объёма (м<sup>3</sup>) всего объекта.

Срок разработки ПД можно разделить на 2 категории, в зависимости от площади ремонтируемого конструктива:

- 1) до 1000 м<sup>3</sup> – средний срок проектирования составляет до 10 дней;
- 2) до 10 000 м<sup>3</sup> – средний срок проектирования составляет 14–20 дней;



**Рис. 5. Зависимость срока разработки ПД для кремонта фундамента от строительного объёма**  
**Fig. 5. Dependence of the development period of the design documentation for capital repairs of the foundation on the construction volume**

Конструктивный элемент	Единица измерения	Объём работ	Средний срок разработки ПД (раб. дней)
Инженерные системы	м <sup>3</sup> здания	< 1 000	20
		1 000–10 000	30
		> 10 000	40 и выше (до 80)
Кровля	м <sup>2</sup> площади	< 1 000	20
		≥ 1 000	30 и выше (до 45)
Подвальные помещения	м <sup>2</sup> площади	< 1 000	20
		≥ 1 000	30
Фасад	м <sup>2</sup> площади	< 1 000	20
		≥ 1 000	30 и выше
Фундамент	м <sup>3</sup> здания	< 1 000	10
		1 000–10 000	14–20
		> 10 000	20–30 и выше

Табл. 1. Корреляция между сроками разработки ПД для капитального ремонта и объёмом работ

Tab. 1. Correlation between the development period of the design documentation for capital repairs and the volume of work

3) свыше 10 000 м<sup>3</sup> – средний срок проектирования составляет 20–30 дней и более при значительном увеличении объёмов проектирования.

Иллюстрация результатов обработки информации показана на рисунке 5.

Проведённый анализ государственных и муниципальных контрактов позволил систематизировать полученные данные о сроках разработки проектной документации для различных конструктивных элементов многоквартирных домов. В таблице 1 представлены сводные усреднённые значения срока выполнения проектных работ в зависимости от объёмно-планировочных характеристик объектов.

Полученные результаты подтверждают первоначальную гипотезу о существовании зависимости между объёмами работ по пороговым значениям (1000 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>, 10000 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>) и сроками разработки проектной документации для различных конструктивных элементов при капитальном ремонте МКД. Установленные нормативные сроки (в среднем 20–40 дней в зависимости от объёма) согласуются с отраслевой практикой, как в России, так и в мире [18; 19], что свидетельствует о репрезентативности выборки.

Однако следует отметить, что эта зависимость не носит строго линейного характера ввиду существования ряда факторов, увеличивающих срок проектирования при сохранении объёма [20], – это, в первую очередь, сложные конструктивы (фундамент, инженерные системы), имеющие необходимость в дополнительных изысканиях [21], а также специфические условия проектирования, например капитальный ремонт объектов культурного наследия.

Разработанная методика в целом обладает значительным потенциалом практического применения в сфере капитального ремонта многоквартирных домов. В част-

ности, она может быть эффективно использована для оптимизации сроков реализации региональных программ капитального ремонта, что позволит повысить эффективность расходования бюджетных средств и улучшить качество предоставляемых жилищно-коммунальных услуг.

### Заключение

В результате проведённого исследования были изучены особенности подготовки к капитальному ремонту, включая процедуру по разработке проектной документации. На основе анализа данных платформы госзакупок «Контур.Закупки» разработан универсальный алгоритм анализа сроков разработки ПД, включающий выгрузку данных, анализ контрактов, структурирование информации и статистическую обработку, который позволяет получать объективные показатели продолжительности подготовительных работ.

Полученные результаты обладают значительной практической ценностью для различных участников процесса капитального ремонта. Для региональных операторов капитального ремонта методика позволяет осуществлять более точное планирование сроков реализации программ. Проектные организации получают инструмент для обоснования сроков выполнения работ, а органы государственного управления – основу для разработки нормативных документов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований могут стать учёт региональных особенностей при нормировании сроков, что позволит адаптировать методику под специфику различных субъектов РФ; разработка отраслевых стандартов для разных типов многоквартирных домов; автоматизация процесса оценки сроков проектирования, что существенно повысит эффективность планирования ремонтных работ.

зания услуг и (или) выполнения работ по капитальному ремонту общего имущества в многоквартирном доме, порядке осуществления закупок товаров, работ, услуг в целях выполнения функций специализированной некоммерческой организации, осуществляющей деятельность, направленную на обеспечение проведения капитального ремонта общего имущества в многоквартирных домах... : постановление Правительства Российской Федерации № 615 от 1 июля 2016 г.: принят Государственной Думой 21 июня 2016 года : одобрен Советом Федерации 28 июня 2016 года. – Москва, 2016.

2. Моделирование в BPMN и расчёт продолжительности подготовительных процедур для проведения капитального ремонта МКД / Т. К. Кузмина, Д. Д. Бабушкина, В. Ю. Тихомирова, А. И. Валяев, А. Е. Сухоруков. – DOI 10.54950/26585340\_2024\_4\_119 // Строительное производство. – 2024. – № 4. – С. 119–125.

3. О порядке привлечения подрядных организаций для ока-

ной Думой 22 марта 2013 года : одобрен Советом Федерации 27 марта 2013 года. – Официальный интернет-портал правовой информации ([www.pravo.gov.ru](http://www.pravo.gov.ru)). – 8.04.2013. – Ст. 0001201304080023.

5. Анализ основных проблем планирования программ капитального ремонта / А. Ю. Кагазежев, Р. С. Фатулаев, А. О. Хубаев, Я. В. Шестерикова // Перспективы науки. – 2022. – № 12 (159). – С. 81–86.
6. Система мониторинга и поиска по электронным торговым площадкам «Контур.Закупки» / Контур.Закупки : [интернет-ресурс]. – URL: <https://zakupki.kontur.ru> (дата обращения: 11.04.2025).
7. Купчикова, Н. В. Строительные тендера и особенности их проведения / Н. В. Купчикова, Д. И. Гужвинский. – DOI 10.24411/2409-3203-2018-11650 // Эпоха науки. – 2018. – № 16. – С. 182–186.
8. Об утверждении Формы задания застройщика или технического заказчика на проектирование объекта капитального строительства, строительство, реконструкция, капитальный ремонт которого осуществляются с привлечением средств бюджетной системы Российской Федерации : Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 21.04.2022 № 307/пр / Зарегистрирован Минюстом России 8 июня 2022 г., регистрационный № 68783. – Официальный интернет-портал правовой информации ([www.pravo.gov.ru](http://www.pravo.gov.ru)). – 8.06.2022. – Ст. 0001202206080003.
9. Google Colab: онлайн-сервис для разработки и обучения моделей машинного обучения / Google Colab : [интернет-ресурс]. – URL: <https://colab.research.google.com> (дата обращения: 25.04.2025).
10. McKinney, W. Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython / W. McKinney. – 2nd ed. – USA, CA, Sebastopol : O'Reilly Media, 2017. – 547 p.
11. VanderPlas, J. Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data / J. VanderPlas. – USA, CA, Sebastopol : O'Reilly Media, 2016. – 541 p.
12. Жилищный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон № 188-ФЗ от 29.12.2004 : принят Государственной Думой 22 декабря 2004 года : одобрен Советом Федерации 24 декабря 2004 года. – Собрание законодательства Российской Федерации от 2005 г. – № 1. – Ст. 14 (Часть I).
13. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений : Свод правил СП 50-101-2004 : утвержден Приказом Минрегиона России от 20.05.2004

### REFERENCES

1. Ильина, Е. В. Нормативно-методическое регулирование и научные методы управления капитальным ремонтом общего имущества в многоквартирных жилых домах / Е. В. Ильина, В. Д. Горелова, Д. Н. Морозова // Экономика строительства и жилищно-коммунального хозяйства. – 2024. – № 3 (8). – С. 40–52.
2. Modelirovaniye v BPMN i raschet prodolzhitelnosti podgotovitel'nykh protsedur dlya provedeniya kapital'nogo remonta MKD [Modeling in BPMN and calculation of the duration of preparatory procedures for capital repairs of apartment buildings] / T. K. Kuzmina, D. D. Babushkina, V. Yu. Tikhomirova, A. I. Valyaev, A. E. Sukhorukov. – DOI 10.54950/26585340\_2024\_4\_119 // Stroitel'noe proizvodstvo [Construction Production]. – 2024. – № 4. – Pp. 119–125.
3. O poryadke privlecheniya podryadnykh organizatsij dlya okazaniya uslug i (ili) vypolneniya rabot po kapital'nому remontu obshchego imushchestva v mnogokvartirnom dome : ob ob'ektakh kul'turnogo naslediya (pamyatnikakh istorii i kul'tury) narodov Rossijskoj Federatsii : [On the procedure for attracting contractors for capital repairs of common property
4. O kontraktnej sisteme v sfere zakupok tovarov, rabot, uslug dlya obespecheniya gosudarstvennykh i munitsipal'nykh nuzhd [On the contract system in procurement of goods, works and services for state and municipal needs] : Federal'nyj zakon № 44-FZ [Federal Law No. 44-FZ]. – Ofitsial'nyj internet-portal pravovoj informatsii ([www.pravo.gov.ru](http://www.pravo.gov.ru)). – 8.04.2013. – Art. 0001201304080023.
5. Analiz osnovnykh problem planirovaniya programm kapital'nogo remonta [The analysis of the main problems in planning of overhaul programs] / A. Yu. Kagazezhev, R. S. Fatullaev, A. O. Khubaev, Ya. V. Shesterikova // Perspektivy nauki [Science Prospects]. – 2022. – № 12 (159). – Pp. 81–86.
6. Sistema monitoringa i poiska po elektronnym torgovym ploschadкам «Kontur.Zakupki» [Kontur.Zakupki electronic procurement monitoring system] / Kontur.Zakupki [online resource]. – URL: <https://zakupki.kontur.ru> (accessed:

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильина, Е. В. Нормативно-методическое регулирование и научные методы управления капитальным ремонтом общего имущества в многоквартирных жилых домах / Е. В. Ильина, В. Д. Горелова, Д. Н. Морозова // Экономика строительства и жилищно-коммунального хозяйства. – 2024. – № 3 (8). – С. 40–52.
2. Моделирование в BPMN и расчёт продолжительности подготовительных процедур для проведения капитального ремонта МКД / Т. К. Кузмина, Д. Д. Бабушкина, В. Ю. Тихомирова, А. И. Валяев, А. Е. Сухоруков. – DOI 10.54950/26585340\_2024\_4\_119 // Строительное производство. – 2024. – № 4. – С. 119–125.
3. О порядке привлечения подрядных организаций для ока-

- 11.04.2025).
7. Kupchikova, N. V. Stroitel'nye tendery i osobennosti ikh pro-vedeniya [Construction tenders and features of their im-plementation] / N. V. Kupchikova, D. I. Guzhvinsky. – DOI 10.24411/2409-3203-2018-11650 // Ehopka nauki [The age of science]. – No. 16. – Pp. 182–186.
  8. Ob utverzhdenii Formy zadaniya zastroishhika ili tekhnicheskogo zakazchika na proektirovaniye ob'ekta kapital'nogo stroitel'stva, stroitel'stvo, rekonstruksiya, kapital'nyj remont kotorogo osushhestvlyayutsya s privlecheniem sredstv byudzhetnoj sistemy Rossijskoj Federatsii [On approval of the Customer's design brief form for capital construction projects using budget funds] : Prikaz Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyajstva Rossijskoj Federatsii ot 21.04.2022 № 307/pr [Order of the Ministry of Construction No. 307/pr of April 21, 2022] / Zaregistrovaniy Minyustom Rossii 8 iyunya 2022 g., registratsionnyj № 68783 [Registered by the Ministry of Justice of Russia on June 8, 2022, registration number 68783]. – Ofitsial'nyj internet-portal pravovoj informatsii [The official Internet portal of legal information] ([www.pravo.gov.ru](http://www.pravo.gov.ru)). – 06/8/2022. – Art. 0001202206080003.
  9. Google Colab: onlain-servis dlya razrabotki i obucheniya modelej mashinnogo obucheniya [Google Colab: online service for machine learning development] // Google Colab : [online re-source]. – URL: <https://colab.research.google.com> (accessed: 25.04.2025).
  10. McKinney, W. Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython / W. McKinney. – 2nd ed. – USA, CA, Sebastopol : O'Reilly Media, 2017. – 547 p.
  11. VanderPlas, J. Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data / J. VanderPlas. – USA, CA, Sebastopol : O'Reilly Media, 2016. – 541 p.
  12. Zhilishchnyj kodeks Rossijskoj Federatsii [Housing Code of the Russian Federation] : Federal'nyj zakon № 188-FZ ot 29.12.2004 [Federal Law No. 188-FZ of December 29, 2004]. – Sobranie zakonodatel'stva Rossijskoj Federatsii ot 2005 g. [Collection of Legislation of the Russian Federation of 2005]. – No. 1. – Art. 14 (Part I).
  13. Proektirovaniye i ustrojstvo osnovaniy i fundamentov zdanij i sooruzhenij [Design and construction of building foundations] : Svod pravil SP 50-101-2004 [Code of Practice SP 50-101-2004]. – Moscow : Standartinform, 2017. – 56 p.
  14. Krovli. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-26-76 [Roofs. Up-dated version of SNiP II-26-76] : Svod pravil SP 17.13330.2017 [Code of Practice SP 17.13330.2017]. – Moscow : Standartinform, 2017. – 56 p.
  15. Vnutrennij vodoprovod i kanalizatsiya zdanij [Internal wa-ter supply and sewerage of buildings] : Svod pravil SP 30.13330.2016 [Code of Practice SP 30.13330.2016]. – Moscow : The Ministry of Construction of Russia, 2016. – 114 p.
  16. International Energy Agency (IEA). Renovation trackers: Policy frameworks for building energy renovation / IEA Publica-tions. – Paris, 2021. – 78 p. – (Energy Efficiency Series).
  17. Ob ob'ektakh kul'turnogo naslediya (pamyatnikakh istorii i kul'tury) narodov Rossijskoj Federatsii [About objects of cul-tural heritage (historical and cultural monuments) of the peo-ples of the Russian Federation] : Federal'nyj zakon № 73-FZ ot 25.06.2002 [Federal Law No. 73-FZ of June 25, 2002]. – So-branie zakonodatel'stva Rossijskoj Federatsii ot 2002 g. [Collection of Legislation of the Russian Federation of 2002]. – No. 26, Article 2519.
  18. Energy-efficient renovation in EU residential buildings : Analytical report / European Construction Sector Observatory. – 2022. – URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/48882> (accessed: 05.05.2025).
  19. A systematic review of contemporary safety management research: A multi-level approach to identifying trending do-mains in the construction industry / M. T. Newaz, M. Ershadi, M. Jefferies, M. Pillay, P. Davis. – DOI 10.1080/01446193.202 2.2124527 // Construction Management and Economics. – 2023. – Vol. 41, Iss. 2. – P. 97–115.
  20. Disputes and claim management during the COVID-19 crisis: The lessons learned / A. Olanrewaju, P. J. Anavhe, H. C. Chu. – DOI 10.1061/JLADAH.LADR-843 // Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction. – 2023. – Vol. 15, No. 1. – Art. LADR-843.
  21. UNEP. Guidelines for Energy-Efficient Retrofitting of Residential Buildings [Electronic resource] : United Nations Environ-ment Programme / United Nations Environment. – Nairobi, 2020. – URL: <https://www.unep.org/resources/report/guide-lines-energy-efficient-retrofitting> (accessed: 06.05.2025).

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_140

## Комплексная оценка организационно-технологических решений при использовании модульных и классических навесных фасадных систем

Comprehensive Assessment of Organizational and Technological Solutions When Using Modular and Classic Hinged Facade Systems

### Сабитов Линар Салихзанович

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, [SabitovLS@mgsu.ru](mailto:SabitovLS@mgsu.ru)

### Sabitov Linar Salihzanovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, [SabitovLS@mgsu.ru](mailto:SabitovLS@mgsu.ru)

### Волков Михаил Юрьевич

Аспирант кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, [m.volkov@diat.ru](mailto:m.volkov@diat.ru)

### Volkov Mikhail Yurievich

Postgraduate student of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, [m.volkov@diat.ru](mailto:m.volkov@diat.ru)

### Аннотация.

В данной статье проводится детальный сравнительный анализ между классическими и модульными стальными на-весными фасадными системами. Целью исследования является выполнение комплексной оценки организационно-технологических решений при использовании модульных и классических на-весных фасадных систем при строительстве современных многоквартирных жилых зданий с использованием НФС. Автор статьи обосновывает значимость и важность правильного выбора конкретного типа фасадной системы, что может сущес-tвенно способствовать снижению затрат, а также оптимизации сроков выполнения как проектных, так и монтажных работ. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению общих затрат на строительство и повышению общей эффективности строи-

### Abstract.

This article provides a detailed comparative analysis between classical and modular steel hinged facade systems. The purpose of the study is to determine the optimal technology for performing facade work in the construction of modern multi-apartment residential buildings using NFS. The author of the article substantiates the importance and importance of choosing the right type of facade system, which can significantly help reduce costs, as well as optimize the timing of both design and installation work. This, in turn, leads to a reduction in total construction costs and an increase in the overall efficiency of the construction process. The methodological approach includes a systematic analysis of the three key stages of facade construction. The study includes

### Введение

В современных условиях строительства стальные на-весные фасадные системы (далее НФС) стали важным элементом для жилых и коммерческих зданий. Благодаря созданию фасадной системы возможно реализовать множество архитектурных элементов, обеспечить не только эстетическую привлекательность, но и функциональность, включая теплоизоляцию, звукоизоляцию и защиту от неблагоприятных погодных условий [1]. Ввиду сниже-nия темпов развития гражданского строительства, выбор наиболее эффективной фасадной системы становится ключевым фактором для достижения высоких эксплуатационных характеристик и снижения затрат на производство работ.

Среди множества технологий, используемых для соз-дания НФС, особое внимание привлекают модульные системы. Модульные фасады представляют собой пред-варительно собранные элементы, которые монтируются на строительной площадке, что позволяет значительно сократить время выполнения работ и повысить мобильность процессов [2]. Однако, несмотря на явные преиму-щества, такие как сокращение сроков монтажа и улучшение качества сборки, использование модульных НФС может быть сопряжено с увеличением затрат на проекти-рование и производство, особенно в случае архитектурно уникальных объектов.

За последние годы нормативная база по на-весным фасадным системам стала более обширной: в 2023 году был издан СП 522.1325800.2023 «Системы фасадные на-весные вентилируемые. Правила проектирования, про-изводства работ и эксплуатации», который описывает общие требования к прочностным расчётом НФС. Также в настоещее время существует значительное количество исследований, посвящённых контролю качества и эксплуатационным характеристикам фасадов [3; 4]. Однако количество исследований, связанных с оценкой сроков и стоимости выполнения различных видов на-весных фа-

тельного процесса. Методологический подход включает много-критериальный анализ ключевых этапов фасадов. Исследование включает в себя оценку сроков и стоимости проектирования, производства и монтажа на примере конкретного жилого здания, что позволяет более точно проанализировать все аспекты. В дополнение к этому, рассматриваются два раз-личных вида модульных на-весных фасадных систем, которые имеют свои отличия в технологиях монтажа. Результаты прове-dённого исследования могут служить основой для разработки методики выбора наиболее подходящего вида фасадной си-стемы, что в конечном итоге позволит повысить эффективность организации всех связанных с работами процессов.

**Ключевые слова:** на-весные фасадные системы; модульные системы; монтаж фасадных систем; фасад.

an assessment of the timing and cost of design, production and installation using the example of a specific residential building, which allows for a more accurate analysis of all aspects. In addition, two different types of modular hinged facade systems are being considered, which have their own differences in installation technologies. The results of the conducted research can serve as a basis for the development of a methodology for selecting the most appropriate type of facade system, which ultimately will im-prove the efficiency of the organization of all work-related processes.

**Keywords:** hinged facade systems; modular systems; installation of facade systems; facade.

садных систем [5], нельзя признать достаточным, что подтверждает актуальность работы.

В рамках данного исследования произведён сравни-тельный анализ классических и модульных стальных НФС с акцентом на различные этапы их реализации: проектирование, производство и монтаж. Для этого проведена оценка сроков и стоимости каждого из этих этапов на примере конкретного здания, обладающего архитектурой средней сложности. Важно отметить, что внешний облик фасада напрямую влияет на технологические и конструктивные решения, что подтверждается исследованиями [6; 7], поэтому необходимо рассматривать здания с различной архитектурой. Однако исследование, представленное в статье, может послужить отправной точкой для разработки методики выбора на-весной фасадной системы.

Стоит отметить, что рассматриваются два варианта монтажа модульных фасадных систем, которые различаются по способу установки утеплителя и облицовочного материала. Первый вариант включает монтаж модулей с утеплителем с использованием башенного крана, что по-зволяет минимизировать трудозатраты на строительной площацке. Второй вариант предполагает классический монтаж кронштейнов и утеплителя с использованием люлек или лесов, с последующим монтажом модуля.

Целью данного исследования является выполнение комплексной оценки организационно-технологических решений при использовании модульных и классических на-весных фасадных систем при строительстве современных многоквартирных жилых зданий с использованием НФС. Особое внимание будет уделено оценке сроков и стоимости проектирования, производства и монтажа, что позволит выявить наиболее эффективные подходы к реализации фасадных систем в зависимости от архитектурных решений и используемых материалов.

Задачи исследования:

1. Выполнить оценку сроков и стоимости проектиро-вания раздела КМ (конструкции металлические)

Параметр	Ед. изм.	Значение
Ширина здания	м	16,200
Длина здания	м	26,400
Высота здания	м	28,979

**Табл. 1. Информация об объекте строительства**  
**Tab. 1. Information about the construction site**

- для каждого рассматриваемого вида фасадной системы.
- Выполнить оценку сроков и стоимости производства для каждого рассматриваемого вида фасадной системы.
  - Выполнить оценку сроков и стоимости монтажных работ для каждого рассматриваемого вида фасадной системы.
  - Провести сравнительный анализ различных способов выполнения работ и определить наиболее эффективную технологию по параметрам: стоимость, сроки, качество.

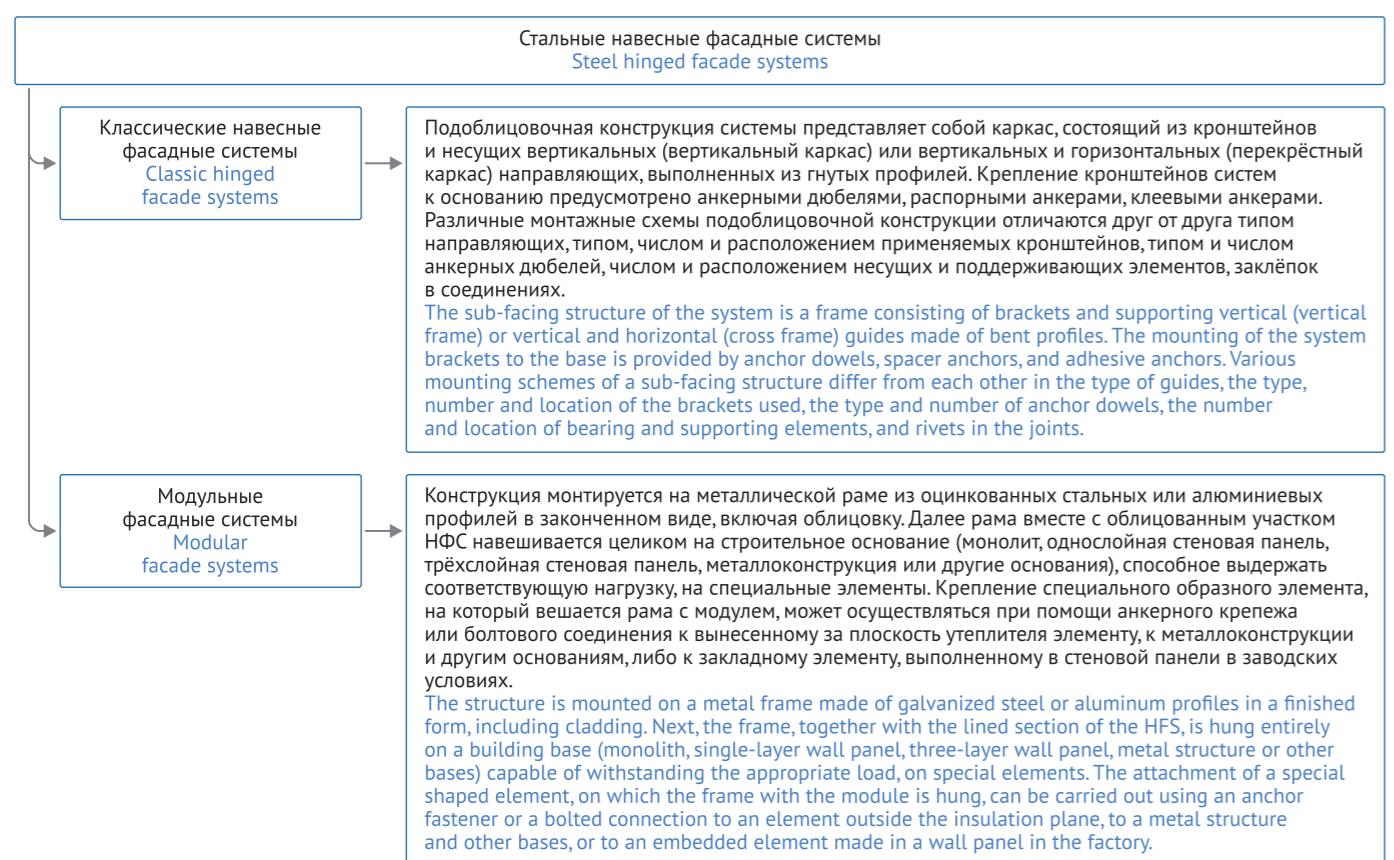
Проведённое исследование позволит определить наиболее эффективную технологию организации работ и обеспечит базу для дальнейшей разработки методики выбора оптимального вида фасадной системы.

#### Материалы и методы

Для анализа были выбраны две технологии производства стальных НФС: классическая и модульная.

Исследование направлено на сравнительный анализ технологических особенностей и сроков монтажа различных типов навесных фасадных систем. Методологический подход включает многокритериальный анализ ключевых этапов устройства фасадов.

Для каждого этапа проведено детальное сравнение технологических процессов, включая необходимую ква-



**Рис. 1. Информация о видах сравниваемых систем [8; 9]**  
**Fig. 1. Information about the types of systems being compared [8; 9]**

лификацию рабочих и средние значения временных затрат, а также стоимости работ.

Исследование основано на данных проектной документации, анализе технологических карт, экспертных оценках специалистов в области монтажа НФС, а также на графиках производства работ строительных объектов.

Методология включает:

- Изучение нормативных требований к устройству фасадов (СП 522.1325800.2023).
- Разбор технической документации производителей фасадных систем.
- Сравнительный анализ временных затрат на выполнение каждого этапа, основанный на изучении отчётов и данных подрядных организаций.
- Оценка сложности выполнения работ на основе классификации по уровню механизации, численности задействованных специалистов и необходимости предварительных подготовительных мероприятий.
- Анализ этапов монтажа и оценка стоимости работ на основании среднерыночных расценок.
- Изучение научных публикаций по теме исследования.

Выявлены преимущества и недостатки каждого типа НФС. Результаты сравнительного анализа позволили выделить ключевые технологические особенности, влияющие на сроки и сложность монтажа.

Методы исследования включают качественный и количественный анализ. Были проведены сравнительные исследования для оценки стоимости, сроков и качества работ. Рассмотрены такие параметры, как:

- сроки проектирования,
- сроки производства и монтажа,
- затраты на материалы,

Наименование производителя НФС	Стоимость разработки КМ НФС за 1 м <sup>2</sup> , руб.	Стоимость разработки КМ НФС для объекта исследования, руб.	Стоимость разработки КМ Модуль за 1 м <sup>2</sup> , руб.	Стоимость разработки КМ Модуль для объекта исследования, руб.
АО «Хилти Дистрибуишн ЛТД»	150	173 400	220	254 320
ООО «Диат-Проект»	400	462 400	480	554 880
ООО «ЮКон Инжиниринг»	300	346 800	450	520 200

**Табл. 2. Сравнение стоимости разработки КМ НФС**  
**Tab. 2. Comparison of the cost of design documentation for metal structures of hinged facade systems**

- затраты на рабочую силу,
- общие затраты на проект.

#### Результаты

Для получения результатов исследования необходимо выполнить сравнительный анализ в несколько этапов:

- Выполнить оценку сроков и стоимости проектирования раздела КМ (конструкции металлические) для каждого рассматриваемого вида фасадной системы.
- Выполнить оценку сроков и стоимости производства для каждого рассматриваемого вида фасадной системы.
- Выполнить оценку сроков и стоимости монтажных работ для каждого рассматриваемого вида фасадной системы.

Исходными данными для выполнения исследования являются информация об объекте строительства (таблица 1) и информация о видах сравниваемых систем (рисунок 1).

Также исходными данными будут являться материал облицовки и его площадь. Рассматриваемый объект строительства облицовывается бетонной плиткой под затирочную смесь и имеет площадь равную 1 156 м<sup>2</sup>.

Понятие «модуль» в навесных фасадных системах подразумевает под собой готовую конструкцию с облицовочным материалом, монтаж которой производится в собранном виде [8]. Благодаря этому значительно сокращаются сроки монтажа непосредственно на строительной площадке [10; 11], однако увеличиваются сроки и стоимость производства и проектирования относительно классической НФС.

Следует отметить, что существует несколько типов модульных фасадных систем. Все навесные фасадные модули навешиваются на заранее установленные кронштейны, однако есть отличия при монтаже утеплителя. Технологические процессы выглядят следующим образом.

#### Вариант 1:

- Монтаж кронштейнов (не требует люлек/лесов, установка производится в торцы перекрытия изнутри здания);
- Монтаж модуля с утеплителем и облицовочным материалом (производится с помощью башенного крана).

#### Вариант 2:

- Монтаж кронштейнов (с помощью люлек/лесов, установка производится в монолитные пояса/простенки);
- Монтаж первого и второго слоёв утеплителя (с помощью люлек/лесов);
- Монтаж модуля с облицовочным материалом.

В сравнительном анализе представлено два наиболее распространённых вида навесной фасадной системы – классическая НФС последовательного монтажа и модуль-

ная технология с утеплением и облицовочным материалом.

Исследование проводится с целью определения оптимальной технологии выполнения работ по навесным фасадным системам при строительстве современных многоквартирных жилых зданий. В рамках данного исследования рассматривается конкретный объект строительства без привязки к возможной вариативности архитектурных решений с облицовкой клинкерной плиткой с использованием затирочной смеси.

#### 1. Комплексная оценка сроков и стоимости проектирования раздела КМ

Поскольку актуальные нормы для оценки сроков и стоимости проектирования раздела КМ НФС в настоящее время отсутствуют, для выполнения оценки рассматриваются среднерыночная стоимость проектирования и статистика по трудозатратам по данным нескольких производителей НФС.

**Стоимость.** Некоторые производители предлагают фиксированную стоимость проектирования за 1 м<sup>2</sup> вне зависимости от сложности объекта. Другие производители обладают собственной методикой расчёта стоимости проектирования в зависимости от таких параметров, как:

- площадь объекта, м<sup>2</sup>,
- вид облицовки по весу [6],
- количество видов облицовок, шт.,
- декоративная сложность фасада (определяется при анализе ИД),
- вынос плоскости фасада, мм,
- качество ИД для проектирования,
- вид навесной фасадной системы (классическая/модульная).

В таблице 2 предоставлены данные о стоимости разработки раздела КМ для данного объекта, полученные от нескольких организаций путём интервьюирования.

Таким образом, для данного здания среднерыночная стоимость проектирования в ценах, актуальных на март 2025 года, составит 283 руб./м<sup>2</sup> для классической системы и 383 руб./м<sup>2</sup> для модульной системы. Важно отметить, что стоимость разработки КМ является примерной, так как она получена путём интервьюирования. Для объекта исследования принята усреднённая общая стоимость разработки раздела КМ:

- КМ НФС – 327 533 руб.,
- КМ НФС Модуль – 443 133 руб.

Сроки проектирования также сложно оценить ввиду отсутствия актуальных норм и информации в ГЭСН. Оценка сроков проектирования в компаниях в настоящий момент ведётся по статистике скорости проектирования 1 м<sup>2</sup> в зависимости от аналогичных вышеперечисленных параметров.

На основании данных, предоставленных ООО «Диат-Проект», можно принять срок проектирования классической НФС равным 45 рабочим сменам и срок проек-

тирования модульной НФС равным 90 рабочим сменам. Графики проектирования разработаны автором и представлены на рисунках 2, 3.

Таким образом, по оценке сроков и стоимости проектных работ можно сделать следующие выводы:

- Сроки и стоимость проектирования классической НФС значительно ниже, что делает её более привлекательной для проектов с ограниченным бюджетом или жёсткими временными рамками.

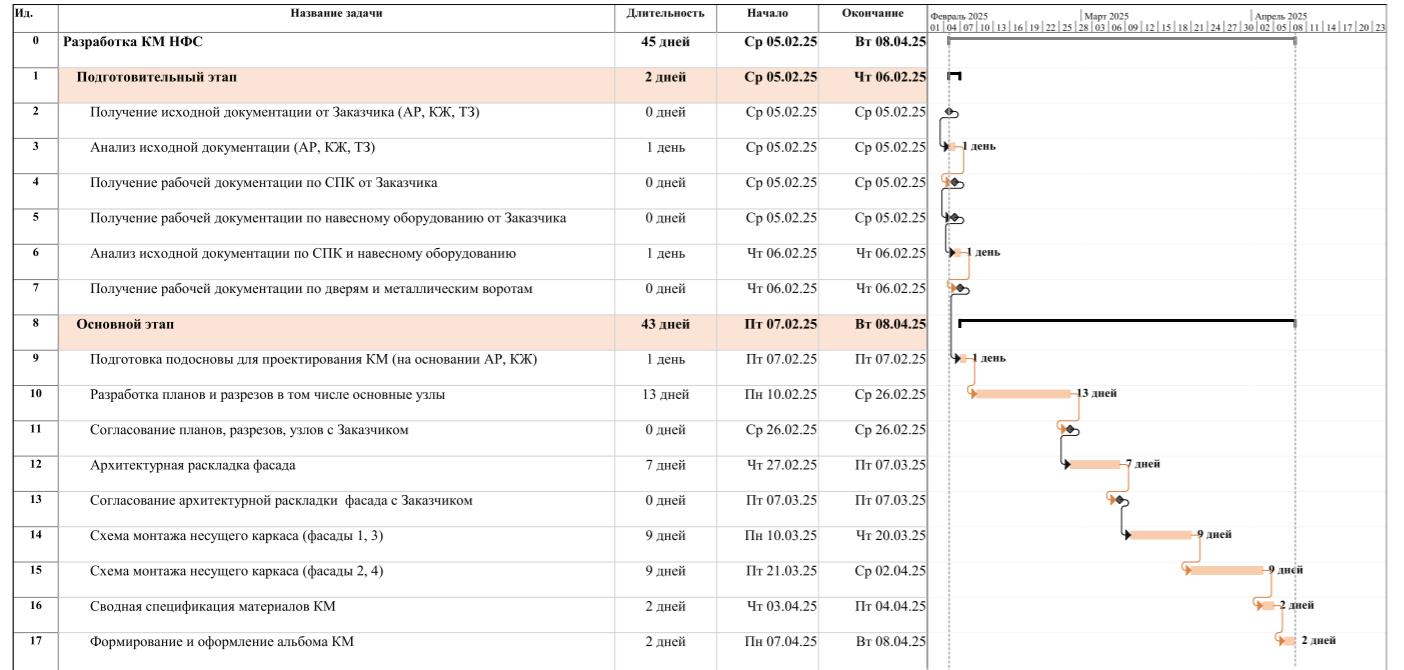


Рис. 2. График выполнения раздела КМ НФС (классическая НФС)  
Fig. 2. Design schedule for a classic hinged facade system

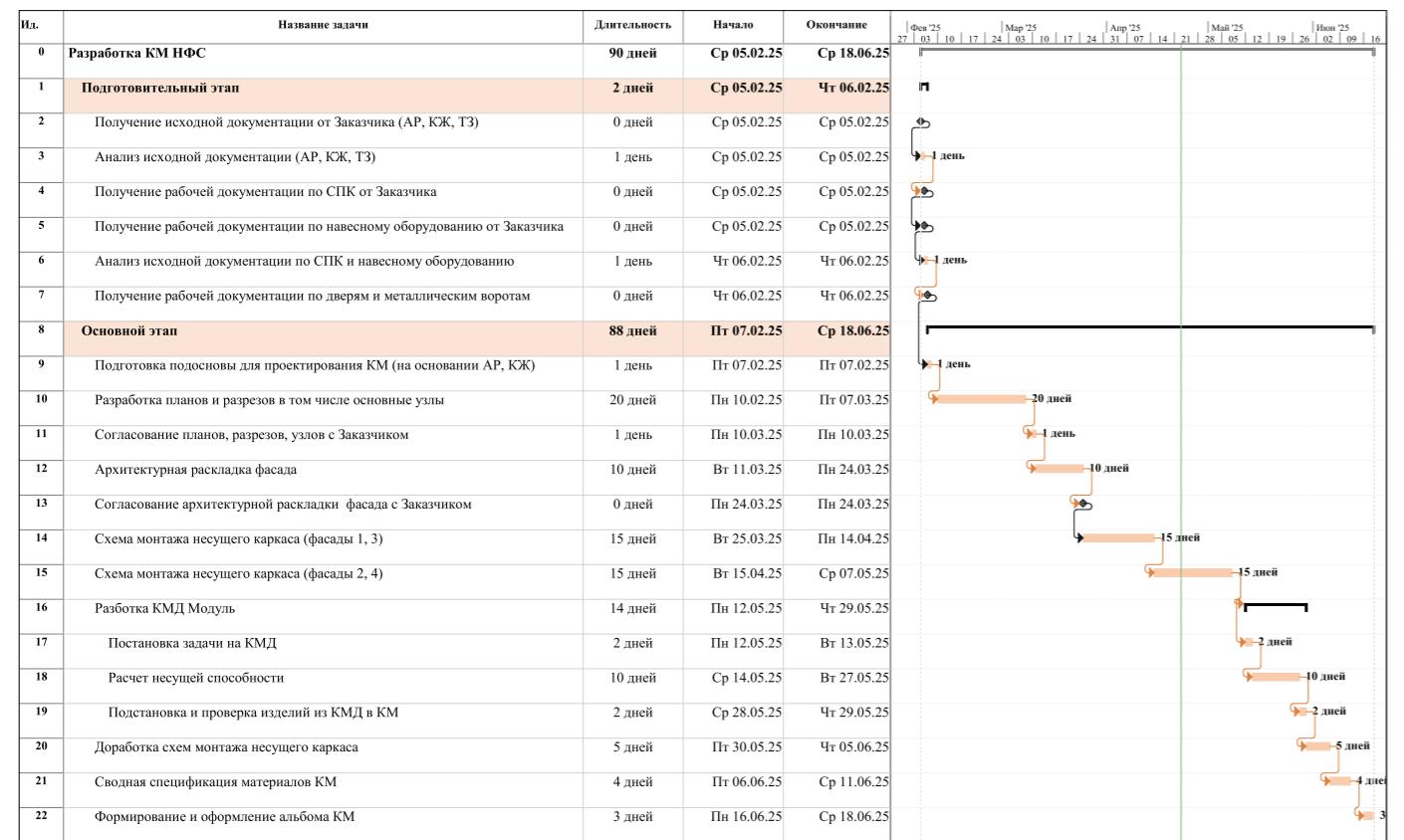


Рис. 3. График выполнения раздела КМ НФС (модульная НФС)  
Fig. 3. Design schedule for a modular hinged facade system

- Сроки и стоимость модульной НФС, несмотря на их высокую цену, могут быть оправданы в случаях, где требуется высокая скорость монтажа.

## 2. Комплексная оценка сроков и стоимости производства классической и модульной подсистем

Технологические процессы изготовления изделий из металла широко освещены в научном сообществе [12–15], однако в рамках данного исследования стоит более подробно рассмотреть технологию производственных



Рис. 4. Процесс изготовления изделий НФС  
Fig. 4. The process of manufacturing products of the hinged facade system

процессов классической и модульной НФС. Анализ позволит оценить сроки и стоимость изготовления каждого вида системы.

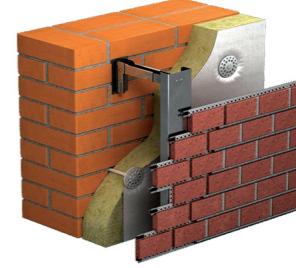
В первую очередь, автором рассматриваются технологические процессы при производстве классической стальной НФС. Производственные процессы представлены на рисунке 4.

Исходные данные:

Облицовка:  
Размер облицовки, мм: 240x71x17  
Относ облицовки, мм: 200  
Толщина утеплителя, мм: 150  
Основание для подсистемы: Хелезобетон  
Толщина основания, мм: 200  
Расчетный участок (оси, отмечки):  
Площадь облицовки для расчета, м<sup>2</sup>: 5,4  
Принцип расчета площади облицовки: по проекции  
Проектная документация:

В совокупности период изготовления изделий для площади представленного фасада объекта исследования с учётом перечисленных технологических процессов составляет около 35–40 рабочих смен.

Для определения общей стоимости изделий приняты среднерыночные расценки производителей НФС и информация, полученная посредством интервьюирования о



1. Навесная фасадная система ДИАТ										
№ п/п	Марка	Наименование			Ед. изм.	Площадь, м <sup>2</sup>	Расчетный расход	Общее количество	Цена ед.	Стоимость с НДС
1	K1.180	Кронштейн K1.180 нерж. 1.0 мм L=180			шт.	2,96	15,98	241,34р.	3 856,61р.	
2	B1.100	Вставка B1.100 нерж. 1.0 мм L=100			шт.	2,96	15,98	95,46р.	1 525,45р.	
3	Ш1	Шайба Ш1 нерж. 3.0 мм			шт.	2,96	15,98	19,76р.	315,76р.	
4	ПР1	Прокладка ПР1 ПВХ 2.0 мм			шт.	2,96	15,98	9,90р.	158,20р.	
5	Н50ц350.3000	Направляющая Н50ц350 1.0 мм L=3000			шт.	0,70	3,78	796,05р.	3 009,07р.	
6	П1-10ц350.3000	Профиль П1-10ц350 0.5 мм L=3000			шт.	3,96	21,38	163,24р.	3 490,07р.	
7	СТ4ц350.3000	Стойка СТ4ц350 1.0 мм L=3000			шт.	0,06	0,32	364,22р.	116,55р.	
8	П2ц350.1800	Профиль П2ц350 0.5 мм L=1800			шт.	0,40	2,16	113,94р.	246,11р.	
9	СТ1ц350.3000	Стойка СТ1ц350 1.2 мм L=3000			шт.	0,02	0,11	834,53р.	91,80р.	
10	ПЛ3ц350.1000	Полка ПЛ3ц350 1.2 мм L=1000			шт.	0,12	0,65	163,59р.	106,33р.	
										ИТОГО: 12 915,95р.

Стоимость подсистемы ДИАТ за 1 м<sup>2</sup> 2 391,84р.

## 2. Крепёжные элементы

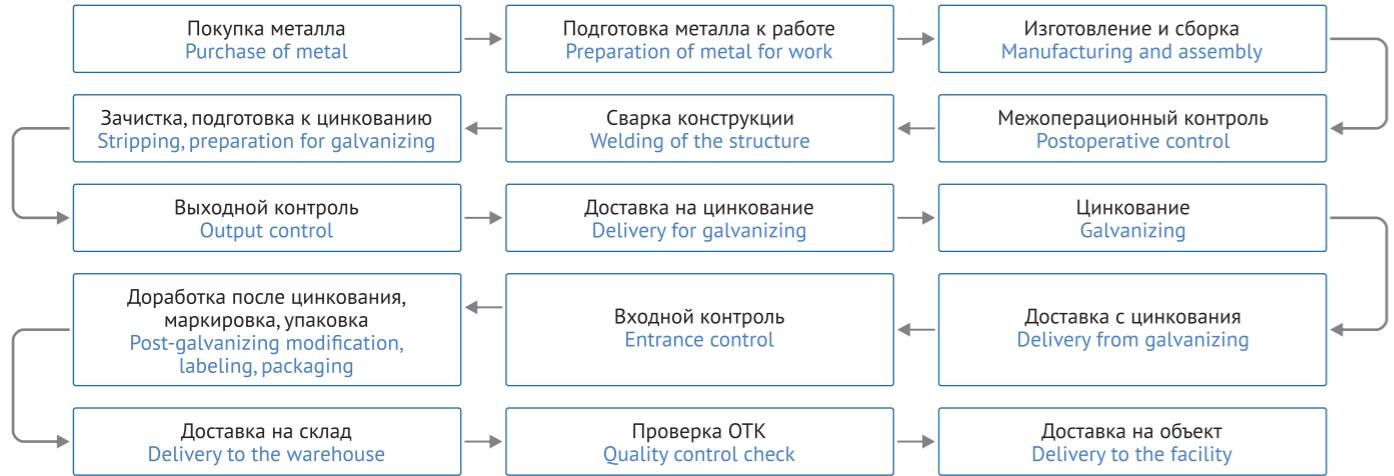
№ п/п	Марка	Наименование	Ед. изм.	Площадь, м <sup>2</sup>	Расчетный расход	Общее количество	Цена ед.	Стоимость с НДС
1	АД-10.100	Анкерный дюбель ТД 10x100	шт.	2,96	15,98	30,62р.	489,31р.	
2	ЗК-40.8	Заклётка А2/А2 4.0x8	шт.	4,724	255,10	2,82р.	719,38р.	
3	ЛП1ц	Лента ЛП1ц перфорированная верт. 0,55 мм	м.пог.	4,49	24,25	11,14р.	270,15р.	
4	ЛП2ц	Лента ЛП2ц перфорированная гор. 0,55 мм	м.пог.	12,60	68,04	23,88р.	1 624,80р.	
								ИТОГО: 3 103,64р.

ВСЕГО: 16 019,59р.

Приведённая стоимость подсистемы ДИАТ с элементами крепления за 1 м<sup>2</sup>: 2 966,59р.

## 3. Дополнительные элементы (справочно)

№ п/п	Марка	Наименование	Ед.



**Рис. 6. Процесс изготовления каркаса модуля**  
**Fig. 6. The process of manufacturing the module frame**

стоимости системы за 1 м<sup>2</sup>. По результатам опросов, для клинкерной плитки с использованием затирочной смеси средняя стоимость 1 м<sup>2</sup> составляет 3000 руб.

Также рассмотрено типовое коммерческое предложение ООО ГК «Диат» (рисунок 5). Стоимость за 1 м<sup>2</sup> в представленном предложении составляет 2 966,59 руб. за 1 м<sup>2</sup> с учётом крепёжных элементов, что подтверждает правильность выборки данных.

Общая стоимость системы определяется путём умножения площади объекта исследования на стоимость 1 м<sup>2</sup>. Таким образом, стоимость системы для данного объекта составит 3 429 378,04 руб.

При рассмотрении модульных систем технологические процессы производства рассматриваются в два этапа. Первый производственный этап аналогичен рассмотренному выше и включает в себя производство изделий из оцинкованной (рисунок 4) и углеродистой (рисунок 6) стали – для каркаса модульной конструкции. Второй производственный этап включает в себя предварительную сборку модуля.

Технологические процессы первого этапа производства представлены на рисунках 4 и 6.

Для рассматриваемого объекта исследования срок изготовления системы будет составлять от 60 до 80 рабочих смен. Срок изготовления материала значительно больше, чем у классической НФС, так как технологические процессы производства изделий из углеродистой стали, которые служат каркасом модуля, характеризуются относительно высокой трудоёмкостью.

Стоимость модульной конструкции складывается из трёх частей: стоимости системы, стоимости каркаса модуля и стоимости сборки.

Для определения стоимости системы автором подготовлено коммерческое предложение, так как данные по среднерыночной стоимости системы для модулей в настоящее время отсутствуют.

Согласно единичным расценкам производителя и разработанному коммерческому предложению (рисунок 7), стоимость системы составит 5 673,77 руб./м<sup>2</sup> с учётом крепёжных элементов. Общая стоимость системы составит 6 542 992,93 руб.

Для определения стоимости конструкции каркаса модуля посчитан общий вес стальных конструкций и использована среднерыночная расценка за изготовление 1 кг конструкции из углеродистой стали с покрытием



#### 1. Навесная фасадная система ДИАТ

№ п/п	Марка	Наименование	Ед. изм.	Цена ед.	Кол-во, м <sup>2</sup>	Расчетный расход	Общее количество	Стоимость с НДС
1	K1.150	Кронштейн K1.150 нерж. 1.0 мм L=150	шт.	220,30р.		1,68	1 936,00	426 492,96р.
2	K1.80	Кронштейн K1.80 нерж. 1.0 мм L=80	шт.	194,60р.		0,68	784,00	152 566,60р.
3	B1.100	Вставка B1.100 нерж. 1.0 мм L=100	шт.	95,46р.		1,68	1 936,00	184 810,56р.
4	B1.120	Вставка B1.120 нерж. 1.0 мм L=120	шт.	100,89р.		0,68	784,00	79 101,20р.
5	Ш1	Шайба Ш1 нерж. 3.0 мм	шт.	19,76р.		2,36	2 720,00	53 747,20р.
6	ПР1	Прокладка ПР1 паронит 2.0 мм	шт.	9,90р.		2,36	2 720,00	26 928,00р.
17	СТЗоц.3000	Стойка СТЗоц 1.2 мм с д/вустор.покр.(рекуп.) L=3000	шт.	648,62р.		2,03	2 336,00	1 515 169,61р.
18	СТ4оц.50	Стойка СТ4оц 1.0 мм с д/вустор.покр.(рекуп.) L=50	шт.	22,65р.		0,28	320,00	7 247,41р.
19	3684-НГ0-1	Направляющая 3684-НГ0-1 нерж. 5.0 мм L=100	шт.	580,24р.		1,44	1 656,00	960 870,16р.
20	П1-10.3000	Профиль П1-10 нерж. 0.5 мм L=3000	шт.	163,24р.		4,65	5 357,33	874 531,09р.
21	П2.1800	Профиль П2 нерж. 0.5 мм L=1800	шт.	113,94р.		0,50	580,00	66 085,20р.
23	3684-ПФ-1	Пластина-фиксатор 3684-ПФ-1 1.0 мм с д/вустор.покр.(рекуп.) L=100	шт.	170,67р.		0,28	320,00	54 614,31р.
24	ПЛЗоц.1000	Полка ПЛЗоц 1.2 мм с д/вустор.покр.(рекуп.) L=1000	шт.	163,59р.		0,08	96,00	15 704,64р.
25	ПЛЗоц.600	Полка ПЛЗоц 1.2 мм с д/вустор.покр.(рекуп.) L=600	шт.	132,57р.		0,08	96,00	12 727,04р.
						ИТОГО:		4 430 595,98р.

Стоимость подсистемы ДИАТ за 1 м<sup>2</sup> 3 842,00р.

#### 2. Крепёжные элементы

№ п/п	Марка	Наименование	Ед. изм.	Цена ед.	Кол-во, м <sup>2</sup>	Расчетный расход	Общее количество	Стоимость с НДС
1	Б933-10.40	Болт DIN 933 FT A2 M10x40	шт.	50,55р.		3,79	4 376,00	221 195,01р.
2	Г934-10	Гайка DIN 934 A2 M10	шт.	18,86р.		5,23	6 032,00	113 751,65р.
3	Г985-10	Гайка самоконтрятая DIN 985 A2 M10	шт.	19,23р.		2,36	2 720,00	52 298,57р.
4	Г934-8	Гайка DIN 934 A2 M8	шт.	8,55р.		1,44	1 656,00	14 165,69р.
5	В913-8.80	Винт DIN 913 A2 M8x80	шт.	74,41р.		1,44	1 656,00	123 230,12р.
6	Г934-10	Гайка DIN 934 A2 M10	шт.	18,86р.		2,87	3 312,00	62 457,81р.
7	Б933-10.70	Болт DIN 933 FT A2 M10x70	шт.	77,92р.		1,44	1 656,00	129 036,54р.
8	Б6921-10.20	Болт DIN 6921 VG A2 M10x20	шт.	42,52р.		2,87	3 312,00	140 834,42р.
9	ЗК-40.8	Заклётка A2/A2 4.0x8	шт.	3,89р.		137,34	158 376,00	615 806,15р.
10	ЗГ-8	Заклётка-гайка A2 M8	шт.	49,77р.		1,44	1 656,00	82 418,55р.
11	ДГ-6.60	Дюбель-гвоздь 6x60	шт.	12,76р.		0,27	308,00	3 929,08р.
12	С7504МТХ-39.25С1	Саморез DIN 7504 M TX C1 ST3.9x25	шт.	9,95р.		0,32	372,00	3 702,86р.
13	ЛП1-15оц	Лента ЛП1-15оц перфорированная верт. 0,55 мм	м.пог.	24,06р.		3,38	3 900,00	93 836,02р.
14	ЛП2оц	Лента ЛП2оц перфорированная гор. 0,55 мм	м.пог.	28,31р.		13,96	16 100,00	455 734,50р.
						ИТОГО:		2 112 396,95р.

ВСЕГО: 6 542 992,93р.  
 Приведённая стоимость подсистемы ДИАТ с элементами крепления за 1 м<sup>2</sup>: 5 673,77р.

**Рис. 7. Коммерческое предложение на систему для модульной конструкции**  
**Fig. 7. Commercial offer for a modular design system**

лесов, 121 чел.-ч. на 100 м<sup>2</sup> кладки кирпича (эквивалентно монтажу плитки под затирку). Несмотря на иное предназначение данных ГЭСН, указанные в таблицах трудозатраты можно считать эквивалентными трудозатратам монтажника НФС, ввиду отсутствия других норм.

Также было проведено интервьюирование монтажных организаций для подтверждения корректности выборки данных.

Для данной площади фасада принимаем расчётный срок монтажа системы и облицовки, равный 4,5 месяцам. Для обеспечения данного срока, на основании вышеизложенных данных, принимаем численность бригады монтажников = 6 человек с средней выработкой, равной 9 м<sup>2</sup> в сутки. С учётом средней зарплаты монтажника 108 393,3 руб./мес., общие затраты на монтаж классической НФС составят 2 926 619,1 руб.

Вид навесной фасадной системы	Стоимость изготовления системы, руб.	Стоимость изготовления модуля, руб.	Стоимость сборки модуля, руб.	Общий срок производства, раб. смен	Общая стоимость производства, руб.
Классическая	3 429 378,04	—	—	40	3 429 378,04
Модульная	6 542 992,93	6 600 000	867 144	120	14 010 136,90

**Табл. 3. Сравнение стоимости производства НФС**  
**Tab. 3. Comparison of the cost of production of hinged facade systems**

Параметр	Вид навесной фасадной системы	
	Классическая	Модульная
Стоимость проектирования, руб.	327 533	443 133
Срок проектирования, раб. смен	45	90
Стоимость изготовления, руб.	3 429 378,04	14 010 136,90
Срок изготовления, раб. смен	40	120
Стоимость монтажа, руб.	2 926 619,1	1 083 933,0
Срок монтажа, мес.	4,5	2,5
Общая стоимость фасадных работ (без учёта утеплителя, СПК, облицовочного материала), руб.	6 683 530,14	15 537 202,9
Общий срок выполнения работ по облицовке фасада, рабочих смен	220	285

**Табл. 4. Результаты сравнительного анализа**  
**Tab. 4. The results of the comparative analysis**

Для оценки срока монтажа модульных конструкций не учитываются человеко-часы на монтаж облицовочного материала, так как он был выполнен на подготовительном этапе. Согласно исследованиям [10; 16], монтаж модульных конструкций в среднем выполняется быстрее на 30–40 %. Исходя из этих данных, примем расчётный срок монтажа, равный 2,5 мес. Для обеспечения данного срока, согласно сборникам и интервьюирования монтажных организаций, принимаем численность бригады монтажников 4 человека с выработкой, равной 20 м<sup>2</sup> в сутки. С учётом средней зарплаты монтажника 108 393,3 руб./мес., общие затраты на монтаж модульной НФС составят 1 083 933,0 руб.

Результаты сравнительного анализа трёх технологических этапов представлены в таблице 4.

#### Обсуждение

При рассмотрении результатов исследования можно сделать вывод, что классическая фасадная система превосходит модульную по большинству параметров: она является более экономичной и обладает меньшим общим сроком выполнения работ. Данный вид можно назвать

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robezhnik, L. V. Characteristics of suspended facade system usage in Russia: From installation technology to architectural solutions / L. V. Robezhnik // AIP Conference Proceedings / IV International Scientific and Practical Conference on Innovations in Engineering and Technology (ISPCIET 2021), Veliky Novgorod, Russia, 28–29 июня 2021 года. – Veliky Novgorod : Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 2022. – Vol. 2486. – Art. 050008.
2. Афанасьев, А. А. Модульные фасады в высотном строительстве / А. А. Афанасьев, А. А. Жунин // Вестник МГСУ. – 2011. – № 1-2. – С. 19–23. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modulnye-fasady-v-vysotnom-stroitelstve-1> (дата обращения: 03.02.2025).
3. Ермаков, И. В. Формирование системного подхода в организации инструментального контроля качества навесного
4. Лукманова, Л. В. Контроль качества монтажа навесных вентилируемых фасадных систем / Л. В. Лукманова, Р. Х. Мухаметрахимов // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – 2018. – № 9. – С. 492–497. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35147159> (дата обращения: 03.02.2025).
5. О фасадах без утажки : монография / Т. А. Усатова и др.; под ред. Н. Н. Никонова. – Москва : АСВ, 2015. – 671 с.
6. Волков, М. Ю. Навесные фасадные системы. Влияние облицовочных материалов и архитектурных особенностей зда-

прагматичным, что подтверждается работами других авторов [17; 18].

Однако модульная система обладает более коротким сроком монтажа непосредственно на строительной площадке, что может сократить расходы на её содержание за счёт проведения работ на более раннем этапе за пределами стройплощадки [16; 19].

Таким образом, при использовании модульной системы экономия может быть значительно больше благодаря повышению мобилизации работ, о чём также упоминается в работах других авторов [20; 21].

Напротив, не всегда возможно оптимизировать общий срок строительства за счёт сокращения сроков монтажа НФС на строительной площадке. Помимо этого, разница в стоимости и сроках работ может быть нивелирована при использовании других облицовок и/или при отличии архитектурных решений. Модуль сложнее разработать для зданий, обладающих уникальной архитектурой фасада, а вес облицовки оказывает сильное влияние на стоимость конструкции.

#### Заключение

Исследование подтверждает эффективность модульной технологии монтажа НФС для конкретного объекта и задаёт вектор для дальнейшего изучения вопроса.

Проведённое исследование позволило определить основные технологические особенности монтажа различных типов НФС и оценить их влияние на сроки выполнения монтажных организаций, принимаем численность бригады монтажников 4 человека с выработкой, равной 20 м<sup>2</sup> в сутки. С учётом средней зарплаты монтажника 108 393,3 руб./мес., общие затраты на монтаж модульной НФС составят 1 083 933,0 руб.

Результаты сравнительного анализа трёх технологических этапов представлены в таблице 4.

ний и сооружений на организационно-технологические решения / М. Ю. Волков, Л. С. Сабитов // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 4. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/9984> (дата обращения: 08.05.2025).

7. Влияние способа крепления облицовки на расчётную схему каркаса НФС / А. А. Морина, Е. А. Морина, А. И. Макаров, А. В. Глямичев, М. А. Назаров // Alfabuild. – 2020. – № 13. – С. 21–28. – URL: <https://alfabuild.spbstu.ru/userfiles/files/04.pdf?syscid=mbr2degkw4457247971> (дата обращения: 03.02.2025).
8. Конструкции навесной фасадной системы с воздушным зазором «ДИАТ-Скрытое» типа «ДИАТ-Мелкоштучные» : ТС 6642-22 Техническое свидетельство о пригодности для применения в строительстве новой продукции и технологий, требования к которым не регламентированы нормативными документами полностью или частично и от которых зависят безопасность зданий и сооружений : выдано 17 октября 2022 г. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации / Разработчик ООО «Диат-Проект» ; заявитель ООО «Диат-Проект». – Москва, 2022.
9. Принципиальные способы крепления металлической рамы модульной конструкции к основанию. Узлы крепления облицовки на модульных конструкциях крупноблочной сборки : Альбом технических решений «ДИАТ-Модуль». Том 2. – Москва, 2022.
10. Афанасьев, А. А. Инновационная технология возведения наружных вентилируемых фасадов в гражданском строительстве / А. А. Афанасьев, А. А. Жунин // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, № 9 (108). – С. 981–989. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnaya-tehnologiya-vozvedeniya-navesnyh-ventiliruemyh-fasadov-v-grazhdanskom-stroitelstve> (дата обращения: 08.05.2025).
11. Ахмедов, Х. Х. Технология устройства вентилируемых фасадов укрупнительными блоками из комбинированных систем / Х. Х. Ахмедов // Вестник науки. – 2021. – № 6-1 (39). – С. 183–190. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-ustroystva-ventiliruemyh-fasadov-ukrupnitelnymi-blokami-iz-kombinirovannyh-sistem> (дата обращения: 08.05.2025).
12. Wasim, M. Efficient design of a prefabricated steel structure integrating design for manufacture and assembly concepts / M. Wasim, O. Oliveira // Australian Journal of Structural Engineering. – 2022. – Vol. 23, Iss. 4. – Pp. 356–369.
13. Новиков, В. Г. К вопросу о сварочном производстве и выборе оборудования / В. Г. Новиков // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – № 11. – С. 424–426. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-svarochnom-proizvodstve-i-vybore-oborudovaniya> (дата обращения: 08.05.2025).

#### REFERENCES

1. Robezhnik, L. V. Characteristics of suspended facade system usage in Russia: From installation technology to architectural solutions / L. V. Robezhnik // AIP Conference Proceedings / IV International Scientific and Practical Conference on Innovations in Engineering and Technology (ISPCIET 2021), Veliky Novgorod, Russia, 28–29 июня 2021 года. – Veliky Novgorod : Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 2022. – Vol. 2486. – Art. 050008.
2. Afanasyev, A. A. Modul'nye fasady v vysotnom stroitel'stve [Modular facades in high-rise construction] / A. A. Afanasyev, A. A. Zhunin // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. – 2011. – No. 1-2. – Pp. 19–23. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modulnye-fasady-v-vysotnom-stroitelstve-1> (date of request: 03.02.2025).
3. Lukmanova, L. V. Kontrol' kachestva montazha navesnykh ventiliruemykh fasadnykh sistem [Quality control of installation of suspended ventilated facade systems] / L. V. Lukmanova, R. H. Mukhametrahimov // Resursoenergoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona [Resource and energy efficient technologies in the construction complex of the region]. – 2018. – No. 9. – Pp. 492–497. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modulnye-fasady-v-vysotnom-stroitelstve-1> (date of request: 03.02.2025).
4. Lukmanova, L. V. Kontrol' kachestva montazha navesnykh ventiliruemykh fasadnykh sistem [Quality control of installation of suspended ventilated facade systems] / L. V. Lukmanova, R. H. Mukhametrahimov // Resursoenergoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona [Resource and energy efficient technologies in the construction complex of the region]. – 2018. – No. 9. – Pp. 492–497. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modulnye-fasady-v-vysotnom-stroitelstve-1> (date of request: 03.02.2025).
5. O fasadakh bez utajki : monografiya [On facades without concealment : a monograph] / T. A. Usatova et al.; edited by

08.05.2025).

14. S. Ren, Topology Optimisation for Steel Structural Design with Additive Manufacturing / S. Ren, S. Galjaard // Modelling Behaviour. Design Modelling Symposium. – 2015. – Pp. 35–44.
15. Высоцкий, Т. В. Технологические процессы изготовления механически легированных порошковых сталей и изделий из них / Т. В. Высоцкий, В. Т. Высоцкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2008. – № 3 (20). – С. 58–65. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskie-protsessy-izgotovleniya-mehanicheski-legirovannyh-poroshkovykh-stalej-i-izdeliy-iz-nih> (дата обращения: 08.05.2025).
16. Жунин, А. А. Инновационный метод устройства ограждающих конструкций при возведении многоэтажных жилых зданий / А. А. Жунин // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. – 2017. – № 2. – С. 73–78. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnyy-metod-ustroystva-ograzhdayushih-konstruktsiy-pri-vozvedenii-mnogoetazhnyh-zhilyh-zdaniy> (дата обращения: 08.05.2025).
17. Fahratov, M. Organizational and technological solutions during the production facade works / M. Fahratov, F. Ibrahim // E3S Web Conferences : Ural Environmental Science Forum "Sustainable Development of Industrial Region" UESF 2021, Chelyabinsk, 17–19 февраля 2021 года. – Chelyabinsk, 2021. – Vol. 258 – Art. 09023.
18. Tolstova, K. Advantages of modern collapsible systems for exterior finishing of buildings in urban areas in Russia / K. Tolstova, V. Chulkov // MATEC Web of Conferences : RSP 2017 – XXVI R-S-P Seminar 2017 Theoretical Foundation of Civil Engineering. – 2017. – Vol. 117. – Art. 00169.
19. Oleynik, P. Organizational and technological sequence of the construction of an innovative type of hinged ventilated facade of a multi-storey building / P. Oleynik, Y. Korchagina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 869. – Art. 072016.
20. Бахтинова, Ч. О. Оптимизация организационно-технологических решений по монтажу навесных вентилируемых фасадов на примере спортивных сооружений / Ч. О. Бахтинова, С. Ю. Старков // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 6 (114). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-organizatsionno-tehnologicheskikh-resheniy-po-montazhu-navesnyh-ventiliruemyh-fasadov-na-primere-sportivnyh> (дата обращения: 08.05.2025).
21. Ахмедов, Х. Х. Повышение технологической эффективности возведения ограждающих конструкций зданий / Х. Х. Ахмедов, А. Н. Егоров // Sciences of Europe. – 2021. – № 69-1. – С. 29–31. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-tehnologicheskoy-effektivnosti-vozvedeniya-ograzhdayushih-konstruktsiy-zdaniy> (дата обращения: 08.05.2025).

- N. N. Nikonova. – Moscow : ACU, 2015. – 671 p.
6. Volkov, M. Y. Navesnye fasadnye sistemy. Vliyanie oblitsovochnykh materialov i arkhitekturnykh osobennostej zdanij i sooruzhenij na organizatsionno-tehnologicheskie resheniya [Hinged facade systems. The influence of cladding materials and architectural features of buildings and structures on organizational and technological solutions] / M. Y. Volkov, L. S. Sabitov // Inzhenernyj vestnik Doma [Engineering Bulletin of the Don]. – 2025. – No. 4. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/9984> (date of request: 08.05.2025).
7. Vliyanie sposoba krepleniya oblitsovki na raschetnyu skhemu karkasa NFS [The influence of the cladding fastening method on the design scheme of the NFS frame] / A. A. Morina, E. A. Morina, A. I. Makarov, A. V. Galyamichev, M. A. Nazarov // Alfabuild. – 2020. – No. 13. – Pp. 21–28. – URL: <https://alfabuild.spbstu.ru/userfiles/files/04.pdf?ysclid=m6p2degkw4457247971> (date of request: 03.02.2025).
8. Konstruktsii navesnoj fasadnoj sistemy s vozduzhnym zazorem «DIAT-Skrytoe» tipa «DIAT-Melkosuchnye» [Constructions of a hinged facade system with an air gap "DIAT-Concealed" type "DIAT-Small pieces"] : TS 6642-22 Tekhnicheskoe svidetel'stvo o prigodnosti dlya primeneniya v stroitel'stve novoj produktsii i tekhnologij, trebovaniya k kotorym ne reglamentirovany normativnymi dokumentami polnost'yu ili chastiche i ot kotorikh zavisyat bezopasnost' zdanij i sooruzhenij [TC 6642-22 Technical certificate of suitability for use in construction of new products and technologies, the requirements for which are not regulated in whole or in part by regulatory documents and on which the safety of buildings and structures depends] : vyдано 17 oktyabrya 2022 g. Ministerstvom stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyajstva Rossijskoj Federatsii [Issued on October 17, 2022 Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation] / Razrabotchik OOO «Diat-Proekt» ; zayavitel' OOO «Diat-Proekt» [Developer LLC "Diat-Project" ; applicant LLC "Diat-Project"]. – Moscow, 2022.
9. Basic methods of fastening a metal frame of modular construction to the base. Cladding mounting points on modular structures of large-block assembly [Basic methods of fastening a metal frame of modular construction to the base. Cladding mounting points on modular structures of large-block assembly] : Album of technical solutions "DIAT-Module". Vol. 2 [Album of technical solutions "DIAT-Module". Vol. 2]. – Moscow, 2022.
10. Afanasyev, A. A. Innovatsionnaya tekhnologiya vozvedeniya navesnykh ventiliruemых fasadov v grazhdanskom stroitel'stve [Innovative technology for the construction of hinged ventilated facades in civil engineering] / A. A. Afanasyev, A. A. Zhunin // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. – 2017. – Vol. 12, No. 9 (108). – Pp. 981–989. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnaya-tehnologiya-vozvedeniya-navesnyh-ventiliruemyh-fasadov-v-grazhdanskom-stroitelstve> (date of request: 08.05.2025).
11. Akhmedov, H. H. Tekhnologiya ustrojstva ventiliruemых fasadov ukrupnitel'nymi blokami iz kombinirovannykh sistem [Technology of the device of ventilated facades with large blocks from combined systems] / H. H. Akhmedov // Vestnik nauki [Bulletin of Science]. – 2021. – № 6-1 (39). – Pp. 183–190. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-ustrojstva-ventiliruemyh-fasadov-ukrupnitelnyimi-blokami-iz-kombinirovannyh-sistem> (date of request: 08.05.2025).
12. Wasim, M. Efficient design of a prefabricated steel structure integrating design for manufacture and assembly concepts / M. Wasim, O. Oliveira // Australian Journal of Structural Engineering. – 2022. – Vol. 23. – Pp. 356–369.
13. Novikov, V. G. K voprosu o svarochnom proizvodstve i vybore oborudovaniya [On the issue of welding production and equipment selection] / V. G. Novikov // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki [News of TulSU. Technical sciences]. – 2022. – No. 11. – Pp. 424–426. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-svarochnom-proizvodstve-i-vybore-oborudovaniya> (date of request: 08.05.2025).
14. Ren, S. Topology Optimisation for Steel Structural Design with Additive Manufacturing / S. Ren, S. Galjaard // Modelling Behaviour Design Modelling Symposium. – 2015. – Pp. 35–44.
15. Vysotsky, T. V. Tekhnologicheskie protsessy izgotovleniya mekhanicheskikh legirovannykh poroshkovykh stalej i izdelij iz nich [Technological processes of manufacturing mechanically alloyed powder steels and products from them] / T. V. Visotsky, V. T. Visotsky // Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta [Bulletin of the Belarusian-Russian University]. – 2008. – No. 3 (20). – Pp. 58–65. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskie-protsessy-izgotovleniya-mekhanicheskikh-legirovannyh-poroshkovykh-stalej-i-izdelij-iz-nih> (date of request: 08.05.2025).
16. Zhurin, A. A. Innovatsionnyj metod ustrojstva ograzhdayushikh konstrukcij pri vozvedenii mnogoetazhnykh zhilykh zdanij [An innovative method of enclosing structures in the construction of multi-storey residential buildings] / A. A. Zhurin // Vestnik BGTU imeni V. G. Shukhova [Bulletin of the BSTU named after V. G. Shukhov]. – 2017. – No. 2. – Pp. 73–78. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnyj-metod-ustrojstva-ograzhdayushikh-konstrukcij-pri-vozvedenii-mnogoetazhnyh-zhilyh-zdaniy> (date of request: 08.05.2025).
17. Fahratov, M. Organizational and technological solutions during the production facade works / M. Fahratov, F. Ibrahim // E3S Web Conferences. Ural Environmental Science Forum "Sustainable Development of Industrial Region" UESF 2021, Chelyabinsk, February 17-19, 2021. – Chelyabinsk, 2021. – Vol. 258. – Art. 09023.
18. Tolstova, K. Advantages of modern collapsible systems for exterior finishing of buildings in urban areas in Russia / K. Tolstova, V. Chulkov // MATEC Web of Conferences : RSP 2017 – RSP 2017 – XXVI R-S-P Seminar 2017 Theoretical Foundation of Civil Engineering. – 2017. – Vol. 117. – Art. 00169.
19. Oleynik, P. Organizational and technological sequence of the construction of an innovative type of hinged ventilated facade of a multi-storey building / P. Oleynik, Y. Korchagina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 869. – 2020. – Art. 072016.
20. Bakhtinova, Ch. O. Optimizatsiya organizatsionno-tehnologicheskikh reshenij po montazhu navesnykh ventiliruemых fasadov na primere sportivnykh sooruzhenij [Optimization of organizational and technological solutions for the installation of hinged ventilated facades on the example of sports facilities] / Ch. O. Bakhtinova, S. Y. Starkov // Inzhenernyj vestnik Doma [Engineering Bulletin of the Don]. – 2024. – No. 6 (114). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-organizatsionno-tehnologicheskikh-reshenij-po-montazhu-navesnyh-ventiliruemyh-fasadov-na-primerse-sportivnyh> (date of request: 08.05.2025).
21. Akhmedov, H. H. Povyshenie tekhnologicheskoy effektivnosti vozvedeniya ograzhdayushchikh konstrukcij zdanij [Improving the technological efficiency of the construction of enclosing structures of buildings] / H. H. Akhmedov, A. N. Egorov // Sciences of Europe. – 2021. – No. 69-1. – Pp. 29–31. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-tehnologicheskoy-effektivnosti-vozvedeniya-ograzhdayushchikh-konstrukcij-zdaniy> (date of request: 08.05.2025).

## УДК 69

## Аддитивные технологии в строительстве: потенциал внедрения в гражданское строительство

Additive Technologies in Construction: Implementation Potential into Civil Building

Гранева Анна Викторовна

Кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, a121269@yandex.ru

Graneva Anna Viktorovna

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, a121269@yandex.ru

Васечко Елизавета Владимировна

Студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, vaselizard@gmail.com

Vasechko Elizaveta Vladimirovna

Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, vaselizard@gmail.com

## Аннотация.

В условиях стремительного развития цифровых технологий строительная сфера всё чаще применяет аддитивные технологии. Данная статья посвящена анализу внедрения 3D-печати в строительство. Рассматриваются основные преимущества технологии, её реализация в России и за рубежом, а также ведущие производители 3D-оборудования и их реализованные проекты.

В статье обоснована гипотеза, что 3D-печать в ближайшем будущем способна занять нишу быстрого, качественного и автоматизированного метода возведения жилых и промышленных зданий. Целью исследования является оценка технологической и экономической целесообразности применения 3D-принтеров при возведении жилых и промышленных зданий, а также изучение международного опыта и реализуемых проектов. В работе

## Abstract.

In the context of rapid digital technology development, the construction industry is increasingly adopting additive manufacturing technologies. This article focuses on the analysis of 3D printing integration in construction. It examines the key advantages of this technology, its implementation in Russia and abroad, as well as leading manufacturers of 3D construction equipment and their completed projects.

The article supports the hypothesis that 3D printing may soon occupy a niche as a fast, high-quality, and automated method for constructing residential and industrial buildings. The aim of the study is to assess the technological and economic feasibility of using 3D printers in the construction of such buildings, as well as to analyze international experience and ongoing projects. The

## Введение

Современное гражданское строительство сталкивается с новыми задачами и вызовами: нехватка квалифицированной рабочей силы, рост стоимости материалов, требования к скорости и экологичности строительства. Для решения данных вопросов инженеры и архитекторы всего мира решили обратиться к аддитивным технологиям, в частности – к 3D-печати зданий. Изначально воспринимаемая как экспериментальная, строительная печать сегодня уверенно переходит в стадию эксплуатации.

В последнее время 3D-печать активно используется в сфере строительства. Сейчас с помощью аддитивных технологий в течение небольшого времени можно напечатать отдельные строительные конструкции или даже реальный жилой дом.

те рассматриваются особенности оборудования ведущих мировых производителей, таких как COBOD, ICON, Apis Cor, Winsun, а также российских компаний.

Методология исследования включает систематизацию открытых источников, сопоставительный анализ реализованных проектов и оценку потенциала внедрения технологии в массовое строительство. В результате выявлены ключевые преимущества и ограничения технологии, обоснована её применимость в частном и малоэтажном домостроении, также были выявлены страны-лидеры по уровню интеграции 3D-печати в строительную практику. Представлены рекомендации по дальнейшему развитию отрасли.

**Ключевые слова:** 3D-печать; аддитивные технологии; строительство; 3D-принтер; автоматизация; инновации; бетон.

research explores the characteristics of equipment from major global manufacturers such as COBOD, ICON, Apis Cor, and Winsun, along with notable Russian companies.

The methodology includes systematization of open-source data, comparative analysis of implemented projects, and an evaluation of the potential for applying this technology in mass construction. As a result, the key advantages and limitations of 3D printing in construction are identified. The study justifies its applicability in private and low-rise housing and highlights countries that lead in the integration of additive technologies into construction practice. Recommendations for further development of the sector are also provided.

**Keywords:** 3D printing; additive tech; construction; 3D-printer; automation; innovation; concrete.

Актуальная проблема человечества – нехватка жилых домов. Это связано с активным ростом населения Земли. Если использовать 3D-печать, то данный способ поможет решить эту проблему.

Одним из плюсов этого метода строительства является возведение здания в короткие сроки, с сохранением всех необходимых параметров для долгого проживания – это будет износостойчивое здание. Благодаря 3D-принтерам различной конфигурации бетон укладывается слой за слоем, после из него формируют перекрытия, стены, перегородки и другие конструктивные элементы. Для этого используется стандартный бетон, а также различные цементные смеси, где материалом может быть песок, стекло- или фиброволокно, пластификаторы и др.

Появление крупных 3D-принтеров, таких как AMT S-500 (Россия), COBOD BOD2 (Дания) и ICON Vulcan (США), открыло новые горизонты для строительной отрасли: возможность возведения частных домов и даже малоэтажных жилых комплексов за считанные дни, при снижении затрат до 30–40 %. Активное участие государства и крупных строительных корпораций, а также рост количества успешных объектов по всему миру подтверждают высокий технологический и экономический потенциал этого метода.

### Материалы и методы

В ходе подготовки статьи был использован комплекс общенациональных и теоретико-аналитических методов исследования, включая анализ, синтез, индукцию, дедукцию, а также сравнительно-сопоставительный и системный подходы. Все эти методы обеспечивают комплексный подход к анализу применения аддитивных технологий в строительстве. Методологическую основу составил анализ научных публикаций, технической документации, а также официальных данных от производителей аддитивного оборудования и открытых источников, освещающих практическое применение строительной 3D-печати в России и за рубежом.

Многие научные исследователи, такие как А. С. Иноzemцев, Е. В. Королёв, Д. В. Куличков, И. С. Гончаров и др., рассматривали опыт разных стран в сфере аддитивных технологий, сравнивали 3D-печать в строительной сфере в зависимости от государственной принадлежности, анализировали существующие технологические решения отечественных и зарубежных организаций, а также положительные и слабые стороны различных методов выполнения послойного возведения строительных конструкций [1–6].

Кроме того, применялся контент-анализ нормативной и технической документации, а также метод case-study – для изучения конкретных реализованных объектов в различных странах. Методология исследования основывается на междисциплинарном подходе, объединяющем строительные технологии, экономику, автоматизацию и цифровое проектирование.

В качестве предмета исследования рассматривались аддитивные технологии в строительстве, их технологическая применимость, экономическая эффективность и масштабируемость. Особое внимание уделялось техническим характеристикам строительных 3D-принтеров (в частности, моделей BOD2, Vulcan), а также свойствам используемых строительных смесей на цементной основе, применяемых в аддитивных процессах.

Оборудование и материалы анализировались на основании паспортных данных, отчётов реализованных проектов (включая объекты в Эр-Рияде [7], Техасе [8], Шанхае [9]), а также презентационных и технических материалов производителей. Создание модели потенциального применения технологий в условиях масштабного домостроения проведено на основе сопоставления нормативных и производственных параметров: скорости печати, толщины стен, прочности смеси, энергоэффективности, стоимости и сроков строительства.

Таким образом, совокупность методов позволила провести всестороннюю оценку аддитивных технологий с точки зрения их готовности к внедрению в гражданское

строительство и обоснования целесообразности масштабного применения.

### Результаты

На сегодняшний день аддитивные технологии в строительстве становятся не просто предметом научных исследований, а важным направлением в развитии строительной отрасли, ориентированной на цифровизацию, автоматизацию и устойчивое развитие. Методика трёхмерной печати зданий, основанная на поэтапной экструзии строительных смесей с использованием программно управляемых роботов, позволяет реализовывать архитектурные и инженерные решения с минимальными затратами времени, трудовых ресурсов и строительных отходов.

### Актуальность внедрения 3D-печати в область строительства

В условиях глобального роста населения, урбанизации и дефицита доступного жилья, особенно в развивающихся странах, аддитивный способ возведения зданий может стать отличным решением. В настоящее время изучены основные технологии, которые используются для печати зданий и сооружений, их отличительные характеристики [6].

3D-печать бетона направлена на совершенствование строительных процессов на нескольких уровнях: она сокращает сроки строительства, устранив наиболее трудоёмкие этапы традиционного метода [10]; снижает стоимость, минимизируя перерасход материалов, отходы и потребность в ручном труде [11]; а также обеспечивает гибкость в проектировании конструкций сложной формы, не возможных при классических способах, одновременно повышая безопасность и снижая экологическую нагрузку [12]. Можно выделить общие преимущества, которые присущи технологии 3D-строительства:

**Сокращение сроков строительства:** например, китайская компания WinSun продемонстрировала свои достижения в данной области, напечатав 10 домов менее чем за 24 часа, при этом стоимость каждого составила всего около 5000 долларов США [13].

**Снижение себестоимости возведения зданий** – благодаря автоматизации процессов, минимизации ручного труда и рациональному использованию материалов.

**Минимизация отходов и экологичность процесса** – важный фактор в условиях глобальной борьбы с загрязнением окружающей среды.

**Гибкость проектных решений** – возможность печати сложных форм, индивидуализированных конструкций и органической архитектуры без увеличения затрат.

Уже сегодня 3D-печать в строительстве успешно применяется для малоэтажных жилых домов, временных и мобильных сооружений (в том числе для военных и гуманитарных нужд), объектов социальной инфраструктуры (школ, больниц, павильонов), экспериментов в экстремальных климатических условиях и лунно-марсианских аналогов.

### Перспективы и прогнозы развития

По данным международных отраслевых аналитиков, литературы про аддитивные технологии [1–6], к 2030 году объём рынка строительной 3D-печати может превысить 5–6 млрд долларов, при среднегодовом темпе роста более 90 %. Эксперты прогнозируют массовое внедрение прогрессивной технологии в индивидуальное и малоэтажное строительство; развитие гибридных систем,

Компания	Страна	Известные проекты	Краткая информация о компании
ICON [14]	США	3D-поселение в Техасе [8], экспериментальный дом для NASA	Лидер в жилом 3D-строительстве, сотрудничает с NASA
COBOD International [15]	Дания	Самый большой 3D-дом в Европе («Wave House», Германия) [16], офис в Дубае	Один из крупнейших производителей строительных 3D-принтеров в мире
Apis Cor [17]	США / Россия	Дом в Дубае (самое большое 3D-здание, 2019)	Международный разработчик мобильных 3D-принтеров
Contour Crafting Corp.	США	Программа NASA и FEMA по быстрому строительству домов	Пионер 3D-строительства, создатель технологии Contour Crafting
XtreeE [18]	Франция	Архитектурные элементы, мосты и университетские постройки	Специализируется на архитектурных проектах из бетона
CyBe Construction	Нидерланды	Жилые здания в ОАЭ и Саудовской Аравии	Инновационный разработчик строительных принтеров и собственных смесей
Winsun	Китай	10 домов за день, офисы, виллы, 5-этажный дом [9]	Один из пионеров массовой печати зданий
PERI GmbH [16]	Германия	Жилой дом в Бекуме, офис в Дубае (с COBOD)	Один из лидеров в опалубке, инвестирует в 3D-строительство
3D Printhuset	Дания	Первый офис в Копенгагене, построенный с использованием 3D	Скандинавский инноватор в области 3D-печати и архитектуры
D-Shape	Италия	Лунная база для ESA, архитектура из песка	Известна принтерами для работы с геополимерами и песком
АМТ-СПЕЦАВИА [19; 20]	Россия	Дома в Ярославле и Татарстане	Один из первых производителей 3D-принтеров в России
СИБУР / 3DLAM	Россия	Промышленные материалы, участие в выставках	Разрабатывает смеси и экструдеры для строительной печати
3D Bioprinting Solutions	Россия	Биопечать, сотрудничество в аддитивных технологиях	Научный центр, специализирующийся на биопечати и аддитивных решениях

**Табл. 1. Мировые производители аддитивного оборудования**  
**Tab. 1. Global manufacturers of additive equipment**

сочетающих традиционные методы и роботизированную печать; интеграцию с BIM-технологиями и цифровыми двойниками зданий; разработку новых строительных композитов, включая биоразлагаемые, климатоустойчивые и самовосстанавливающиеся смеси.

В долгосрочной перспективе возможно развитие полностью автономного строительного цикла, в котором проектирование, производство и эксплуатация будут объединены в единую цифровую цепочку.

### Системные ограничения и не решённые в насторожнее время задачи

Несмотря на впечатляющие результаты первых проектов, внедрение технологии сталкивается с рядом препятствий:

#### 1. Материальные ограничения.

Составы, пригодные для 3D-печати, пока ограничены – особенно в части быстрого схватывания, пластичности и несущей способности. Нужны смеси, адаптированные к непрерывному экструзионному процессу.

#### 2. Отсутствие единых нормативов.

Во многих странах отсутствует полноценная нормативно-правовая база, регулирующая проектирование, испытания и эксплуатацию 3D-печатных зданий. Это тормозит их сертификацию и официальное признание.

#### 3. Неравномерность слоёв.

Межслойные соединения – одно из слабых мест: при неравномерной подаче или отклонениях в температуре возможно формирование трещин, снижающих общую прочность объекта.

#### 4. Высокая цена первоначальных вложений.

Стартовые затраты на принтер, логистику и обучение персонала по-прежнему остаются значительными.

### Перспективы и направления развития

#### Разработка новых строительных составов.

Необходимо создание инновационных сухих смесей, адаптированных под климатические условия конкретных регионов (влажность, морозостойкость, жаростойкость).

### Укрупнение формата принтеров.

Стремление к строительству более высоких и объёмных объектов требует масштабирования техники и её повышения устойчивости на открытых площадках.

### Интеграция в BIM-системы.

Использование информационного моделирования (BIM) позволит интегрировать 3D-печать в цифровой цикл строительства – от концепта до эксплуатации.

### Образовательные и кадровые программы.

Подготовка специалистов нового типа – операторов, технологов, проектировщиков – станет основой кадрового обеспечения отрасли.

### Практическое применение и реализованные объекты

Строительные компании всего мира уже осознали плюсы использования аддитивных технологий и активно внедряют их в процессы возведения зданий. Во многих европейских, азиатских странах уже есть фирмы, производящие специализированное оборудование для 3D-печати. Ниже представлен обзор компаний разных стран, в том числе и отечественных, использующих в строительном производстве аддитивные технологии (таблица 1).

Одним из самых популярных аддитивных методов является контурная печать материала. Производство бетона на 3D-принтере – это строительный метод, позволяющий изготавливать заранее спроектированные строительные элементы путём послойного нанесения 2D-слоёв друг на друга, что в совокупности формирует объёмную 3D-модель. При этом бетонная смесь, выдавливаемая через сопло принтера, не требует использования опалубки и последующей виброобработки.

Одной из наиболее перспективных технологий 3D-печати бетоном является контурная печать (Contour Crafting, CC). Эта методика позволяет формировать объекты слой за слоем с использованием робототехники. Она применяется как для печати малогабаритных промышленных элементов, так и для создания крупногабаритных

строительных конструкций, что делает её уникальной в своей области [21].

На рубеже 2020-х годов технологии строительной 3D-печати вышли за рамки лабораторных и демонстрационных проектов, перейдя к активному внедрению в гражданское строительство. На сегодняшний день в различных странах мира реализуется ряд крупных и экспериментальных объектов, демонстрирующих как возможности, так и ограничения данного метода.

Ниже приведён обзор наиболее значимых проектов, находящихся в стадии строительства или частично завершённых к маю 2025 года.

В Саудовской Аравии в рамках государственной программы Vision 2030 реализуется масштабный жилой проект в столице страны Эр-Рияде. Компания Dar Al Arkan [7] в партнёрстве с датским производителем 3D-принтеров COBOD вводит целый жилой квартал с использованием модифицированного строительного принтера BOD2. Проект предусматривает строительство более сотни индивидуальных домов различной площади и планировки. Один из уже построенный домов с помощью 3D-оборудования представлен на рисунке 1. Конструкции печатаются из специального фибробетона, обладающего повышенными теплоизоляционными характеристиками, при этом срок возведения одного дома не превышает 10 дней. Проект финансируется из бюджета в размере более 100 млн долларов и предполагает полную интеграцию с принципами «умного дома» и энергоэффективного проектирования.

Китай, будучи одним из пионеров в области крупномасштабной 3D-печати, реализует офисно-лабораторный кампус в пригороде Шанхая (рисунок 2). Проект под названием Winsun Smart Construction Campus [9] осуществляется одноимённой компанией, использующей собственные строительные 3D-принтеры. Особенностями проекта являются предварительное изготовление модулей в заводских условиях и последующая сборка на площадке. В процессе используется переработанный бетон и отходы строительства, что делает объект образцом экологически ориентированного подхода. Строительство профинанси-



Рис. 1. Вилла Dar Al Arkan  
Fig. 1. Villa Dar Al Arkan



Рис. 2. Дом, построенный компанией Winsun  
Fig. 2. The house built by Winsun company

ровано частным капиталом в объёме 150 млн долларов, а завершение комплекса из шести зданий планируется на конец 2025 года.

США традиционно занимают лидирующие позиции в технологической трансформации строительства. Компания ICON в сотрудничестве с застройщиком Lennar ведёт строительство целого микрорайона Wolf Ranch в штате Техас (рисунок 3). Проект предусматривает возведение более 100 жилых домов с использованием собственного принтера Vulcan, специально разработанного для масштабной автоматизации строительного процесса [8]. Дома различной площади (от 100 до 180 м<sup>2</sup>) печатаются в условиях строительной площадки в непрерывном режиме. При этом ключевыми преимуществами проекта являются высокая скорость и устойчивость к экстремальным погодным условиям, включая ураганы. Уже к маю 2025 года заселено более 40 домов, а завершение запланировано на конец текущего года.

Таким образом, современные примеры из разных стран подтверждают, что 3D-печать в строительстве перестаёт быть футуристической технологией и всё чаще рассматривается как эффективный и конкурентоспособный метод возведения зданий.

На практике уже сегодня реализуются жилые дома, офисные пространства, исследовательские центры и ценные районы, в которых ключевые конструктивные элементы создаются послойным методом экструзии строительных композиций. При этом большая часть проектов реализуется по гибридной схеме: 3D-печать используется на этапе формирования несущих оболочек, а последующие работы завершаются традиционными методами. Тем не менее скорость, экономичность, минимизация отходов и возможность индивидуализированного проектирования делают эту технологию крайне перспективной на ближайшие десятилетия.



Рис. 3. Wolf Ranch в Джорджтауне, штат Техас,  
27 июня 2024 года  
Fig. 3. Wolf Ranch in Georgetown, Texas, June 27, 2024

Страна	Примерный процент использования 3D-печати в строительстве	Примечания
США	2–3 %	Активное применение в частном секторе (домовладения, временное жильё); лидер по количеству проектов, технологий и инвестиций; компания ICON [14] – мировой флагман отрасли
Китай	1.5–2 %	Интенсивное развитие на уровне государственно-частных партнёрств, проекты с использованием переработанных строительных материалов (Winsun) [9]; фокус на быстровозводимых жилых и офисных модулях
Германия	~1 %	Поддержка через федеральные инновационные программы, развитие модульного домостроения, активное внедрение BOD2 от COBOD в реальное строительство
Саудовская Аравия	1–1.5 %	Национальность на масштабное внедрение в рамках Vision 2030, строительство целых районов с помощью 3D-принтеров в Эр-Рияде (Dar Al Arkan [7] и COBOD)
Нидерланды	~0.8 %	Ведутся архитектурные и инфраструктурные проекты (например, пешеходные мосты и жилые блоки); акцент на дизайн и экологию
ОАЭ	1 % (в Дубае – выше)	Амбициозные цели: 25 % зданий с применением 3D-печати в Дубае к 2030 году; реализуются офисные здания, жилые блоки и элементы благоустройства
Россия	0.3–0.5 %	Проекты реализуются точечно (Apis Cor [17], Сфера.3D), государственная поддержка на начальном уровне; потенциальный рост в регионах с дефицитом жилья и сложными климатическими условиями

Примечание. Данные являются приблизительными оценками на основе доступной информации и могут варьироваться в зависимости от региона и времени.

Табл. 2. Анализ использования 3D-печати в строительстве  
Tab. 2. Analysis of the use of 3D printing in construction

Проанализируем, какой процент составляют аддитивные технологии в строительстве. Результат представлен в виде таблицы (таблица 2), а также в виде диаграммы на рисунке 4.

По данным таблицы можно составить диаграмму, иллюстрирующую примерный процент использования аддитивных методов в строительстве по сравнению с традиционными технологиями.

3D-печать в строительстве представляет собой перспективное направление, предлагающее решения для быстрого, экономичного и устойчивого возведения зданий. Хотя технология ещё не достигла широкого распространения, пилотные проекты и инициативы в различных странах демонстрируют её потенциал и эффективность. С дальнейшим развитием материалов, оборудования и нормативной базы можно ожидать увеличение доли 3D-печати в строительной отрасли.

Популярные строительные 3D-принтеры по странам представлены в таблице 3.

3D-печать в строительстве – не просто инновация, а потенциально новый строительный уклад. Однако, чтобы технология перешла из стадии пилотных проектов в

повседневную практику, необходимо устранить текущие технические и организационные барьеры.

Предполагается, что в течение ближайших 10–15 лет аддитивные технологии станут стандартом в малоэтажном, модульном и быстровозводимом строительстве, особенно в тех странах, где наблюдаются дефицит жилья, высокие темпы урбанизации или климатические вызовы.

#### Обсуждение

Результаты проведённого исследования подтвердили выдвинутую гипотезу о том, что технология строительной 3D-печати обладает высоким потенциалом для внедрения в сферу гражданского строительства. Сопоставление реализованных проектов в странах с различным уровнем технологического развития показало, что аддитивные технологии уже используются на практике не только для демонстрационных объектов, но и в рамках серийного строительства жилья, офисных и производственных зданий. Это подтверждает актуальность перехода от экспериментального этапа к широкомасштабному внедрению.

Выявленные преимущества, такие как снижение сроков строительства, сокращение трудозатрат, повышение точности исполнения и возможность использования

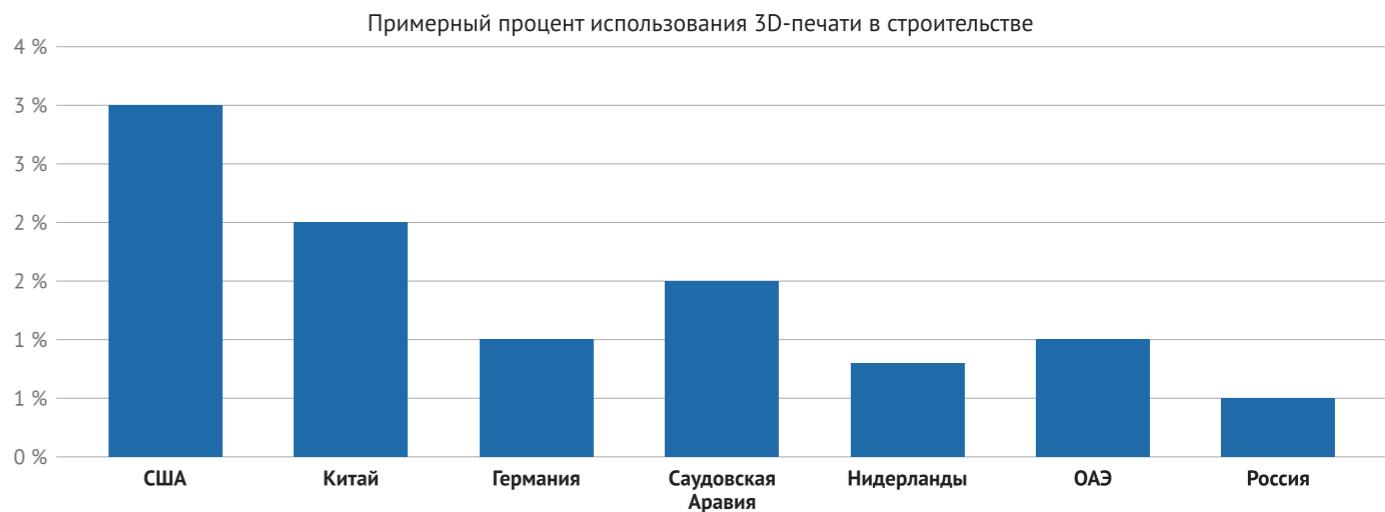


Рис. 4. Диаграмма, иллюстрирующая процент эксплуатации аддитивных методов в строительстве  
Fig. 4. Diagram illustrating the percentage of the use of additive methods in construction

Характеристика	AMT S-500 (Россия) [19]	COBOD BOD2 (Дания) [15]	ICON Vulcan (США) [14]
Рабочая зона (м)	11,5 × 29 × 14	до 12 × 27 × 9	до 10 × 10 × 3
Производительность	2,5 м <sup>3</sup> /ч.	до 1000 мм/с.	~0,5 м <sup>3</sup> /ч.
Материалы	бетон M400–M500	бетонные смеси	Lavacrete
Этажность строительства	до 6–8 этажей	до 3 этажей	до 1–2 этажей
Точность позиционирования	2 мм	1–2 мм	~1 мм
Потребляемая мощность	12 кВт	12–15 кВт	~10 кВт
Плюсы	Огромная рабочая зона (крупнейший в мире); высокая производительность; подходит для многоэтажного строительства	Модульная конструкция; высокая скорость печати; широкое применение в различных странах	Компактность и мобильность; использование инновационных материалов; применение в крупных проектах
Минусы	Требует значительного пространства для установки; меньшая мобильность по сравнению с COBOD, ICON	Ограничение по этажности; зависимость от качества бетонных смесей	Ограниченнная рабочая зона; низкая производительность по сравнению с другими моделями

**Табл. 3. Сравнительная ведомость трёх ведущих 3D-принтеров**  
**Tab. 3. Comparative list of the three leading 3D printers**

устойчивых материалов, свидетельствуют о технологической зрелости метода. Особенно перспективным направление 3D-печати выглядит в условиях дефицита рабочей силы, при строительстве в удалённых регионах и в малоэтажном домостроении.

В то же время следует учитывать ряд ограничений. Во-первых, нормативная база во многих странах, в том числе и в России, пока недостаточно адаптирована под технологию аддитивного строительства. Во-вторых, сохраняется зависимость от дорогостоящего оборудования и ограниченного ассортимента сертифицированных строительных смесей. Кроме того, метод остаётся чувствительным к климатическим условиям и требует определённой подготовки площадки и стабильного энергоснабжения.

Таким образом, 3D-печать в строительстве может быть эффективным решением в определённых сегментах строительного рынка, особенно в частном и социальном домостроении. Однако для масштабного распространения необходима комплексная работа по совершенствованию нормативной базы, локализации производства оборудования и развитию инженерной инфраструктуры.

### Заключение

Проведённый анализ подтверждает, что 3D-печать в строительстве переходит из стадии инновационного эксперимента в реальный технологический тренд. Реализованные проекты демонстрируют, что аддитивные технологии позволяют эффективно решать задачи быстроводимого, качественного, энергоэффективного и автоматизированного строительства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иноземцев, А. С. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве / А. С. Иноземцев, Е. В. Королёв, Т. К. Зыонг. – DOI 10.22227/1997-0935.2018.7.863-8761 // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, № 7 (118). – С. 863–876.
- Лунёва, Д. А. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы её развития / Д. А. Лунёва, Е. О. Кожевникова, С. В. Калошина. – DOI 10.15593/2224-9826/2017.1.08 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 90–101.
- Лохмутов, Н. Д. Перспектива развития 3D-печати в строительстве / Н. Д. Лохмутов, Д. В. Куличков, В. В. Ермоляева // Молодой учёный. – 2018. – № 23 (209). – С. 177–179.
- Мухаметрахимов, Р. Х. Аддитивная технология возведения зданий и сооружений с применением строительного 3D-принтера / Р. Х. Мухаметрахимов, И. М. Вахитов // Известия КГАСУ. – 2017. – № 4 (42). – С. 350–356.
- Максимов, Н. М. Аддитивные технологии в строительстве: оборудование и материалы / Н. М. Максимов // Аддитивные технологии. – 2017. – № 4. – С. 54–62.
- 3D-печать в строительстве / Н. И. Ватин, Л. И. Чумадова, И. С. Гончаров, В. В. Зыкова, А. Н. Карпеня, А. А. Ким, Е. А. Финашенков. – DOI 10.18720/CUBS.52.3 // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 1 (52). – С. 27–46.
- Stunning, State of the Art Three Floors Smart Home Villa in Saudi Is the Tallest on Site 3d Printed Building in the World / COBOD : [официальный сайт]. – URL: <https://cobod.com/stunning-state-of-the-art-three-floors-smart-home-villa-in-saudi-is-the-tallest-on-site-3d-printed-building-in-the-world/> (дата обращения: 29.04.2025).
- Garcia, E. World's largest 3D-printed neighborhood near completion in Texas / E. Garcia // Reuters : [новостной интернет-портал]. – URL: <https://www.reuters.com/world/us/worlds-largest-3d-printed-neighborhood-nears-completion-texas-2024-08-08/> (дата обращения: 30.04.2025).
- Winsun demonstrates large-scale 3D construction in Shanghai / Winsun Global : [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.winsun3d.com/en> (дата обращения: 01.05.2025).

10. The Reduction of Construction Duration by Implementing Contour Crafting (3D Printing) / C. M. Rouhana, M. S. Aoun, F. S. Faek, M. S. Eljazzar, F. R. Hamzeh // Proceedings for the 22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Oslo, Norway, 25–27 June 2014. – Vol. 22. – Pp. 1031–1042.
11. Mega-scale fabrication by contour crafting / B. Khoshnevis, D. Hwang, K.-T. Yao, Z. Yeh // International Journal of Industrial and Systems Engineering. – 2006. – Vol. 1, No. 3.
12. Rahimi, M. Crafting Technologies / M. Rahimi, M. Arhami, B. Khoshnevis // Times Journal of Construction and Design. – 2009. – April. – Pp. 30–34.
13. Kira, Exclusive: WinSun China builds world's first 3D printed villa and tallest 3D printed apartment building / Kira // 3D Printer and 3D Printing News : [интернет-ресурс]. – 2015. – URL: <http://www.3ders.org/articles/20150118-winsun-builds-world-first-3d-printed-villa-and-tallest-3d-printed-building-in-china.html> (дата обращения: 10.05.2025).
14. ICON: Intelligent Machines Building Humanity's Future / ICON : [официальный сайт]. – URL: <https://www.iconbuild.com/> (дата обращения: 05.05.2025).
15. Europe's Largest 3D Printed Building Is Being Constructed

### REFERENCES

1. Inozemtsev, A. S. Analiz sushhestvuyushhikh tekhnologicheskikh reshenij 3D-pechati v stroitel'stve [Analysis of existing technological solutions for 3D printing in construction] / A. S. Inozemtsev, E. V. Korolev, T. K. Zuong. – DOI 10.22227/1997-0935.2018.7.863-8761 // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. – 2018. – Vol. 13, No. 7 (118). – Pp. 863–876.
2. Luneva, D. A. Primenenie 3D-pechati v stroitel'stve i perspektivy eyo razvitiya [Application of 3D printing in construction and its development prospects] / D. A. Luneva, E. O. Kozhevnikova, S. V. Kaloshina. – DOI 10.15593/2224-9826/2017.1.08 // Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture]. – 2017. – Vol. 8, No. 1. – Pp. 90–101.
3. Lokhmutov, N. D. Perspektiva razvitiya 3D-pechati v stroitel'stve [Prospects for the development of 3D printing in construction] / N. D. Lokhmutov, D. V. Kulichkov, V. V. Ermolaeva // Molodoj uchyonij [Young Scientist]. – 2018. – No. 23 (209). – Pp. 177–179.
4. Mukhametrakhimov, R. Kh. Additivnaya tekhnologiya vozvedeniya zdanij i sooruzhenij s primeneniem stroitel'nogo 3D-printera [Additive technology for construction of buildings and structures using a 3D printer] / R. H. Mukhametrakhimov, I. M. Vakhitov // News of KGASU [Bulletin of KGASU]. – 2017. – No. 4 (42). – Pp. 350–356.
5. Maksimov, N. M. Additivnye tekhnologii v stroitel'stve: oborudovanie i materialy [Additive technologies in construction: equipment and materials] / N. M. Maksimov // Additivnye tekhnologii [Additive Technologies]. – 2017. – No. 4. – Pp. 54–62.
6. 3D-pechat' v stroitel'stve [3D printing in construction] / N. I. Vatin, L. I. Chumadova, I. S. Goncharov, V. V. Zykova, A. N. Karpenya, A. A. Kim, E. A. Finashenkov. – DOI 10.18720/CUBS.52.3 // Stroitel'stvo unikal'nykh zdanij i sooruzhenij [Construction of Unique Buildings and Structures]. – 2017. – No. 1 (52). – Pp. 27–46.
7. Stunning, State of the Art Three Floors Smart Home Villa in Saudi Is the Tallest on Site 3d Printed Building in the World / COBOD : [официальный сайт]. – URL: <https://cobod.com/stunning-state-of-the-art-three-floors-smart-home-villa-in-saudi-is-the-tallest-on-site-3d-printed-building-in-the-world/> (дата обращения: 29.04.2025).
8. Garcia, E. World's largest 3D-printed neighborhood near completion in Texas / E. Garcia // Reuters : [новостной интернет-портал]. – URL: <https://www.reuters.com/world/us/worlds-largest-3d-printed-neighborhood-nears-completion-texas-2024-08-08/> (дата обращения: 30.04.2025).
9. Winsun demonstrates large-scale 3D construction in Shanghai / Winsun Global : [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.winsun3d.com/en> (дата обращения: 01.05.2025).
10. The Reduction of Construction Duration by Implementing Contour Crafting (3D Printing) / C. M. Rouhana, M. S. Aoun, F. S. Faek, M. S. Eljazzar, F. R. Hamzeh // Proceedings for the 22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Oslo, Norway, 25–27 June 2014. – Vol. 22. – Pp. 1031–1042.
11. Mega-scale fabrication by contour crafting / B. Khoshnevis, D. Hwang, K.-T. Yao, Z. Yeh // International Journal of Industrial and Systems Engineering. – 2006. – Vol. 1, No. 3.
12. Rahimi, M. Crafting Technologies / M. Rahimi, M. Arhami, B. Khoshnevis // Times Journal of Construction and Design. – 2009. – April. – Pp. 30–34.
13. Kira, Exclusive: WinSun China builds world's first 3D printed villa and tallest 3D printed apartment building / Kira // 3D Printer and 3D Printing News : [интернет-ресурс]. – 2015. – URL: <http://www.3ders.org/articles/20150118-winsun-builds-world-first-3d-printed-villa-and-tallest-3d-printed-building-in-china.html> (дата обращения: 10.05.2025).
14. ICON: Intelligent Machines Building Humanity's Future / ICON : [официальный сайт]. – URL: <https://www.iconbuild.com/> (дата обращения: 05.05.2025).
15. Europe's Largest 3D Printed Building Is Being Constructed in Germany / COBOD : [официальный сайт]. – URL: <https://cobod.com/europe-largest-3d-printed-building/> (дата обращения: 03.05.2025).
16. 3D printing solutions from PERI / PERI Group : [официальный сайт]. – URL: <https://www.peri3dconstruction.com/en> (дата обращения: 08.05.2025).
17. Apis Cor: Construction with robotic precision / Apis Cor : [официальный сайт]. – URL: <https://apis-cor.com/> (дата обращения: 04.05.2025).
18. XtreeE: 3D Concrete Printing Solutions / XtreeE : [официальный сайт]. – URL: <https://xtreee.eu/> (дата обращения: 07.05.2025).
19. AMT: Строительные 3D принтеры для вашего бизнеса / AMT : [официальный сайт]. – URL: <https://amt-print.com/?ysclid=mbggrc1jdv174593742> (дата обращения: 10.05.2025).
20. СПЕЦАВИА. Russian 3D-technologies: Профессиональные принтеры для строительства и промышленности. Производство. Продажа. Сервис / СПЕЦАВИА : [официальный сайт]. – URL: <https://specavia.pro> (дата обращения: 10.05.2025).
21. Grand challenges in technology enhanced learning / F. Fischer, F. Wild, R. Sutherland, L. Zirn. – Berlin : Springer, 2013. – 248 р.

hai / Winsun Global : [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.winsun3d.com/en> (дата обращения: 01.05.2025).

10. The Reduction of Construction Duration by Implementing Contour Crafting (3D Printing) / C. M. Rouhana, M. S. Aoun, F. S. Faek, M. S. Eljazzar, F. R. Hamzeh // Proceedings for the 22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Oslo, Norway, 25–27 June 2014. – Vol. 22. – Pp. 1031–1042.

11. Mega-scale fabrication by contour crafting / B. Khoshnevis, D. Hwang, K.-T. Yao, Z. Yeh // International Journal of Industrial and Systems Engineering. – 2006. – Vol. 1, No. 3.

12. Rahimi, M. Crafting Technologies / M. Rahimi, M. Arhami, B. Khoshnevis // Times Journal of Construction and Design. – 2009. – April. – Pp. 30–34.

13. Kira, Exclusive: WinSun China builds world's first 3D printed villa and tallest 3D printed apartment building / Kira // 3D Printer and 3D Printing News : [интернет-ресурс]. – 2015. – URL: <http://www.3ders.org/articles/20150118-winsun-builds-world-first-3d-printed-villa-and-tallest-3d-printed-building-in-china.html> (дата обращения: 10.05.2025).

14. ICON: Intelligent Machines Building Humanity's Future / ICON : [официальный сайт]. – URL: <https://www.iconbuild.com/> (дата обращения: 05.05.2025).

15. Europe's Largest 3D Printed Building Is Being Constructed in Germany / COBOD : [официальный сайт]. – URL: <https://cobod.com/europe-largest-3d-printed-building/> (дата обращения: 03.05.2025).

16. 3D printing solutions from PERI / PERI Group : [официальный сайт]. – URL: <https://www.peri3dconstruction.com/en> (дата обращения: 08.05.2025).

17. Apis Cor: Construction with robotic precision / Apis Cor : [официальный сайт]. – URL: <https://apis-cor.com/> (дата обращения: 04.05.2025).

18. XtreeE: 3D Concrete Printing Solutions / XtreeE : [официальный сайт]. – URL: <https://xtreee.eu/> (дата обращения: 07.05.2025).

19. AMT: Stroitel'nye 3D printery dlya vashego biznesa [AMT: Building 3D Printers for your business] / AMT : [официальный сайт]. – URL: <https://amt-print.com/?ysclid=mbggrc1jdv174593742> (дата обращения: 10.05.2025).

20. SPETSAVIA. Russian 3D-technologies: Professional'nye printery dlya stroitel'stva i promyshlennosti. Proizvodstvo. Prodazha. Servis [SPECAVIA: Russian 3D technologies: Professional printers for construction and industry. Production. Sale. Service] / SPECAVIA : [официальный сайт]. – URL: <https://specavia.pr> (дата обращения: 10.05.2025).

21. Grand challenges in technology enhanced learning / F. Fischer, F. Wild, R. Sutherland, L. Zirn. – Berlin : Springer, 2013. – 248 р.

# Управление риском дефекта при устройстве эксплуатируемых кровель многоэтажных жилых домов

Risk Management of Defects in the Installation of Operated Roofs in Multi-Story Residential Buildings

## Макаров Александр Николаевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, MakarovAN@mgsu.ru

## Makarov Aleksander Nikolaevich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, MakarovAN@mgsu.ru

## Монахов Борис Евгеньевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и организация строительного производства», директор Института дистанционного образования ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, monahov@mgsu.ru.

## Monakhov Boris Evgenievich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, Director of the Institute of Distance Education of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, monahov@mgsu.ru

## Коротеева Мария Сергеевна

Магистр кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, maria.k0r0teeva@yandex.ru

## Koroteeva Maria Sergeevna

Master of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, maria.k0r0teeva@yandex.ru

### Аннотация.

В условиях активного развития высотного строительства и ужесточения требований к качеству строительной продукции особую актуальность приобретает разработка эффективных методик контроля и прогнозирования дефектов кровельных конструкций. В данной работе представлены результаты комплексного исследования по управлению рисками возникновения дефектов при монтаже эксплуатируемых кровель многоэтажных жилых зданий.

На основе анализа 8 объектов (66 717 м<sup>2</sup>) авторы классифицируют дефекты по степени опасности: критические (нарушение герметичности), значительные (снижение надёжности) и малозначительные (эстетические дефекты). Применение методов FMEA и дерева неисправностей в сочетании с экспертным опросом 15 специалистов выявило системные проблемы в организации строительных процессов.

Результаты исследования демонстрируют высокую веро-

### Abstract.

In the context of rapid development of high-rise construction and increasingly stringent requirements for construction quality, the development of effective methods for monitoring and predicting defects in roofing structures has become particularly relevant. This paper presents the results of a comprehensive study on risk management of defects during the installation of operated roofs in multi-story residential buildings.

Based on the analysis of 8 construction projects (66,717 m<sup>2</sup>), the authors classify defects according to their severity: critical (compromised waterproofing), significant (reduced reliability), and minor (aesthetic defects). The application of FMEA and fault tree analysis methods, combined with expert surveys of 15 specialists, revealed systemic issues in construction process organization.

The study demonstrates a high probability of defect occurrence (mechanical damage - 0.472, seam separation - 0.233, insufficient material overlap - 0.213), indicating significant gaps in existing quality control systems. The obtained data clearly highlights the need for developing comprehensive measures to improve technological processes and risk management systems.

The research confirms the importance of a systematic approach to quality management at all construction stages. The identified issues necessitate the development of new methodological solutions to enhance the reliability of roofing structures and minimize operational risks.

**Keywords:** operated roofs; roofing defects; fault tree analysis; risk management; construction quality control; quality assurance methods; expert assessments.

### Введение

В последние десятилетия в России наблюдается активное развитие многоэтажного строительства, что связано с ростом населения и увеличением потребности в жилье [1]. В связи с этим кровля играет ключевую роль, обеспечивая защиту зданий от атмосферных воздействий и влияния внешней среды [2]. Проблемы, связанные с кровельными покрытиями, могут существенно влиять на эксплуатационные характеристики зданий, комфорт проживания и безопасность жителей. Важность управления рисками дефектов при устройстве эксплуатируемых кровель обусловлена рядом факторов: увеличением срока службы жилых зданий, изменением климатических условий, а также растущими требованиями к энергоэффективности и экологической безопасности зданий [3].

На практике в многоэтажном строительстве жилых домов встречаются различные типы кровель, например, по эксплуатации делятся на эксплуатируемые [3] и неэксплуатируемые, по исполнению – на классические и инверсионные и т. д.

По мнению брокеров девелоперских компаний, многоэтажное строительство с эксплуатируемой кровлей является «лакомым кусочком» на рынке на конец 2024 года. Для населения такого города, как Москва, данное сложное технологическое решение является востребованным. Однако монтаж кровли в многоэтажных домах сопряжён с множеством рисков, которые могут негативно сказаться на качестве выполненных работ, долговечности сооружений и надёжности конструкций.

Основными проблемами в данной области являются выявление и оценка технических рисков дефектов кровель, которые могут возникать в процессе строительства зданий и сооружений.

Разработка системы управления рисками дефектов в последние десятилетия значительно продвинулась. Основной акцент сделан на прогнозировании дефектов путём применения современных методов анализа данных и моделирования; постоянной разработки материалов и их усовершенствования; использования новых технологий (например, самовосстанавливающиеся покрытия); интегрирования солнечных панелей в конструкцию кровли; введения мониторинга состояния кровель; развития методов управления рисками, включающих интеграцию системы оценки рисков на всех этапах – от концепции до эксплуатации и ремонта.

Цель работы – выявление наиболее опасных дефектов, возникающих при монтаже эксплуатируемых кровель многоэтажных жилых зданий, и количественная оценка рисков, связанных с их возникновением.

### Материалы и методы

Монтаж эксплуатируемых кровель представляет собой сложный многоэтапный процесс, который включает в себя не только производственные операции, но и управление рисками. Для достижения поставленных целей исследования был применён системный подход, предполагающий разделение работы на несколько этапов.

Основой для анализа рисков послужили стандарты ГОСТ Р ИСО 13824-2013 и ГОСТ Р 12.0.010-2009. Эти документы позволили оценить вероятность возникновения потенциальных рисков, таких как дефекты конструкций, а также спрогнозировать их возможные последствия [4; 5]. Для систематизации и классификации показателей

качества использовался ГОСТ 4.200-78. Этот стандарт помог структурировать данные и выделить ключевые параметры, влияющие на надёжность и долговечность кровельных систем. Управление качеством продукции осуществлялось в соответствии с ГОСТ 15467-79. На каждом этапе монтажа проводился контроль за соблюдением технологических норм и стандартов, что позволило минимизировать вероятность возникновения дефектов.

Особое внимание было уделено методу причинно-следственного анализа (ПСА) – дереву неисправностей, который применялся для классификации рисков и выявления причин дефектов. Этот метод позволил визуализировать ключевые проблемы и определить их корневые причины согласно ГОСТ Р 27.302-2009. Например, на основе анализа производственных процессов монтажа кровель было создано дерево неисправностей, которое помогло выявить критические точки в технологической цепочке и разработать меры по устранению инцидентов, из-за которых возникли технологические дефекты. Для систематизации видов отказов и оценки их последствий дополнительно использовался метод FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), что позволило структурировать дефекты по степени их влияния на функциональность кровли [6].

Дополнительным инструментом верификации данных стал экспертный опрос, в котором участвовали 15 специалистов с опытом работы от 5 лет [7]. Выборка количества специалистов с опытом работы обоснована в работе [8], а минимальный 5-летний опыт гарантирует, что эксперты (представители строительного контроля) сталкивались с полным циклом монтажа кровель (проектирование, эксплуатация, ремонт). Их оценка позволила уточнить вероятности возникновения дефектов и скорректировать вес факторов в дереве неисправностей. Например, мнение представителей строительного контроля помогло выявить, что перегрев швов связан не только с человеческим фактором, но и с воздействием климата на процесс работы.

Таким образом, сочетание нормативных стандартов и современных методов анализа позволило разработать комплексный подход к управлению рисками при монтаже эксплуатируемых кровель.

### Результаты

Эксплуатируемые кровли, несмотря на их конструктивные отличия, подвержены тем же типам дефектов, что и традиционные кровельные системы. Однако их эксплуатационный режим (наличие пешеходных зон, технического оборудования, сезонные нагрузки) усиливает риски [9; 10]. Ключевая особенность таких дефектов – их прямая связь с нарушением герметичности гидроизоляционного слоя. Даже незначительные повреждения (микротрещины, непроклеенные стыки) быстро прогрессируют под воздействием внешних факторов, приводя к протечкам, намоканию утеплителя и деформациям несущих конструкций [11]. Таким образом, дефекты гидроизоляции становятся системной проблемой, требующей оперативного устранения, поскольку влияют на качество кровли в целом.

На основе статистических данных, предоставленных экспертами в области монтажа и контроля кровель (с опытом от 5 лет), была проведена классификация дефектов, выявленных при строительстве жилых многоэтажных

Критический	Значительный	Малозначительный
<b>Нарушение показателей герметичности (90 шт.)</b>	<b>Нарушение надёжности и долговечности (158 шт.)</b>	<b>Нарушение эстетических показателей (83 шт.)</b>
Расслоение швов рулонной гидроизоляции (40 шт.)	Образование вздутия материала под рулонной гидроизоляцией (34 шт.)	Ржавые пятна на поверхности полотна кровли (68 шт.)
Механическое повреждение кровельного полотна (50 шт.)	Недостаточная адгезия битумного материала к основанию (48 шт.)	Наличие ремонтных участков/заплаток (15 шт.)
-	Ширина вытекаемого битумного вяжущего в швах рулонной гидроизоляции менее 10 мм (26 шт.)	-
-	Приклеивание рулонных гидроизоляционных материалов с нахлестом менее 80 мм (23 шт.)	-
-	Перегрев швов между полотнами рулонного материала (27 шт.)	-

**Табл. 1. Классификация дефектов эксплуатируемых кровель многоэтажных жилых домов по степени опасности**  
**Tab. 1. Classification of defects in operated roofs of multi-story residential buildings by hazard level**

зданий, и определено их количество. Анализ охватил 8 активных объектов (общая площадь кровель – 66 717 м<sup>2</sup>) за период 2024–2025 гг. Всего обнаружено 9 типов дефектов в количестве 311 шт., связанных с гидроизоляционным покрытием (таблица 1).

Данная идентификация дефектов с разделением на группы не полностью отражает степень опасности каждого дефекта. Важно чётко сформулировать параметры дефектов, поскольку каждый строительный объект имеет свои особенности, что означает, что и дефекты могут иметь разную степень опасности. На практике принято делить дефекты на три категории в зависимости от их последствий: критические, значительные и малозначительные. В зависимости от степени воздействия, количества дефектов и их занимаемой площади или местоположения на кровле они могут иметь принадлежность к той или иной категории (группе).

Согласно источнику [12] и опыту экспертов в области строительного контроля, дефекты, возникающие на этапе строительства и относящиеся к категории «нарушение показателей герметичности», классифицируются как критические. Такие дефекты могут привести к серьёзным последствиям, например, к протечкам, что негативно оказывается на эксплуатации здания. Однако принадлежность дефекта к той или иной категории может быть пересмотрена внутренней комиссией организации, ответственной за проект, на основе дополнительного анализа и экспертной оценки.

К категории значительных дефектов относятся нарушения, связанные с надёжностью и долговечностью кровли. Хотя такие дефекты не всегда приводят к немедленным проблемам, они могут существенно повлиять на эксплуатационные характеристики конструкции. Например, к значительным дефектам можно отнести вздутия рулонного гидроизоляционного полотна, которые приводят к образованию воздушных пузырей и последующему отслоению части кровельного ковра. Со временем это может вызвать утечки воды. Кроме того, значительные дефекты могут проявляться как следствие накопления влаги в утеплителе, что со временем приводит к его дегра-

Категория	Количественное значение	Примечания
Критический	1,00	Максимальный ущерб
Значительный	0,66	Умеренный ущерб
Малозначительный	0,33	Минимальный ущерб

**Табл. 2. Количественные значения дефектов разных категорий**  
**Tab. 2. Quantitative values of defects by category**

дации и потере теплоизоляционных свойств. Это, в свою очередь, влияет на микроклимат внутри помещений, хотя и не всегда вызывает немедленные протечки.

Если дефекты связаны с нарушением эстетических показателей, например, изменением внешнего вида строительной продукции, то они, как правило, относятся к категории малозначительных. Связано это с тем, что такие дефекты не влияют на функциональное назначение кровли и могут быть устранены в процессе ремонта без серьёзных последствий для эксплуатации здания.

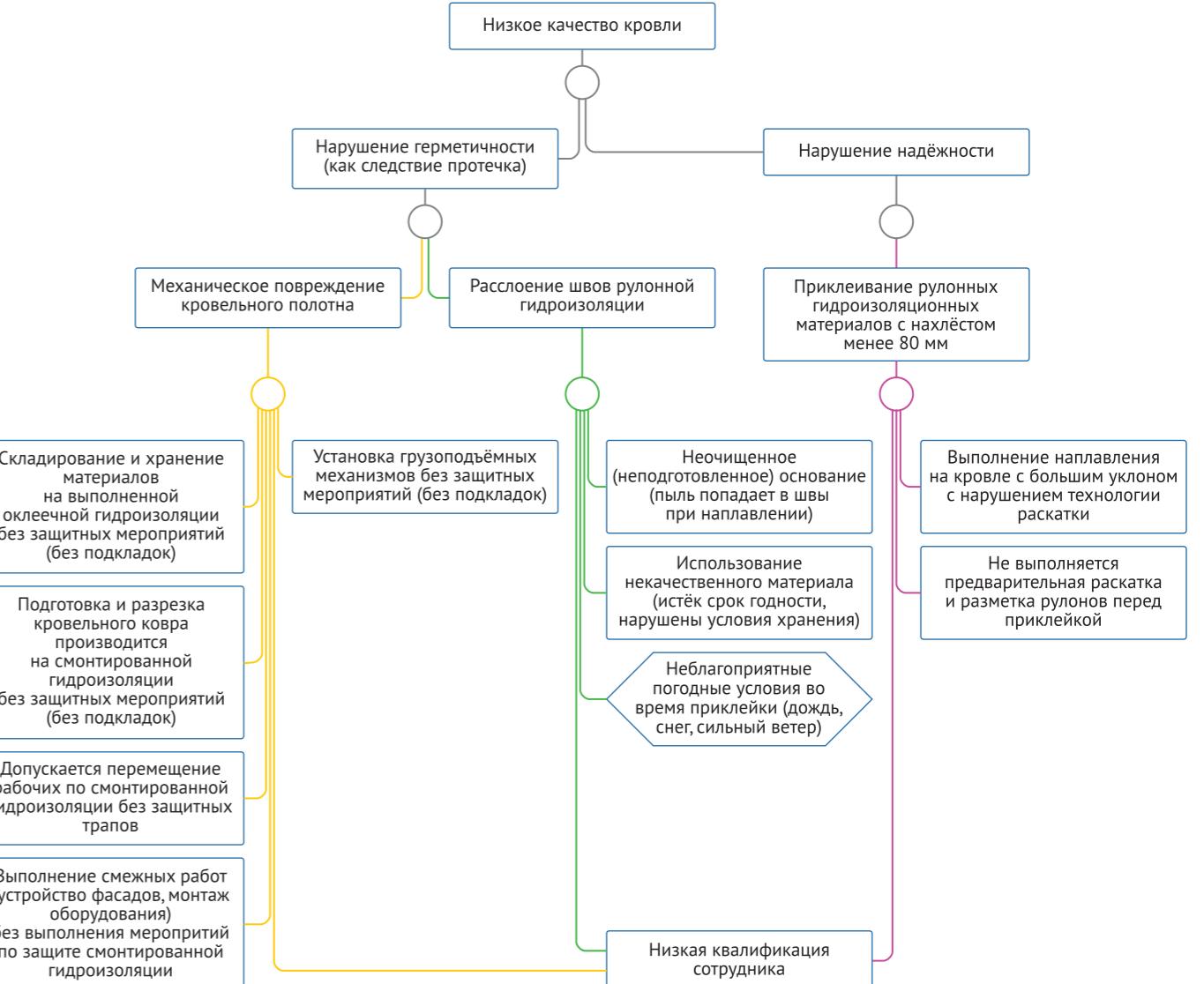
Классификация дефектов зависит не только от их типа, но и от потенциальных последствий. В некоторых случаях, после дополнительного анализа и согласования внутри организации, дефекты могут быть переведены в другую категорию, что подчёркивает важность гибкого подхода к оценке рисков и необходимости регулярного контроля качества на всех этапах строительства.

Для более точной оценки степени влияния дефектов на эксплуатационные характеристики кровли предлагается ввести количественные значения (таблица 2), отражающие уровень ущерба для каждой категории, что позволит систематизировать дефекты и более объективно оценивать их влияние на долговечность и надёжность кровельных конструкций.

Предложенная система количественной оценки позволяет формализовать процесс классификации дефектов, включить полученные значения в расчётные формулы, приняв в качестве ущерба, обеспечить объективность при анализе строительных дефектов. В частности, ущерб от дефекта  $U(D)$  будет использован в формуле (1), согласно ГОСТ Р 58771-2019, для оценки общего риска дефектов:

$$\sum_{i=0}^n R = P_1(D) \cdot U_1 + P_2(D) \cdot U_2 + \dots + P_n(D) \cdot U_n. \quad (1)$$

Исследование, основанное на анализе нормативной документации, научных публикаций, проведённое путём применения анализа видов и последствий отказов, позволило выявить и систематизировать основные причины возникновения дефектов при монтаже эксплуатируемых кровель. Получив полную сводную информацию о дефектах, исключим в анализе дефекты, которые связаны с эстетическими показателями, и дефекты, которые, по мнению экспертов, имеют наименьшее воздействие на качество кровли. Данный отбор объясняется тем, что они либо не влияют на конструкцию кровли и её функциональность напрямую, либо имеют накопительный эффект, который проявляется с течением долгого времени (5 и более лет). Таким образом, применяя статистический



**Рис. 1. Дерево неисправностей для трёх дефектов**  
**Fig. 1. Fault tree for three defects**

метод и FMEA, представим данные в виде графической модели (рисунок 1) согласно ГОСТ Р 27.302-2009.

Представленное дерево неисправностей (ДН) наглядно демонстрирует взаимосвязь между факторами, приводящими к возникновению дефектов кровельных конструкций, и самими дефектами. Каждый уровень дерева отражает последовательность развития событий: от первичных причин через промежуточные события к конечному отказу – конкретному риску дефектов кровельного покрытия.

Применение метода анализа дерева неисправностей (АДН) для анализа дефектов кровельных конструкций предоставляет специалистам ценный инструмент для прогнозирования потенциальных проблем на этапе проектирования и монтажа, а также разработки эффективных профилактических мер. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования системы контроля качества строительных работ и разработки методических рекомендаций по предотвращению наиболее распространённых дефектов кровельных покрытий.

Так, при АДН с применением блок-схемы расчёта безотказности компоненты соединены в системе последовательно друг за другом, и отказ любого приведёт к отказу системы в целом.

Соответствующая модель ДН представлена с вентилями «ИЛИ».

Математическая формула отказности системы с  $n$ -ым количеством блоков для вентиля «ИЛИ» выглядит как формула (2):

$$F(t) = 1 - R(t), \quad (2)$$

где  $F(t)$  – вероятность отказа (события),  $R(t)$  – безотказность системы.

Однако формула вероятности нежелательного события для вентиля «ИЛИ» всей системы/структуре рассчитывается по формуле (3):

$$F_s(t) = 1 - (1 - F_1(t))(1 - F_2(t)) \dots (1 - F_n(t)). \quad (3)$$

Согласно ей, отказ системы/структуре наступит при отказе любого компонента, т. е. низкое качество кровли наступит при одном из дефектов, а дефекты, в свою очередь, наступят при возникновении любой из причин. Таким образом, для вычисления вероятности нежелательного итога необходимо определить вероятность возникновения дефекта согласно формуле (4) полной вероятности:

$$P(D) = \sum_{i=1}^n P(D|U_i)P(U_i). \quad (4)$$

Дефект № 1	$P(D_i U_i)$	$P(U_i)$	$P(D_i)$
<b>Механическое повреждение кровельного полотна</b>			
Складирование и хранение материалов на выполненной оклеечной гидроизоляции без защитных мероприятий (без подкладок)			
0,63	0,17	0,10	
Установка грузоподъёмных механизмов без защитных мероприятий (без подкладок)	0,60	0,14	0,08
Подготовка и разрезка кровельного ковра производится на смонтированной гидроизоляции без защитных мероприятий (без подкладок)	0,40	0,23	0,09
Низкая квалификация сотрудника, допущенного к выполнению работ	0,49	0,20	0,10
Допускается перемещение рабочих по смонтированной гидроизоляции без защитных трапов	0,31	0,30	0,09
Выполнение смежных работ (устройство фасадов, монтаж оборудования) без выполнения мероприятий по защите смонтированной гидроизоляции	0,57	0,23	0,13
<b>Дефект № 2</b>			
<b>Расслоение швов рулонной гидроизоляции</b>			
Неблагоприятные погодные условия во время приклейки (дождь, снег, сильный ветер)	0,52	0,10	0,05
Неочищенное (неподготовленное) основание (пыль попадает в швы при наплавлении)	0,37	0,10	0,04
Низкая квалификация рабочих	0,71	0,20	0,14
Использование некачественного материала (истёк срок годности, нарушены условия хранения)	0,49	0,04	0,02
<b>Дефект № 3</b>			
<b>Приклеивание рулонных гидроизоляционных материалов с нахлестом менее 80 мм</b>			
Выполнение наплавления на кровле с большим уклоном с нарушением технологии раскатки	0,51	0,07	0,04
Низкая квалификация рабочих	0,71	0,20	0,14
Не выполняется предварительная раскатка и разметка рулонов перед приклейкой	0,46	0,10	0,05

**Табл. 3. Экспертный опрос с вычисленными вероятностями возникновения**  
**Tab. 3. Expert survey with calculated probabilities of occurrence**

В контексте данных вычислений отказ системы равносителен возникновению дефектов при монтаже, согласно формуле (5):

$$F_i(t) = P(D). \quad (5)$$

Для того, чтобы вычислить возникновение дефектов, необходимо задать количественные оценки. Их можно получить путём проведения экспертного опроса. Он представляет собой метод сбора и анализа данных, который основан на полученных оценках специалистов в той или иной области. В контексте анализа качества кровель он применяется для определения количественной оценки вероятностей возникновения дефектов, в случае если вероятностные данные недостаточны или отсутствуют, а также для выявления скрытых факторов риска, которые могут не фиксироваться в отчётах, но имеют косвенное отношение наявление нарушений и т. д.

Цель метода объясняется сложностью прогнозирования отказов в строительстве из-за того, что многие дефекты носят латентный характер, т. е. скрытый, и, как следствие, проявляются спустя годы эксплуатации.

В представленном исследовании были привлечены 15 специалистов с опытом работы от 5 лет в сфере контроля и монтажа кровельных конструкций. В таблице 3 указаны вычисленные вероятности для ранее отобранных трёх дефектов.

Для оценки согласованности мнений экспертов применён коэффициент конкордации Кендалла ( $W$ ). Его расчёт по модифицированной формуле (6) учитывает наличие связных рангов:

$$W = \frac{12S}{n(m^3 - m) - n \sum_{j=1}^n T_j}, \quad (6)$$

где  $W$  – коэффициент конкордации Кендалла,  $S$  – сумма квадратов отклонений всех оценок рангов,  $n$  – число экспертов,  $m$  – число показателей экспертизы (причин),  $\sum_{j=1}^n T_j$  – сумма показателей связных рангов в  $j$ -ой ранжировке.

Чтобы определить показатель связных рангов в  $j$ -ой ранжировке, требуется обратиться к формуле (7):

$$T_j = \sum_{k=1}^{H_j} (h_k^3 - h_k), \quad (7)$$

где  $T_j$  – показатель связных рангов,  $H_j$  – число групп равных рангов в  $j$ -ой ранжировке,  $h_k$  – число равных рангов в  $k$ -ой группе связных рангов при ранжировке  $j$ -м экспертом.

При  $W \geq 0,5$  степень согласованности экспертных оценок может считаться удовлетворительной, при  $W > 0,7$  согласованность считается хорошей. При  $W < 0,5$  требуется уточнение экспертных оценок.

Полученные коэффициенты конкордации Кендалла демонстрируют согласованность мнений экспертов в оценке причин дефектов:

- для механических повреждений ( $W_1 = 0,6$ ) согласованность умеренная,
- для расслоения швов ( $W_2 = 0,74$ ) – высокая,
- для недостаточного нахлеста ( $W_3 = 0,81$ ) – почти полная.

Полученные значения коэффициента конкордации Кендалла находятся в пределах статистически допустимых норм, что подтверждает достаточную согласованность мнений экспертов и надёжность выводов исследования. Поскольку все коэффициенты превышают минимальный порог  $W \geq 0,5$ , проведение повторного экспертного опроса не требуется. Низкое значение  $W_1$  для механических повреждений объясняется объективной сложностью ранжирования многокомпонентных рисков (причин), а не методологическими погрешностями.

Рассчитаем вероятности возникновения дефектов, применив формулы (3) и (4). Полученные значения указаны в таблице 4.

Получив все вероятности каждой ветви ДН, применим их для определения риска дефектов с учётом формулы вероятности отказа системы (1) и (3):

$$R(D_j) = 1 - ((1 - P(D_1)U(D_1))(1 - P(D_2)U(D_2))(1 - P(D_3)U(D_3))) = 0,65.$$

Дефекты	$P(D_i)$
Механическое повреждение кровельного полотна	0,472
Расслоение швов рулонной гидроизоляции	0,233
Приклеивание рулонных гидроизоляционных материалов с нахлестом менее 80 мм	0,213

**Табл. 4. Вычисленные вероятности дефектов согласно ДН**  
**Tab. 4. Calculated defect probabilities according to the FT**

Таким образом, вероятность того, что возникнет риск – 65 из 100 случаев, что демонстрирует нам низкое качество кровли.

Результаты исследования демонстрируют высокий интегральный риск возникновения дефектов при монтаже эксплуатируемых кровель – 0,65 (65 %), что указывает на критически низкий уровень качества работ. Такое значение означает, что в 65 случаях из 100 вероятно появление дефектов, ведущих к нарушению герметичности, протечкам и снижению долговечности конструкций.

Полученные данные свидетельствуют о системных недостатках в контроле качества на этапах монтажа и необходимости срочного внедрения превентивных мер, включая усиление надзора, обучение персонала и применение более строгих стандартов.

#### Обсуждение

Данное исследование выявило ключевые аспекты управления рисками дефектов эксплуатируемых кровель, подчеркнув их структурные и функциональные особенности. Несмотря на их схожесть с традиционными кровельными конструкциями, нагрузки при эксплуатации (наличие пешеходных зон, воздействие растительных насаждений на покрытие, наличие техники) значительно повышают риск, делая нарушение герметичности слоя гидроизоляции системной проблемой.

Классификация дефектов на критические, значительные и малозначительные, составленная исходя из статистического анализа 8 объектов (66717 м<sup>2</sup>), позволила структурировать подход к оценке их влияния.

Применение методов FMEA и дерева неисправностей позволило не только визуализировать причинно-следственные связи, но и количественно оценить риски. Расчёт вероятностей дефектов через экспертный опрос (15 специалистов) выявил, что дефекты возникают по причине плохой подготовки до выполнения работ и отсутствия знаний в области монтажа. Формула полной вероятности (4) и модель вентиля «ИЛИ» (3) подтвердили,

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Поморов, С. Б. Развитие жилой застройки повышенной этажности в условиях крупных и крупнейших сибирских городов / С. Б. Поморов, С. Б. Аксёнова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 7. – С. 93–103.
- Риттер, К. И. Применение систем мониторинга снеговой нагрузки и протечек в зданиях различного функционального назначения / К. И. Риттер, Л. К. Белов, П. Ю. Михеев // Школа молодых новаторов. – 2024. – Т. 3. – С. 142–147.
- Иванюшин, Ю. А. Зелёные крыши как элемент городской среды и их влияние на дождевые системы водоотведения / Ю. А. Иванюшин, П. А. Шаршиева // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2023 : Сборник докладов IV Национальной научной конференции, Москва, 15 декабря 2023 года. – Москва : МИСИ–МГСУ, 2024. – С. 546–553.
- Строительные риски и возможности их минимизации / С. Н. Богачёв, А. А. Школьников, Р. А. Розентул, Н. А. Климова // Academia. Архитектура и строительство. – 2015. – № 1. – С. 88–92.
- Затолкин, И. А. Виды рисков / И. А. Затолкин // Азимут научных исследований: экономика и управление. – 2013. – № 3. – С. 7–10.
- Security Application of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) / C. Schmittner, T. Gruber, P. Puschner, E. Schoitsch // International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security (SAFECOMP 2014) : Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham ; A. Bondavalli, F. Di Giandomenico (eds). – 2014. – Vol. 8666. – Pp. 310–325.
- Гепалова, Е. Д. Методы оценки рисков / Е. Д. Гепалова // E-Scio. – 2019. – № 7 (34). – С. 115–127.
- Белановский, С. А. Свободное интервью как метод социологического исследования / С. А. Белановский // Социология: 4М. – 1991. – № 2. – С. 5–19.
- Weiler, S. K. Green Roof Systems: A Guide to the Planning, Design and Construction / S. K. Weiler, K. Scholz-Barth. – Wiley, 2009. – 320 p.
- Snodgrass, E. C. The Green Roof Manual: A Professional Guide

что отказ системы возникает при любом из учтённых дефектов, что подчёркивает необходимость многоуровневого контроля.

Интегральный риск возникновения дефектов, рассчитанный с использованием методов FMEA и дерева неисправностей, составил 0,65, что свидетельствует о существенных пробелах в текущей системе контроля качества. Ключевой проблемой остаются нарушения герметичности гидроизоляционного слоя, которые под воздействием эксплуатационных нагрузок (пешеходные зоны, климатические факторы) приводят к протечкам, деформациям конструкций и снижению энергоэффективности. Полученные данные подчёркивают необходимость внедрения комплексных мер, включающих усиление контроля на этапах монтажа, совершенствование нормативной базы и обучение персонала. Разработанная система количественной оценки дефектов и их категоризации по степени опасности (критические, значительные, малозначительные) позволяют оптимизировать процессы управления рисками и минимизировать эксплуатационные потери, что особенно актуально в условиях растущих требований к экологической безопасности и ресурсосбережению в строительной отрасли [2; 3].

#### Заключение

Проведённое исследование позволило в полной мере достичь поставленных целей: выявить наиболее опасные дефекты эксплуатируемых кровель и количественно оценить связанные с ними риски. Установлено, что ключевыми проблемами, определяющими низкое качество монтажа (интегральный риск 0,65), являются механические повреждения полотна (47,2 %), расслоение швов гидроизоляции (23,3 %) и недостаточный нахлест материалов (21,3 %). Применение методов FMEA и дерева неисправностей в сочетании с экспертными оценками подтвердило эффективность системного подхода к управлению рисками. Результаты работы создают основу для разработки конкретных организационно-технических мер, направленных на снижение вероятности критических дефектов, включая оптимизацию контроля на этапах монтажа, внедрение цифрового мониторинга и повышение квалификации специалистов. Полученные выводы соответствуют современным требованиям к безопасности и ресурсосбережению в строительстве, что подтверждает практическую значимость исследования.

- to Design, Installation, and Maintenance / E. C. Snodgrass, L. McIntyre. – Portland : Timber Press, 2010. – 312 p.
11. Сокова, С. Д. Расчёт надёжности и долговечности кровель / С. Д. Сокова // Academia. Архитектура и строительство. Технологии материалов. – 2010. – № 3. – С. 633–638.

## REFERENCES

1. Pomorov, S. B. Razvitie zhiloj zastrojki povyshenoj ehtaznosti v usloviyah krupnykh sibirskikh gorodov [The development of high-rise residential buildings in the conditions of large and largest Siberian cities] / S. B. Pomorov, S. B. Aksanova // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitelstvo [News of higher educational institutions. Construction]. – 2024. – № 7. – Pp. 93–103.
2. Ritter, K. I. Primenenie sistem monitoringa snegovoj nagruzki i protechek v zdaniyakh razlichnogo funktsional'nogo naznacheniya [Application of systems for monitoring snow load and leaks in buildings of various functional purposes] / K. I. Ritter, L. K. Belov, P. Yu. Mikheev// Shkola molodykh navorov [School of young innovators.]. – 2024. – Vol. 3. – Pp. 142–147.
3. Ivanyushin, Yu. A. [Green roofs as an element of the urban environment and their impact on rainwater drainage systems] / Yu.A. Ivanyushin, P. A. Sharshieva // Aktualnye problemy stroitelnoi otrassli i obrazovaniya – 2023 : Sbornik dokladov IV Natsional'noj nauchnoj konferentsii, Moskva, 15 dekabrya 2023 goda [Actual problems of the construction industry and education – 2023 : Collection of reports of the IV National Scientific Conference, Moscow, December 15, 2023]. – Moscow : MISI–MGSU, 2024. – Pp. 546–553.
4. Stroitel'nye riski i vozmozhnosti ikh minimizatsii [Construction risks and possibilities of their minimization] / S. N. Bogachev, A. A. Shkolnikov, R. A. Rosenthal, N. A. Klimova// Academia. Arkhitektura i Stroitelstvo [Academia. Architecture and construction. Technologies of materials]. Tekhnologii Materialov. – 2010. – Pp. 633–638.
5. Zatolkin, I. A. Vidy riskov [Types of risks] / I. A. Zatolkin // Azimut nauchnykh issledovanij: ekonomika i upravlenie [Azimuth of scientific research: economics and management]. – 2013. – No. 3. – Pp. 7–10.
6. Security Application of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) / C. Schmittner, T. Gruber, P. Puschner, E. Schoitsch // International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security (SAFECOMP 2014) : Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham ; A. Bondavalli, F. Di Giandomenico (eds). – 2014. – Vol. 8666. – Pp. 310–325.
7. Gepalova, E. D. Metody otsenki riskov [Methods of risk assessment] / E. D. Gepalova // E-Scio. – 2019. – № 7 (34). – Pp. 115–127.
8. Belanovsky, S. A. [Free interview as a method of sociological research] / S. A. Belanovsky // Sociology: 4M. – 1991. – No. 2. – Pp. 5–19.
9. Weiler, S. K. Green Roof Systems: A Guide to the Planning, Design and Construction / S. K. Weiler, K. Scholz-Barth. – Wiley, 2009. – 320 p.
10. Snodgrass, E. C. The Green Roof Manual: A Professional Guide to Design, Installation, and Maintenance / E. C. Snodgrass, L. McIntyre. – Portland : Timber Press, 2010. – 312 p.
11. Sokova, S. D. Raschyt nadyozhnosti i dolgovechnosti krovel' [Calculation of reliability and durability of roofs] S. D. Sokova // Academia. Arkhitektura i Stroitelstvo [Academia. Architecture and construction. Technologies of materials]. Tekhnologii Materialov. – 2010. – Pp. 633–638.
12. Lapidus, A. A. [Application of risk-oriented approach in performing construction control functions by a technical customer] / A. A. Lapidus, A. N. Makarov // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. – 2022. – Vol. 17, No. 2. – Pp. 232–241.

УДК 69.05

## Определение прочностных характеристик элементов ограждения котлована (оболочек) русовых опор при строительстве моста через р. Волга (8-й этап строительства М-12 в Республике Татарстан)

Determination of the Strength Characteristics of the Fence Elements of the Excavation (Shells) of Channel Supports During the Construction of a Bridge over the Volga River (8th Stage of Construction of the M-12 in the Republic of Tatarstan)

Бунт Андрей Михайлович

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и организация строительного производства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Bynt177@yandex.ru

Bunt Andrey Mikhaylovich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Bynt177@yandex.ru

## Аннотация.

**Цель.** В современной России, где реализация национальных проектов требует максимальной эффективности, становится особенно важным подбор оптимальных параметров используемого основного и вспомогательного оборудования во всех технологических процессах строительного производства. Одной из существенных составляющих строительных процессов при возведении уникальных сооружений в сложных строительных условиях является трудоёмкое устройство глубоких котлованов с монтажом шпунтового ограждения.

Так, для оптимизации работ по ограждению строительства

12. Лапидус, А. А. Применение риска-ориентированного подхода при выполнении функций строительного контроля техническим заказчиком / А. А. Лапидус, А. Н. Макаров // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 2. – С. 232–241.

пользовать в производственной деятельности крупных строительно-монтажных организаций, оптимизированную конструкцию оболочек можно использовать при возведении русовых опор мостов при определённых строительных условиях.

**Материалы и методы.** В эксперименте производится нагружение элементов оболочек с применением расчётов программ, давление принимается гидростатическим, производится анализ полученных результатов.

## Abstract.

**Object.** In modern Russia, where the implementation of national projects requires maximum efficiency, it is becoming especially important to select the optimal parameters of the main and auxiliary equipment used in all technological processes of construction production. One of their essential components of the construction processes in the construction of unique structures in difficult construction conditions is the installation of deep and labor-intensive excavation pits with the installation of tongue-and-groove fencing.

So, in order to optimize the work on fencing the construction of channel supports on the Volga River, the designers and builders decided to abandon the installation of a deep and labor-intensive foundation pit in a tongue-and-groove fence, instead, large-diameter round metal shells were developed, while the strength characteristics were not determined and the optimal thicknesses of

## Введение

На сегодняшний день по всей территории Российской Федерации широко ведётся строительство и реконструкция дорог, мостов и сопутствующей инфраструктуры. Одной из существенных составляющих этого процесса является возведение искусственных сооружений (мостов) в сложных строительных условиях с необходимостью трудоёмкого устройства глубоких котлованов с монтажом шпунтового ограждения, которое имеет ряд конструктивных и технологических особенностей [1]. При проектировании шпунтового ограждения из стальных элементов эффективность применения в каждом конкретном случае зависит от геологических, гидрогеологических, технологических и других условий строительной площадки [2].

На этапе отработки технологии сооружения опор мостового перехода через р. Волга (8-й этап строительства М-12) проектировщики и строители решили отказаться от трудоёмкого устройства глубокого котлована в шпунтовом ограждении. Совместно с подрядной организацией – производителем специализированных опалубочных систем – были разработаны круглые металлические оболочки большого диаметра, что соответствует современной тенденции применения готовых блочно-модульных изделий, отвечающей требованиям сокращения времени и стоимости строительства. Использование новых видов ограждений котлованов необходимо для уменьшения трудозатрат и времени на их устройство при работах нулевого цикла, а также это значительно удешевляет стоимость монтажа конструкций. Запроектированная металлическая оболочка – это вертикальная труба диаметром 10 м и высотой 20 м [3; 4].

Расчёчная нагрузка на оболочки от гидростатического давления аналогична работе под нагрузкой опалубки круглых колонн при бетонировании опор большой высоты (производился расчёт на гидростатическое давление), таким образом, можно было использовать опыт в проектировании и изготовлении специализированных опалубочных систем. При первоначальных прочностных расчётах были запроектированы оболочки со следующими характеристиками: толщина палубы 20 мм с шагом ребер в 1000 мм; не учитывался транспортный габарит, опускание в проектное положение предусматривалось с приме-

**Результаты.** В итоге эксперимента определены прочностные характеристики оптимизированной конструкции оболочек, по результатам оптимизации и проведённых прочностных расчётов конструкции снижена общая металлоёмкость оболочек в сборе и даны рекомендации по оптимизации технологии использования.

**Ключевые слова:** оболочка; прочность; гидростатическое давление; шпунтовое ограждение, глубокий котлован.

the variety used in the construction of the elements themselves were not selected, in this regard, the definition of The strength characteristics of the shells is an urgent task. Defined by

**Material and methods.** In the experiment, the shell elements are loaded using calculation programs, the pressure is assumed to be hydrostatic, and the results are analyzed.

**Results.** As a result of the experiment, the strength characteristics of the optimized shell design were determined, based on the results of optimization and strength calculations of the structure, the total metal consumption of the assembled shells was reduced and recommendations were given for optimizing the technology of use.

**Keywords:** floor formwork; formwork loads; frame scaffolding; frame formwork; concrete mix pressure; testing of construction equipment; reliability.

нением 2 кранов с повышенной грузоподъёмностью, не была точно определена технология крепления нижней (ножевой) секции оболочек.

## Материалы и методы

Объектом исследования стала разработанная конструкция оболочек (рисунок 1), сконструированная на основе опыта организации производителя специализированных опалубочных систем: за основу расчётов был взят опыт возведения опор высотой 12 м при реконструкции дублёра Кутузовского проспекта – на данном проекте использовался самоуплотняющийся бетон, расчётная нагрузка на опалубку составляла 18 т/кв. м, бетонирование

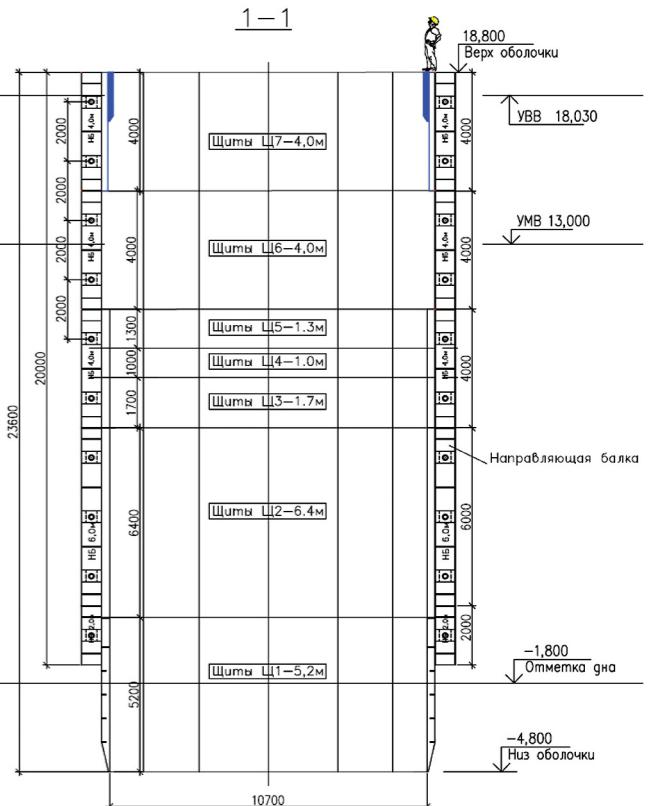


Рис. 1. Разработанное сечение оболочек  
Fig. 1. Developed shell cross section

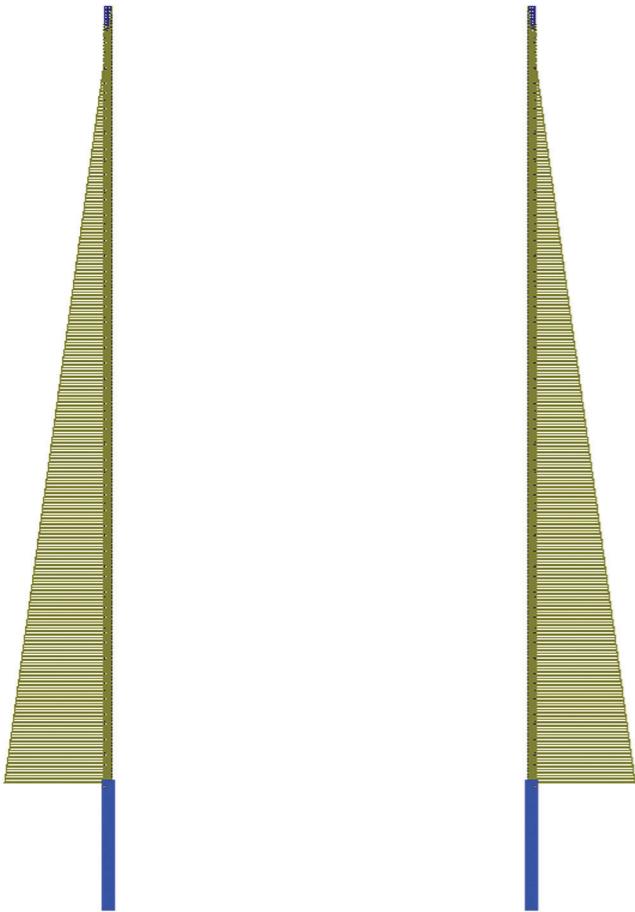


Рис. 2. Гидростатическая нагрузка на глубине 20 м – 20 т/кв. м  
Fig. 2. Hydrostatic load at a depth of 20 m – 20 t/sq. m

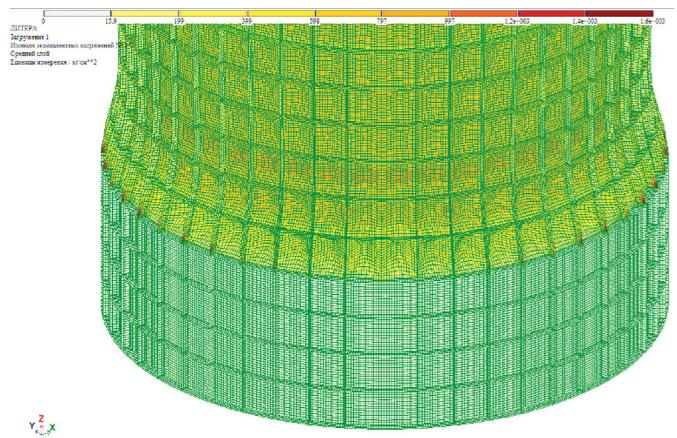


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в ножевом элементе оболочки (кг/кв. см, ЛИРА – САПР)  
Fig. 3. Distribution of equivalent stresses in the knife element of the shell (kg/sq. cm, LIRA - CAD)

колонны высотой 12 м производилось за 60 мин., данные сжатые сроки были обусловлены местонахождением строительного объекта. Была разработана конструкция оболочек со следующими характеристиками: принята палуба 10 мм, рёбра 12 мм, марка стали 09Г2С, шаг расположения горизонтальных рёбер – 0,8 м, шаг вертикальных рёбер – 0,7 м, произведена разбивка на новые сегменты (в первую очередь, для снижения общей металлоёмкости проекта и оптимизации транспортных габаритов).

В целях получения достоверных результатов и полной проверки несущей способности оболочек расчёт производился с применением двух расчётных программ: Лира (рисунки 3, 4) и SolidWorks. Давление на элементы оболочек принималось равным гидростатическим с треуголь-

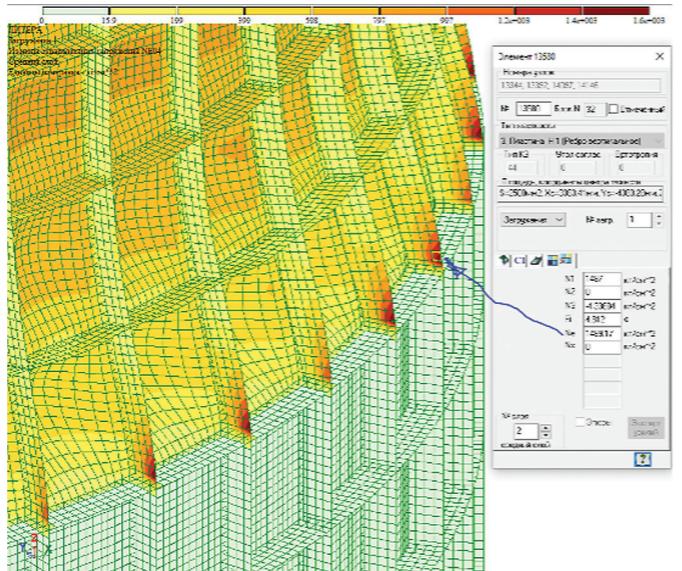


Рис. 4. Возникающее напряжение в рёбрах элементов 1490 кг/кв. см, что меньше допускаемого расчётного значения на изгиб/растяжение – 3365 кг/кв. см (для 09Г2С). Коэффициент запаса прочности – 2,2  
Fig. 4. The resulting stresses in the ribs of the elements are 1490 kg/sq. cm, which is less than the permissible design value for bending/stretching – 3365 kg/sq. cm (for 09G2C). Safety margin factor – 2.2

ной эпюорой (рисунок 2). Также необходимо отметить, что конструкция оболочек в нижней части имеет ножевой элемент, который задавливается на 3,0 м в дно (заделка в грунт).

На рисунках 5, 6, 7 моделируется нагрузка на элементы, показаны максимальные напряжения и перемещения. Результаты расчёта сопоставлены по абсолютным величинам и запасам [5] с учётом влияния статического напряженно-деформированного состояния, вызванного гидростатическим давлением [6]. Вероятность появления дефектов – это сложно формализуемый параметр, который зависит от многих факторов [7]. Технологическое проектирование предназначено для разработки оптимальных технологических решений и определения необ-

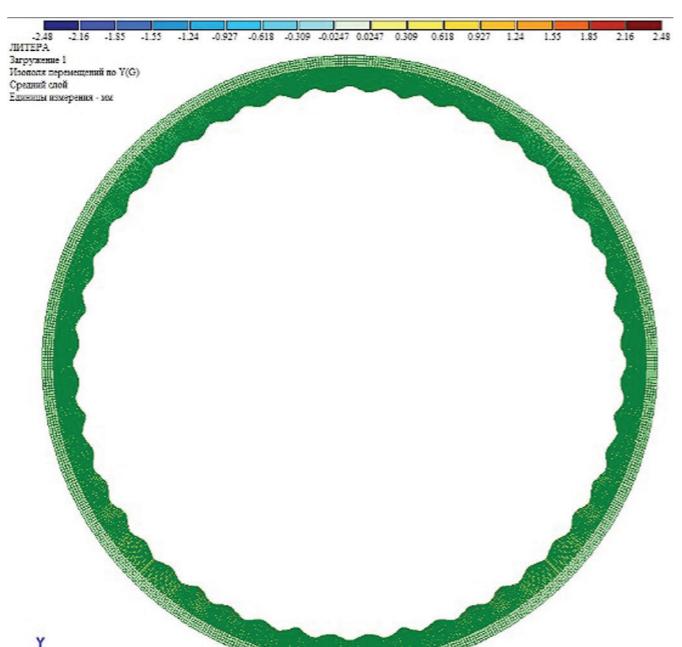


Рис. 5. Максимальные перемещения – 2,5 мм (ЛИРА – САПР)  
Fig. 5. Maximum displacement – 2.5 mm (LIRA – CAD)

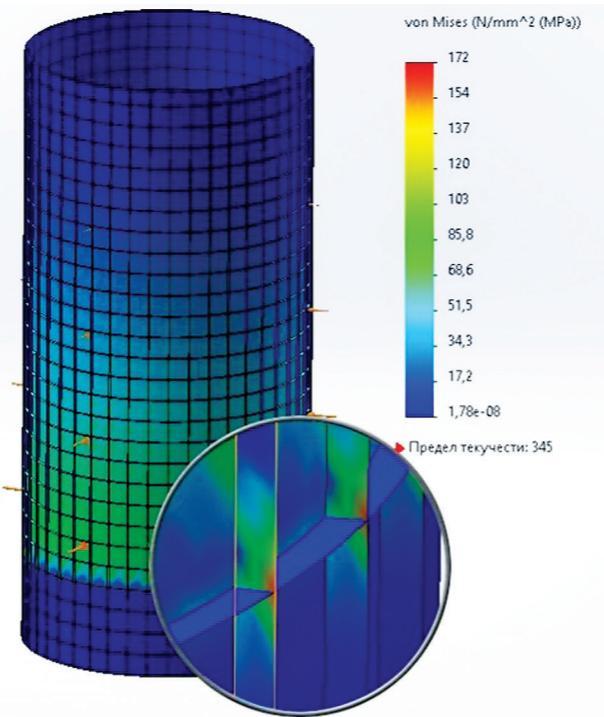


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений (кг/кв. см). Максимальные эквивалентные напряжения составляют 172 МПА (1720 кг/кв. см). Коэффициент запаса прочности – 2,0  
Fig. 6. Distribution of equivalent stresses (kg/sq. cm). The maximum equivalent stresses are 172 MPa (1720 kg/sq. cm). The safety margin coefficient is 2.0

ходимых организационных условий выполнения строительных процессов возведения сооружений в целом [8].

Аналогичные расчёты были произведены в программе SolidWorks.

### Результаты

Результатами испытаний проверки несущей способности явились данные, которые показывают, что наибольшие эквивалентные напряжения возникают в вертикальных рёбрах на самом нижнем уровне (отметке дна). При этом максимальные напряжения составляют 1490–1720 кг/кв. см, что ниже допускаемого расчётного значения для стали марки 09Г2С – 33665 кг/кв. см. Таким образом, прочность обеспечена в соответствии с СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». Коэффициент запаса прочности – 2,0, что подтверждается проведёнными расчётами в 2 программных комплексах. Также можно отметить, что во всех случаях каждое новое нагружение цикла начинается с остаточного прогиба от предыдущего нагружения. Это свидетельствует о том, что при непрерывном цикле «нагружение – разгружение» система (конструкция) не успевает вернуться в исходное положение [9; 10].

Анализируя полученные данные, можно отметить, что в процессе проверки несущей способности подтвердили, что оптимизированные оболочки обладают соответствующей жёсткостью для восприятия заданных нагрузок – решение по изменению применяемых толщин металла явилось правильным с точки зрения прочностных и технико-экономических факторов. Также в процессе моделирования нагрузок был проведён сравнительный анализ технологий сварки на основе расчёта относительных и аддитивных коэффициентов качества, в результате чего принято решение о применении сплошных сварочных швов (взамен прерывистых) с применением ультразвукового контроля качества, что обеспечит дополнительный

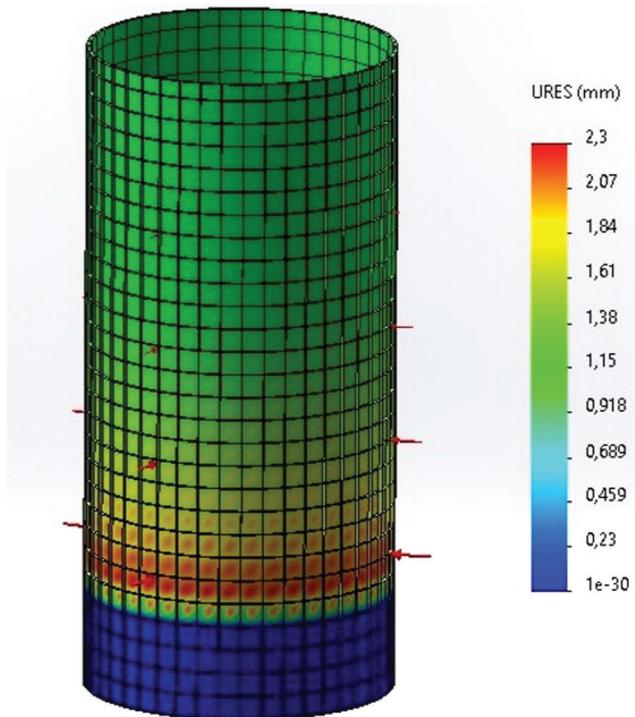


Рис. 7. Гидростатическая нагрузка на глубине 20 м – 20 т/кв. м. Максимальное перемещение – 2,3 мм  
Fig. 7. Hydrostatic load at a depth of 20 m – 20 t/sq. m. Maximum displacement – 2.3 mm



Рис. 8. Сборка оболочек на объекте  
Fig. 8. Assembling shells on an object

запас прочности для конструкции в целом; также было принято решение о замене стандартного крепежа на высокопрочный с контролем момента натяжения. Необходимо отметить, что в данных эксплуатационных условиях несущий элемент – находящееся в статическом или динамическом равновесии твёрдое тело, воспринимающее воздействие и реакции связей с другими телами [11–12].

Проведённый эксперимент подтверждает факт того, что высокая надёжность, адаптивность и безопасность являются основными характеристиками современных систем. Для строителей, использующих различное оборудование, порой его параметры более значимы, чем параметры конструкций. Если говорить об основных характеристиках системы, то здесь следует пользоваться формулой «цена плюс качество» [13].

### Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы: проведённый прочностной расчёт показал, что при применении элементов оболочек с меньшей толщиной палубы, но с большим количеством рёбер сохраняются заданные прочностные характеристики конструкции в целом (оболочки на объекте на рисунке 8).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Чунюк, Д. Ю. Эффективность применения шпунтов ПВХ и стальных шпунтов Larsen по сравнению с традиционной «стеной в грунте» / Д. Ю. Чунюк, Н. О. Курилин // Научное обозрение. – 2015. – № 16.
- Теличенко, В. И. Технология возведения зданий и сооружений / В. И. Теличенко, О. М. Терентьев, А. А. Лапидус. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 2004. – 225 с.
- Пак, С. Моделирование динамической устойчивости тонкостенных конструкций, частично заполненных жидкостью, при гидростатическом воздействии / С. Пак, В. Г. Григорьев // Математическое моделирование и численные методы. – 2022. – № 3. – С. 3–17.
- Марголин, А. И., Применение холодногнутых стальных шпунтов / А. И. Марголин, С. С. Кубрин // Транспортное дело России. – 2020. – № 2. – С.191–193.
- Устройство шпунтового ограждения котлована и подпорных стен в сложных гидрогеологических условиях городской застройки / Н. И. Тарасеева, К. А. Андрианов, М. С. Хрипунова, А. Б. Антонов // Моделирование и механика конструкций. – 2020. – № 12. – С. 178–186.
- Емельяненко, А. А. Сравнительный анализ норм и результатов расчёта цилиндрической оболочки при воздействии наружного гидростатического давления / А. А. Емельяненко, Е. Ю. Субочева // Известия Волгоградского государственно-
- го технического университета. – 2022. – № 1 – С. 9–13.
- Носков, И. В. Шпунтовые ограждения с применением стальных элементов / И. В. Носков, К. А. Вагнер // Ползуновский альманах. – 2017. – № 2. – С.193–196.
- Чкалова, М. В. Оптимизация выбора сварочной технологии в трубопроизводстве / М. В. Чкалова, А. А. Кистанов // Научное обозрение. Технические науки. – 2025. – № 1. – С. 27–31.
- Фридкин, В. М. Формообразование строительных конструкций : монография / В. М. Фридкин ; Министерство образования и науки РФ, МГСУ. – Москва, 2011. – 172 с.
- Круглый стол. Современные опалубочные системы как фактор обеспечения качества и надёжности строительных объектов / М. В. Воловик, М. Н. Ершов, А. В. Ишин, О. П. Лянг, Д. К. Туманов, А. А. Лапидус, О. А. Фельдман, М. Е. Лейбман, В. И. Теличенко // Технология строительного производства. – 2013. – № 1. – С. 14–18.
- Falsework – Performance requirements and general design; German version EN 12812:2004 : DIN EN 12812 – 2004 : Date of rate 01.09.2004. – Germany, 2004. – 48 p.
- Макаров, А. Н. Априорные риски строительных процессов в системе контроля качества / А. Н. Макаров // Строительное производство. – 2022. – № 4. – С. 29–33.
- Peurifoy, R. L. Formwork for concrete structures / R. L. Peurifoy. – The McGraw-Hill Company, 2011. – 358 p.

## REFERENCES

- Chunyuk, D. Y. Ehffektivnost' primeneniya shpuntov PVKH i stal'nykh shpuntov Larsen po sravneniyu s traditsionnoj «stenoj v grunte» [The effectiveness of using PVC sheet piles and Larsen steel sheet piles in comparison with the traditional "wall in the ground"] / D. Y. Chunyuk, N. O. Kurilin // Nauchnoe obozrenie [Scientific review]. – 2015. – No. 16.
- Telichenko, V. I. Tekhnologiya vozvedeniya zdanij i sooruzhenij [Technology of construction of buildings and structures / V. I. Telichenko, O. M. Terentyev, A. A. Lapidus. – 2nd ed., reprint. and add. – Moscow : Higher School, 2004. – 225 p.
- Pak, S. Modelirovanie dinamicheskoy ustojchivosti tonkostennykh konstruktsij, chastichno zapolnennykh zhidkost'yu, pri gidrostaticeskem vozdejstvii [Modeling of dynamic stability of thin-walled structures partially filled with liquid under hydrostatic influence] / S. Pak, V. G. Grigoriev // Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody [Mathematical modeling and numerical methods]. – 2022. – No. 3. – Pp. 3–17.
- Margolin, A. I. Primenenie kholodnognutnykh stal'nykh shpuntov [Application of cold-bent steel dowels] / A. I. Margolin, S. S. Kubrin // Transportnoe delo Rossii [Transport business of Russia]. – 2020. – No. 2. – Pp. 191–193.
- Taraseeva, N. I. Ustrojstvo shpuntovogo ogradzheniya kotelvana i podpornykh sten v slozhnykh gidrogeologicheskikh usloviyakh gorodskoj zastroyki [The device of tongue-and-groove fencing of excavation and retaining walls in difficult hydrogeological conditions of urban development] / N. I. Taraseeva, K. A. Andrianov, M. S. Khrupunova, A. B. Antonov // Modelirovanie i mekhanika konstruktsij [Modeling and mechanics of structures]. – 2020. – No. 12. – Pp. 178–186.
- Emelianenko, A. A. Sravnitel'nyj analiz norm i rezul'tatov raschyota tsilindricheskoy obolochki pri vozdejstvii naruzhnogo hidrostaticeskogo davleniya [Comparative analysis of the norms and results of calculating a cylindrical shell under the influence of external hydrostatic pressure] / A. A. Emelianenko,
- E. Y. Subocheva // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of the Volgograd State Technical University]. – 2022. – No. 1 – Pp. 9–13.
- Noskov, I. V. Shpuntovye ogradzheniya s primeneniem stal'nykh ehlementov [Tongue-and-groove fences using steel elements] / I. V. Noskov, K. A. Wagner // Polzunovskij al'manakh [Polzunovsky Almanac]. – 2017. – No. 2. – Pp. 193–196.
- Chkalova, M. V. Optimizatsiya vybora svarochnoj tekhnologii v truboproizvodstve [Optimization of the choice of welding technology in pipe production] / M. V. Chkalova, A. A. Kistanov // Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki [Scientific review. Technical sciences]. – 2025. – No. 1. – Pp. 27–31.
- Fridkin, V. M. Foromoobrazovanie stroitel'nykh konstruktsij : monografiya [Shaping of building structures: a monograph] / V. M. Fridkin ; Ministry of Education and Science of the Russian Academy of Sciences ; MGSU. – Moscow, 2011. – 172 p.
- Kruglyj stol. Sovremennye opalubochnye sistemy kak faktor obespecheniya kachestva i nadyozhnosti stroitel'nykh ob'ektov [The round table. Modern formwork systems as a factor in ensuring the quality and reliability of construction facilities] / M. V. Volovik, M. N. Yershov, A. V. Ishin, O. P. Liang, D. K. Tumanov, A. A. Lapidus, O. A. Feldman, M. E. Leibman, V. I. Telichenko // Tekhnologiya stroitel'nogo proizvodstva [Technology of construction production]. – 2013. – No. 1. – Pp. 14–18.
- Falsework – Performance requirements and general design; German version EN 12812:2004 : DIN EN 12812 – 2004 : Date of rate 01.09.2004. – Germany, 2004. – 48 p.
- Makaro, A. N. Apriornye riski stroitel'nykh protsessov v sisteme kontrolya kachestva [A priori risks of construction processes in the quality control system] / A. N. Makarov // Stroitel'noe proizvodstvo [Construction production]. – 2022. – No. 4. – Pp. 29–33.
- Peurifoy, R. L. Formwork for concrete structures / R. L. Peurifoy. – The McGraw-Hill Company, 2011. – 358 p.

## УДК 620.174

## Болтовые соединения элементов конструкций из алюминиевых сплавов

Bolted Joints of Structural Elements Made of Aluminum Alloys

Коргин Андрей Валентинович

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Испытания сооружений», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, korguine@mgsu.ru

Korgin Andrey Valentinovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Testing Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, korguine@mgsu.ru

## Аннотация.

**Введение.** В настоящее время конструкции из современных алюминиевых сплавов вследствие их уникальных физико-механических свойств находят все большее применение во всех сферах строительного производства, что позволяет создавать эффективные по весовым, прочностным и эстетическим параметрам конструкции разнообразного назначения с высокой коррозионной стойкостью по сравнению со стальными конструкциями, в частности, при строительстве пешеходных и автомобильных мостов. Однако использование высокопрочных стальных болтов при сборке и монтаже конструкций из алюминиевых сплавов осложняется электрохимическим коррозионным взаимодействием алюминия и стали, затрудняющим разборку и ремонт соединений. Наиболее эффективным способом преодоления данной проблемы является использование высокопрочных болтов из алюминиевых сплавов, исключающих данный вид коррозии в болтовых соединениях. Также достаточно эффективным решением при применении стальных высокопрочных болтов является использование промежуточных стальных пружинных вставок.

**Материалы и методы.** Наиболее распространённым типом болтовых соединений конструкций из алюминиевых сплавов является использование высокопрочных болтов из нержавеющих и оцинкованных сталей. Из-за различий электрохимических потенциалов стали и алюминия в ходе эксплуатации последний корродирует, образуя окисные соединения, препят-

## Abstract.

**Introduction.** Currently, structures made of modern aluminum alloys, due to their unique physical and mechanical properties, are increasingly being used in all areas of construction production, which makes it possible to create structures of various purposes that are effective in terms of weight, strength and aesthetic parameters with high corrosion resistance compared to steel structures, in particular, in the construction of pedestrian and highway bridges. However, the use of high-strength steel bolts in the assembly and installation of aluminum alloy structures is complicated by the electrochemical corrosive interaction of aluminum and steel, which makes it difficult to disassemble and repair joints. The most effective way to overcome this problem is to use high-strength bolts made of aluminum alloys that eliminate this type of corrosion in bolted joints. Also, one of the most effective solutions for the use of high-strength steel bolts is the use of intermediate steel spring inserts.

**Materials and methods.** The most common type of bolted joints of aluminum alloy structures is the use of high-strength bolts made of stainless and galvanized steels. Due to differences in the electrochemical potentials of steel and aluminum during

ствующие подтяжке и разборке болтовых соединений, требуемых при эксплуатации и ремонте конструкций. При применении болтов из алюминиевых сплавов 6xxx и 7xxx серий с высокой прочностью данная проблема не возникает. При необходимости использования стальных высокопрочных болтов в узлах с резьбой в теле алюминиевых конструктивных элементов эффективным решением является использование промежуточных стальных пружинных вставок, устраняющих прямой контакт стального болта с конструктивным элементом, что применено при строительстве в Нижегородской области первого в РФ автомобильного моста из алюминиевых сплавов.

**Результаты.** Проведён анализ прочности высокопрочных болтов из различных алюминиевых сплавов и конструктивных решений при использовании стальных пружинных вставок при соединении элементов алюминиевых конструкций стальными высокопрочными болтами.

**Выводы.** Наиболее эффективным способом болтовых соединений алюминиевых конструкций является использование высокопрочных болтов из алюминиевых сплавов, полностью устраняющих проблемы коррозии соединений. В соединениях с использованием высокопрочных болтов из нержавеющих или оцинкованных сталей следует использовать стальные пружинные вставки.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав; высокопрочный болт; нержавеющая сталь; мост; электрохимическая коррозия; стальная пружинная вставка.

operation, the latter corrodes, forming oxide compounds that prevent the tightening and disassembly of bolted joints required during operation and repair of structures. This problem does not arise when using bolts made of aluminum alloys of the 6xxx and 7xxx series with high strength. If it is necessary to use high-strength steel bolts in threaded assemblies in the body of aluminum structural elements, an effective solution is to use intermediate steel spring inserts that eliminate direct contact of the steel bolt with the structural element, which was used in the construction of the first aluminum alloy road bridge in the Nizhny Novgorod region.

**Results.** The analysis of the strength of high-strength bolts made of various aluminum alloys and design solutions when using steel spring inserts when connecting elements of aluminum structures with high-strength steel bolts is carried out.

**Conclusions.** The most effective way to bolt aluminum structures is to use high-strength bolts made of aluminum alloys, which completely eliminate the problems of joint corrosion. Steel spring inserts should be used in joints using high-strength bolts made of stainless or galvanized steels.

**Keywords:** aluminum alloy; high-strength bolt; stainless steel; bridge; electrochemical corrosion; steel spring insert.

## Введение

В настоящее время в экономике многих стран мира, включая Россию, в связи с ростом количества автотранспорта, его грузоподъёмности и интенсивности использования наблюдается устойчивая тенденция роста объёмов дорожного строительства и реконструкции существующей дорожной инфраструктуры, включая строительство мостов и путепроводов. При этом в целях экономической целесообразности и сроков сокращения строительства, наряду с использованием традиционных решений мостовых сооружений из стали и железобетона, расширяется применение новых для мостостроения материалов, таких как алюминиевые сплавы и полимерные материалы [1–3].

Мостовые сооружения из современных алюминиевых сплавов находят всё большее применение при строительстве и реконструкции дорожной инфраструктуры, что является следствием уникальных физико-механических свойств алюминиевых сплавов, позволяющих создавать эффективные по весовым, прочностным и эстетическим параметрам элементы мостовых конструкций, обладающие при этом повышенной коррозионной стойкостью по сравнению со стальными конструкциями. Сочетание подобных уникальных свойств алюминиевых сплавов оказалось крайне востребованным в мостостроении: изначально при строительстве самых разнообразных пешеходных мостов, а в последнее время всё чаще и при возведении автодорожных мостов [4–7].

Однако при сборке и монтаже конструкций из алюминиевых сплавов использование на строительной площадке аргонодуговой сварки для сварных соединений конструкционных элементов запрещено нормативной документацией вследствие сложности создания стабильных условий газообеспечения сварных зон, что приводит к значительному разбросу прочностных параметров соединения [8].

По этой причине наиболее распространённым и предпочтительным типом соединений конструктивных элементов и конструкционных блоков из алюминиевых сплавов в условиях строительных площадок являются соединения высокопрочными стальными болтами из нержавеющих сталей или из высокопрочных сталей с оцинкованным или электрохимическим покрытием. Однако со временем, после относительно небольшого периода эксплуатации, данные болтовые соединения неизбежно оказываются подвержены коррозионному взаимодействию алюминиевого сплава с высокопрочной сталью, приводящему к деградации алюминиевого сплава в этой зоне и не позволяющему в дальнейшем подтягивать или разборку болтового соединения.

Наиболее эффективным способом преодоления данной проблемы является использование высокопрочных болтов из алюминиевых сплавов, исключающих данный вид коррозии в болтовых соединениях. Также достаточно эффективным решением при применении стальных высокопрочных болтов является использование промежуточных стальных пружинных вставок.

## Материалы и методы

### Причины электрохимической коррозии

Коррозионное взаимодействие сталь–алюминий является следствием разности их электрохимических потенциалов, где алюминиевый сплав конструкционного

элемента является анодом и выступает своего рода защитником стального болта, являющегося катодом, образуя в зоне соприкосновения довольно жёсткое окисное соединение [9]. Образующийся окисел сам по себе является довольно прочным материалом, и попытка раскручивания соединения часто приводит к разрушению болта от среза или повреждению его шестигранной головки. Таблица электрохимических потенциалов основных металлов и их сплавов представлена на рисунке 1 [10].

Из таблицы видно, что расположение в верхней части таблицы алюминиевых сплавов обуславливает их функцию разрушающегося анода – защитника большинства других металлов и сталей, являющихся катодом в электрохимическом соединении.

### Методы устранения электрохимической коррозии

Для мостовых сооружений, в том числе из алюминиевых сплавов, испытывающих многократные циклические воздействия от эксплуатационных нагрузок и от температурных перепадов, необходимость подтяжки болтовых соединений является обязательным элементом регламентных работ, проводящихся в ходе эксплуатации по установленным графикам. Это вынуждает проводить специальные мероприятия по восстановлению эксплуатационной пригодности подвергнувшихся коррозии болтовых соединений [11].

В частности, одним из наиболее распространённых видов узлов в конструкциях мостов из алюминиевых сплавов являются узлы крепления ортотропных плит дорожного полотна к несущим балкам и прогонам дорожного строения (рисунок 2), которые позволяют не только осуществлять крепление плит к несущему каркасу моста, но и включить довольно жёсткие и прочные плиты данного

0.2 0 -0.2 -0.4 -0.6 -0.8 -1.0 -1.2 -1.4 -1.6

Металл/сплав	Потенциал (отрицательные)	Потенциал (положительные)
Магний	-0.8	0.2
Цинк	-0.7	0.3
Бериллий	-0.6	0.4
Алюминиевые сплавы	-0.5	0.5
Кадмий	-0.4	0.6
Железо, чугун	-0.3	0.7
Низколегированная сталь	-0.2	0.8
Аустенитный чугун	-0.1	0.9
Алюминиевая бронза	0.0	1.0
Морская латунь, желтая и красная латунь	0.1	1.1
Олово	0.2	1.2
Медь	0.3	1.3
Свинцово оловянный припой 50/50	0.4	1.4
Адмиралтейская латунь, алюминиевая латунь	0.5	1.5
Марганцевая бронза	0.6	1.6
Кремниевая бронза	0.7	1.7
Нержавеющая сталь 410, 416	0.8	1.8
Серебряно никелевый сплав	0.9	1.9
Медь никелевый сплав 90/10	1.0	2.0
Медь никелевый сплав 80/20	1.1	2.1
Нержавеющая сталь 430	1.2	2.2
Свинец	1.3	2.3
Медь никелевый сплав 70/30	1.4	2.4
Алюминий бронза никелевый сплав	1.5	2.5
Хромо никелевый сплав	1.6	2.6
Никель 200	1.7	2.7
Серебро	1.8	2.8
Нержавеющая сталь 302, 304, 321, 347	1.9	2.9
Медь никелевые сплавы K400, K500	2.0	3.0
Нержавеющая сталь 316, 317	2.1	3.1
Нержавеющая сталь сплав 20	2.2	3.2
Железо хромо никелевый сплав	2.3	3.3
Титан	2.4	3.4
Золото, платина	2.5	3.5
Графит	2.6	3.6

Рис. 1. Таблица электрохимических потенциалов металлов и сплавов  
Fig. 1. Table of electrochemical potentials of metals and alloys

типа в работу пролётного строения. Это даёт возможность более эффективно использовать несущую способность всех конструктивных элементов моста и уменьшить при этом расход материалов на несущие мостовые конструкции [12].

Как отмечалось выше, со временем в соединительном узле «конструктивный элемент из алюминиевого сплава – высокопрочный болт из нержавеющей или оцинкованной стали» в контактной зоне алюминиевого сплава и стали начинается электрохимическая коррозия, что затрудняет, а далее приводит и к разрушению болта при попытках восстановить усилие затяжки болта или разборку соединения.

Наиболее очевидным решением данной проблемы является использование высокопрочных болтов из алюминиевых сплавов, изготовление которых в последнее время с появлением высокопрочных алюминиевых сплавов принимает довольно распространённый характер. В целом данный вид болтов несколько уступает по прочности и усталостной выносливости стальным высокопрочным болтам, однако данный недостаток легко устраняется увеличением размеров болтов либо увеличением их количества в конкретном соединении [13–16]. Основным же их достоинством является полное отсутствие электрохимической коррозии в соединениях данного типа, что позволяет производить подтяжку или разборку болтовых соединений в ходе регламентных работ на мостовых сооружениях из алюминиевых сплавов.

Кроме того, болты из алюминиевых сплавов для мостостроения, в отличие от болтов для машиностроения и авиастроения, должны иметь повышенную в сравнении с большинством сплавов деформативность, что ограничивает выбор алюминиевых сплавов для производства высокопрочных болтов, используемых в строительстве.

Использование заклёпок из высокопрочных алюминиевых сплавов при сборке мостовых сооружений практически не применяется также из-за невозможности в дальнейшем контролировать усилие натяжения в заклёпке, ослабевающее в ходе эксплуатации [17].

Ещё одним актуальным решением в отсутствие высокопрочного алюминиевого крепежа является использование стальных пружинных вставок (рисунок 3), пре-

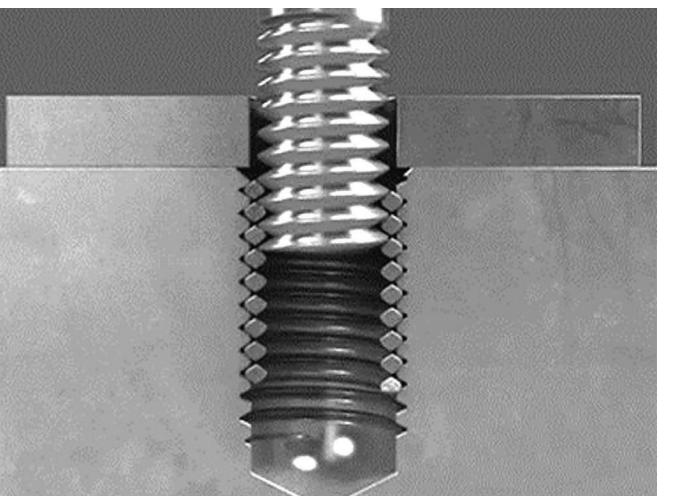


Рис. 3. Стальная пружинная вставка соединения алюминиевых элементов стальным болтом  
Fig. 3. Steel spring insert for connecting aluminum elements with a steel bolt

пятствующих непосредственному соприкосновению поверхностей стального болта и отверстия в конструктивном элементе из алюминиевого сплава, что позволяет производить подтяжку и разборку соединения, по факту представляющего собой контакт «сталь по стали». Электрохимическая коррозия будет происходить по поверхности контакта пружинной вставки и отверстия в элементе из алюминиевого сплава и практически не будет затрагивать соприкасающиеся поверхности болта и вставки. Данного типа соединения также имеет преимущество, когда при одностороннем доступе отсутствует возможность использовать пару «болт–гайка», применяя в качестве последней тело самого конструктивного элемента, в котором предварительно выполнена нарезка соответствующей резьбы под пружинную вставку.

## Результаты

### Материалы для болтовых соединений из алюминиевых сплавов

Алюминиевый болт представляет собою вид строительного крепежа (метиза), выполненного из достаточно прочных алюминиевых сплавов. В чистом виде алюминий обладает весьма мягкой структурой, поэтому для повышения прочности используются его сплавы с другими материалами, в том числе с медью, магнием, марганцем, силиконом и др.

Основными преимуществами алюминиевых сплавов для изготовления крепёжных изделий являются его малый вес, большая лёгкость обработки и устойчивость к коррозии, и именно благодаря своим антикоррозийным свойствам алюминиевые болты оказались весьма востребованными в соединениях конструкций из алюминиевых сплавов.

С другой стороны, по сравнению со стальным высокопрочным крепежом болты из алюминиевых сплавов обладают в целом более низкой прочностью и сопротивляемостью усталостным воздействиям, но данные недостатки устраняются применением болтов большего диаметра или увеличением их количества.

Преимущества крепежа из алюминиевых сплавов для мостовых сооружений:

- лёгкий вес (в 3 раза легче стали);
- высокая коррозийная устойчивость в условиях повышенной влажности, присутствия растворов солей

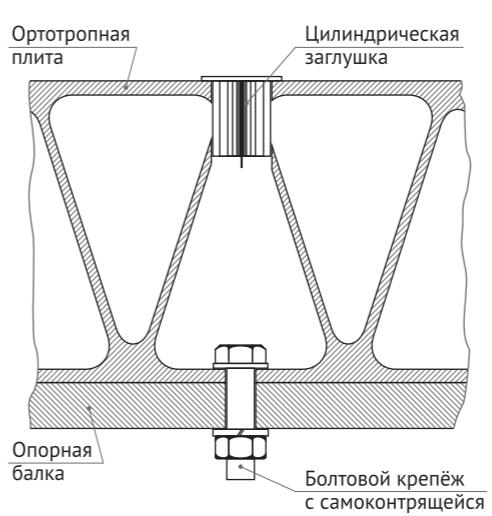


Рис. 2. Узел болтового крепления ортотропной плиты дорожного настила к верхнему поясу несущей балки  
Fig. 2. The assembly of bolted fastening of the orthotropic pavement plate to the upper belt of the load-bearing beam

- и химических элементов и агрессивных атмосферных газов;
- технологическая простота механической обработки за счёт невысокой плотности даёт возможность делать из алюминиевых сплавов крепежи разнообразной формы;
  - низкая плавильная температура, упрощающая процесс изготовления крепежа;
  - отсутствие необходимости дополнительной поверхностной обработки, что удешевляет стоимость производства, и привлекательный внешний вид;
  - при понижении температуры прочность крепежа возрастает;
  - устойчивость к горению и вибрациям;
  - способность переносить разнообразные деформации благодаря пластичности и хорошей ударной вязкости алюминиевых сплавов, предназначенных для изготовления крепежа;
  - более низкая стоимость по сравнению со стальным крепежом.

При проектировании болтовых соединений в алюминиевых конструкциях с болтами из алюминиевых сплавов необходимо учитывать следующие особенности:

- повышенное давление на поверхность алюминия при затяжке болтового соединения устраняется путём установки под головку и гайку шайб увеличенного размера из алюминиевого сплава повышенной прочности;
- в алюминиевых конструкциях, испытывающих многократные циклические воздействия, таких как мостовые сооружения, происходит ослабление затяжки болтовых соединений и её последующее восстановление, при этом резьба в алюминиевом компоненте испытывает повышенный износ, что устраняется установкой пружинных вставок;
- в болтовых соединениях, подверженных длительным воздействиям влаги, необходимо предусматривать мероприятия по герметизации и влагоудалению.

Изготовление компонентов высокопрочного болтового крепежа (болты, гайки, шайбы) из алюминиевых сплавов в РФ производится в соответствии с ГОСТ 5927-70 либо международными аналогами DIN 934; DIN 555; ISO 4034; ISO 4032; ISO 8673.

Наиболее распространёнными алюминиевыми сплавами для изготовления высокопрочного крепежа являются сплавы серий 6xxx и 7xxx [19–23].

Крепёж из алюминиевого сплава 7075 сочетает в себе высокую прочность и малый вес. Легированный в основном цинком, он проявляет прочность, сравнимую со многими марками стали. Сплав 7075 может быть отпущен до нескольких различных условий (включая 7075 - T6), что обеспечивает различные уровни прочности. Болты из сплава 7075 используются в конструкциях, работающих при высоких напряжениях, обладают хорошей усталостной прочностью и ударной вязкостью.

Сплавы серии 6xxx, в частности сплавы 6061 и 6082, используемые преимущественно для изготовления элементов конструкций, но и также для изготовления крепежа, обеспечивают лучшую коррозионную стойкость и обрабатываемость, но не обладают такой же высокой прочностью, как крепёж из сплава 7075.

Одним из лучших вариантов для изготовления высокопрочных болтов из алюминиевых сплавов 7xxx серии является сплав, защищённый патентом [24]. В его состав по массе, кроме алюминия, входят:

- от 1,0 до 1,7 % кремния (Si),
- от 0,05 до 0,5 % железа (Fe),
- от 0,8 до 1,5 % меди (Cu),
- от 0,6 до 1,2 % магния (Mn),
- от 0,9 до 1,5 % марганца (Mg),
- от 0,05 до 0,5 % цинка (Zn),
- от 0,05 до 0,3 % циркония (Zr),
- от 0,01 до 0,2 % ванадия (V),
- при необходимости, не более 0,05 % титана (Ti),
- при необходимости, не более 0,7 % никеля (Ni).

Подобный химический состав алюминиевого сплава, получаемого в процессе плавления, обладает достаточно высокой механической прочностью (предел прочности при растяжении от 450 до 500 МПа в зависимости от последующего способа повышения прочности – искусственного старения, ковкости), стойкостью к коррозионному растрескиванию под напряжением, достаточной жаропрочностью, хорошей ковкостью, что позволяет производить из него высокопрочные болты с хорошими свойствами по выносливости при повторных нагрузлениях, что делает их сопоставимыми по свойствам со стальными высокопрочными болтами, но полностью свободными от электрохимической коррозии в конструкционных соединениях из алюминиевых сплавов.

На сегодняшний день в России пока ещё нет примеров использования высокопрочных болтов из алюминиевых сплавов при строительстве пешеходных и автодорожных алюминиевых мостов ввиду отсутствия опыта изготовления и использования высокопрочных болтов из сплавов серий 6xxx и 7xxx. Болтовые крепления осуществляются, в основном, с помощью высокопрочных стальных болтов с цинковым или электрохимическим покрытием. Однако при строительстве первого в стране автодорожного моста из алюминиевых сплавов через реку Линда в Борском округе Нижегородской области (рисунок 4), введённого в эксплуатацию в декабре 2024 г., помимо классических болтовых соединений, в частности узлов крепления ортотропных плит к несущим балкам (рисунок 2), впервые были широко использованы стальные пружинные вставки (рисунок 3), в значительной степени устраняющие проблему электрохимической коррозии в зонах болтовых соединений [1; 18].



Рис. 4. Автодорожный мост из алюминиевых сплавов через реку Линда в Нижегородской области

Fig. 4. Aluminum alloy road bridge across the Linda River in the Nizhny Novgorod region

## Заключение

1. Наиболее эффективным способом устройства болтовых соединений алюминиевых конструкций является использование высокопрочных болтов из алюминиевых сплавов, полностью устраняющих проблемы электрохимической коррозии соединений.

2. Наиболее подходящими для изготовления высокопрочного крепежа из алюминиевых сплавов являются

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коргин, А. В. Первый в Российской Федерации автодорожный мост из алюминиевых сплавов / А. В. Коргин, Е. В. Васильев, О. Г. Маслов. – DOI 10.22227/2305-5502.2024.3.6-27 // Строительство: наука и образование. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 6–27.
2. Коргин, А. В. Автодорожные мосты из алюминиевых сплавов в России / А. В. Коргин // Мир дорог. – 2021. – № 141. – С. 97–99.
3. Strength of aluminum alloys for bridge building / A. V. Korgin, P. D. Odesskiy, V. A. Ermakov, L. Z. Kilani, V. A. Romanets, E. A. Koroleva. – DOI 10.1134/S003602952004014X // Russian Metallurgy (Metally). – 2020. – № 4. – Рр. 373–382.
4. Бородкина, В. В. Перспективы развития алюминиевого производства в России / В. В. Бородкина, О. В. Рыжова, Ю. В. Улас. – DOI 10.17513/fr42354 // Фундаментальные исследования. – 2018. – № 12 (ч. 1). – С. 72–77.
5. Перспективы и проблемы применения алюминиевых сплавов при строительстве мостов в РФ / А. В. Коргин, В. А. Романец, В. А. Ермаков, Л. З. Зейд Килани. – DOI 10.12737/article\_5bab4a1a42eee3.23235487 // Вестник БГТУ. – 2018. – № 9. – С. 42–48.
6. Road and pedestrian bridges in aluminium : Report on visits to Sweden, Holland, and the United States / Aluminum Association of Canada. – Ottawa, 2015. – 56 р.
7. Гросу, Р. А. Перспективы применения сталеалюминиевых конструкций в мостостроении / Р. А. Гросу // Перспективные материалы в строительстве и технике (ПМСТ-2014) : Материалы Международной научной конференции молодых учёных, Томск, 15–17 октября 2014 года. – Томск : Изд-во ТГУАС, 2014. – С. 383–390.
8. Мосты с конструкциями из алюминиевых сплавов. Правила проектирования : Свод правил СП 443.1325800.2019 : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 апреля 2019 г. № 251/пр и введён в действие с 31 октября 2019 г. / Минстрой России. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 59 с.
9. Влияние коррозионной среды на свойства фрикционного соединения листов сплава 6082-T6 / А. Г. Катанина, А. Н. Шувалов, О. А. Корнев, Е. В. Соколова. – DOI 10.32683/0536-1052-2022-764-8-102-118 // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2022. – № 8 (764). – С. 102–118.
10. Patton, G. Aluminum Orthotropic : Desk Research Report / G. Patton. – Florida : Archive Florida Department of Transportation, 2017. – 52 р.
11. Коргин, А. В. Расчёт мостовых конструкций из алюминиевых сплавов на выносливость / А. В. Коргин. – DOI 10.22227/2305-5502.2022.2.3 // Строительство: наука и образование. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 31–49.
12. Коргин, А. В. Включение ортотропных плит настила в работу несущих конструкций мостов из алюминиевых сплавов / А. В. Коргин, В. А. Ермаков, Л. З. Зейд Килани. – DOI 10.22227/1997-0935.2022.7.882-896 // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 7. – С. 882–889.
13. Кунин, Ю. С. Расчёты и проектирование фрикционных соединений алюминиевых конструкций. Проблемы и пути решения / Ю. С. Кунин, А. А. Синеев. – DOI 10.54950/26585340-2022-2-72 // Строительное производство. – 2022. – № 2. – С. 72–76.
14. Кунин, Ю. С. Несущая способность фрикционных соединений алюминиевых конструкций / Ю. С. Кунин, А. А. Синеев. – DOI 10.33622/0869-7019.2020.12.82-85 // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 12. – С. 82–85.
15. Кунин, Ю. С. Особенности расчёта и конструирования фрикционных соединений алюминиевых конструкций / Ю. С. Кунин, А. А. Синеев // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования : Сборник докладов Первой Национальной конференции, Москва, 30 сентября 2020 года. – Москва : МГСУ, 2020. – С. 95–102.
16. Синеев, А. А. Несущая способность винтовых (болтовых) соединений элементов алюминиевых конструкций / А. А. Синеев // Функция, конструкция, среда в архитектуре зданий : Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-практической конференции : в 2-х томах. Том 1, Москва, 25–26 апреля 2019 года. – Москва : НИУ МГСУ, 2019. – С. 83–84.
17. Абдулжабаров, Н. А. Высокопрочный алюминиевый крепёж для конструкций воздушных судов / Н. А. Абдулжабаров // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества : Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвящённой 100-летию российской гражданской авиации, Москва, 18–19 мая 2023 года ; Московский государственный технический университет гражданской авиации. – Москва : ИД Академии имени Н. Е. Жуковского, 2023. – С. 118–120.
18. Метчики и плашки (лерки) Германия / Völkel Threading Solutions : [интернет-магазин]. – URL: <https://volkel.ru/> (дата обращения: 11.05.2025).
19. Experimental investigation for performance of high-strength bolt shear connections with fasteners embedded in aluminum alloy plates / Y. Peng, J. Zhao, W. Huang, J. Dong. – DOI 10.1016/j.istruc.2024.108081 // Structures. – 2025. – Vol. 71. – Art. 108081.
20. Development of High-Strength Bolt Material of Al-Mg-Si Alloy by ECAP and Various Aging Treatments / T. Obata, Y. Tang, H. Iwaoka, S. Hirosawa, K. Mouri, M. Shimoda // The Japan Institute of Light Metals // Materials Transaction. – 2019. – Vol. 60, Iss. 8. – P. 1680–1687. – URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/60/8/60\\_L-M2019825/\\_html/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/60/8/60_L-M2019825/_html/-char/en).
21. Kang, H. S. Strength of High Strength Aluminum Alloys Single Shear Bolted Connections with Two Bolts / H. S. Kang, T. S. Kim. – DOI 10.7781/kjoss.2018.30.2.087 // Journal of Korean Society of Steel Construction. – 2018. – Vol. 30, Iss. 2. – Pp. 87–96.
22. Патент RU 2 581 544 C2, МПК C22C 21/10, C22F 1/053. Усовершенствованные алюминиевые сплавы 7xxx и способы их получения : Заявка № 2013115430/02 от 08.09.2011 : опубликовано 20.04.2016 / Р. Г. Камат, Д. М. Ньюман, Р. Р. Сотелл, Д. К. Лин ; патентообладатели АЛКОА ИНК. (US).
23. Continuous high strength aluminum bolt manufacturing by the spring-loaded ECAP system / Y. G. Jin, H. M. Baek, S.-K. Hwang, Y. T. Im, B. C. Jeon // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212, Iss. 4. – Pp. 848–855.
24. Patent EP2548983A1. European Patent Office. Aluminium alloy and high-strength bolt made from aluminium alloy : Application EP20100847997 : Application filed by Nissan Motor Co Ltd : Publication of 2013-01-23 : Anticipated expiration 2030-12-14 / Fumihiro Gejima ; Current Assignee Nissan Motor Co Ltd.

## REFERENCES

1. Korgin, A. V. Pervyj v Rossijskoj Federatsii avtodorozhnyj most iz alyuminievykh splavov [The first highway bridge made of aluminum alloys in the Russian Federation] / A. V. Korgin, E. V. Vasiliev, O. G. Maslov. – DOI 10.22227/2305-5502.2024.3.6-27 // Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: science and education]. – 2024. – Vol. 14, No. 3. – Pp. 6–27.
2. Korgin, A. V. Avtodorozhnye mosty iz alyuminievykh splavov v Rossii [Highway bridges made of aluminum alloys in Russia] / A. V. Korgin // Mir dorog [The world of roads]. – 2021. – No. 141. – Pp. 97–99.
3. Strength of aluminum alloys for bridge building [Strength of aluminum alloys for bridge building] / A. V. Korgin, P. D. Odesskiy, V. A. Ermakov, L. Z. Kilani, V. A. Romanets, E. A. Koroleva. – DOI 10.1134/S003602952004014X // Russian Metallurgy (Metally) [Russian Metallurgy (Metally)]. – 2020. – No. 4. – Pp. 373–382.
4. Borodkina, V. V. Perspektivnye razvitiya alyuminievogo proizvodstva v Rossii [Prospects for the development of aluminum production in Russia] / V. V. Borodkina, O. V. Ryzhova, Yu. V. Ulas. – DOI 10.17513/fr.42354 // Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental Research]. – 2018. – No. 12 (part 1). – Pp. 72–77.
5. Perspektivnye i problemy primeneniya alyuminievykh splavov pri stroitel'stve mostov v RF [Prospects and problems of using aluminum alloys in bridge construction in the Russian Federation] / A. V. Korgin, V. A. Romanets, V. A. Ermakov, L. Z. Kilani. – DOI 10.12737/article\_5bab4a1a42eee3.23235487 // Vestnik BGTU [Bulletin of BSTU]. – 2018. – No. 9. – Pp. 42–48.
6. Road and pedestrian bridges in aluminum : Report on visits and Sweden, Holland, and the United States / Aluminum Association of Canada. – Ottawa, 2015. – 56 p.
7. Grosu, R. A. Perspektivnye primeneniya stalealyuminevykh konstruktsij v mostostroenii [Prospects for the use of steel-aluminum structures in bridge construction] / R. A. Grosu // Perspektivnye materialy v stroitel'stve i tekhnike (PMST-2014) : Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii molodykh uchonykh, Tomsk, 15–17 oktyabrya 2014 goda [Advanced Materials in Construction and Engineering (PMST-2014) : Proceedings of the International Scientific Conference of Young Scientists, Tomsk, October 15–17, 2014]. – Tomsk : Izd-vo TGUAS [TGUAS Publishing House], 2014. – Pp. 383–390.
8. Mosty s konstruktsiyami iz alyuminievykh splavov. Pravila proektirovaniya : Svod pravil SP 443.1325800.2019 [Bridges with aluminum alloy structures. Design rules : Code of Rules SP 443.1325800.2019] : utverzhdyon prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhiliishno-kommunal'nogo khozyajstva Rossijskoj Federatsii ot 30 aprelya 2019 g. № 251/pr i vvedyon v dejstvie s 31 oktyabrya 2019 g. [approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated April 30, 2019 No. 251/pr and entered into force on October 31, 2019] / Minstrot Rossiij [Ministry of Construction of Russia]. – Moscow : Standartinform, 2019. – 59 p.
9. Vliyanie korrozionnoj sredy na svojstva friktsionnogo soedineniya listov splava 6082-T6 [The influence of the corrosive environment on the properties of the friction joint of alloy sheets 6082-T6] / A. G. Katunina, A. N. Shuvalov, O. A. Kornev, E. V. Sokolova. – DOI 10.32683/0536-1052-2022-764-8-102-118 // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo [News of higher educational institutions. Construction]. – 2022. – No. 8 (764). – Pp. 102–118.
10. Patton, G. Aluminum Orthotropic : Desk Research Report / G. Patton. – Florida : Archive Florida Department of Transportation, 2017. – 52 p.
11. Korgin, A. V. Raschyt mostovykh konstruktsij iz alyuminievykh splavov na vynoslivost' [Calculation of bridge structures made of aluminum alloys for endurance] / A. V. Korgin. – DOI 10.22227/2305-5502.2022.2.3 // Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: science and education]. – 2022. – Vol. 12, No. 2. – Pp. 31–49.
12. Korgin, A. V. Vkluchenie ortotropnykh plit nastila v rabotu nesushikh konstruktsij mostov iz alyuminievykh splavov [Inclusion of orthotropic flooring plates in the work of load-bearing structures of bridges made of aluminum alloys] / A. V. Korgin, V. A. Ermakov, L. Z. Zeid Kilani. – DOI 10.22227/1997-0935.2022.7.882-896 // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. – 2022. – Vol. 17, No. 7. – Pp. 882–889.
13. Kunin, Yu. S. Raschyt i proektirovaniye friktsionnykh soedinenij alyuminievykh konstruktsij. Problemy i puti resheniya [Calculation and design of friction joints of aluminum structures. Problems and solutions] / Y. S. Kunin, A. A. Sineev. – DOI 10.54950/26585340-2022-2-72 // Stroitel'noe proizvodstvo [Construction production]. – 2022. – No. 2. – Pp. 72–76.
14. Kunin, Yu. S. Nesushhaya sposobnost' friktsionnykh soedinenij alyuminievykh konstruktsij [Bearing capacity of friction joints of aluminum structures] / Yu. S. Kunin, A. A. Sineev. – DOI 10.33622/0869-7019.2020.12.82-85 // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. – 2020. – No. 12. – Pp. 82–85.
15. Kunin, Yu. S. Osobennosti raschytov i konstruirovaniya friktsionnykh soedinenij alyuminievykh konstruktsij [Features of calculation and construction of friction joints of aluminum structures] / Yu. S. Kunin, A. A. Sineev // Aktual'nye problemy stroitel'noj otrassli i obrazovaniya : Sbornik dokladov Pervoj Natsional'noj konferentsii, Moskva, 30 sentyabrya 2020 goda [Actual problems of the construction industry and education : Collection of reports of the First National Conference, Moscow, September 30, 2020]. – Moscow : MGSU, 2020. – Pp. 95–102.
16. Sineev, A. A. Nesushhaya sposobnost' vintovykh (boltovykh) soedinenij ehlementov alyuminievykh konstruktsij [Bearing capacity of screw (bolted) joints of aluminum structural elements] / A. A. Sineev // Funktsiya, konstruktsiya, sreda v arkhiteture zdanij : Sbornik tezisov dokladov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii : v 2-kh tomakh. Tom 1, Moskva, 25–26 aprelya 2019 goda [Function, structure, environment in building architecture : Collection of abstracts of the All-Russian Scientific and Practical Conference : in 2 volumes. Volume 1, Moscow, April 25–26, 2019]. – Moscow : NRU MGSU, 2019. – Pp. 83–84.
17. Abduzhabarov, N. A. Vysokoprochnyj alyuminievyj krepoyozh dlya konstruktsij vozduzhnykh sudov [High-strength aluminum fasteners for aircraft structures] / N. A. Abduzhabarov // Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom ehtape razvitiya nauki, tekhniki i obshhestva : Sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii, posvyashchyonnoj 100-letiyu rossijskoj grazhdanskoy aviatsii, Moskva, 18–19 maya 2023 goda ; Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet grazhdanskoy aviatsii [Civil aviation at the present stage of development of science, technology and society : A collection of abstracts of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 100th anniversary of Russian Civil Aviation, Moscow, May 18–19, 2023 ; Moscow State Technical University University of Civil Aviation]. – Moscow : ID Akademii imeni N. E. Zhukovskogo [Publishing House of the N. E. Zhukovsky Academy], 2023. – Pp. 118–120.
18. Metchiki i plashki (lerki) Germaniya [Taps and dies (bars) Germany] / Völkel Threading Solutions : [online store]. – URL: <https://völkel.ru/> (date of access: 05/11/2025).
19. Experimental investigation for performance of high-strength bolt shear connections with fasteners embedded in aluminum alloy plates / Y. Peng, J. Zhao, W. Huang, J. Dong. – DOI 10.1016/j.istruc.2024.108081 // Structures. – 2025. – Vol. 71. – Art. 108081.
20. Development of High-Strength Bolt Material of Al–Mg–Si Alloy by ECAP and Various Aging Treatments / T. Obata, Y. Tang, H. Iwaoka, S. Hirosawa, K. Moura, M. Shimoda // The Japan Institute of Light Metals // Materials Transaction. – 2019. – Vol. 60, Iss. 8. – P. 1680–1687. – URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/60/8/60\\_L-M2019825/\\_html/char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/60/8/60_L-M2019825/_html/char/en).
21. Kang, H. S. Strength of High Strength Aluminum Alloys Single Shear Bolted Connections with Two Bolts / H. S. Kang, T. S. Kim. – DOI 10.7781/kjoss.2018.30.2.087 // Journal of Korean Society of Steel Construction. – 2018. – Vol. 30, Iss. 2. – Pp. 87–96.
22. Patent RU 2 581 544 C2, MPK S22S 21/10, S22F 1/053. Usovershennostvovannye alyuminievye splavy 7khkhkh i sposoby ikh polucheniya [Patent RU 2,581,544 C2, IPC C22C 21/10, C22F 1/053. Improved aluminum alloys 7xxxx and methods of their preparation] : Zayavka № 2013115430/02 ot 08.09.2011 : opublikovano 20.04.2016 [Application No. 2013115430/02 dated 09/08/2011 : published 04/20/2016] / R. G. Kamat,

DOI: 10.54950/26585340\_2025\_2\_175

УДК 517.958:530.145:512

## Управление качеством строительства с использованием цифровых двойников

Construction Quality Control with Digital Twins

## Шахраманьян Андрей Михайлович

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Испытание сооружений», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26; генеральный директор ООО «СОДИС Лаб», Россия, 143026, Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 42, строение 1, [andreyshakhramanyan@gmail.com](mailto:andreyshakhramanyan@gmail.com)

## Shahramanyan Andrey Mikhailovich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Testing of Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26; General Director of SODIS Lab LLC, Russia, 143026, Moscow, Skolkovo Innovation Center, Bolshoy bulvar, 42, stroyenie 1, [andreyshakhramanyan@gmail.com](mailto:andreyshakhramanyan@gmail.com)

## Ярёменко Андрей Валерьевич

Директор по инновациям ООО «СОДИС Лаб», Россия, 143026, Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 42, строение 1, [ay@sodislab.com](mailto:ay@sodislab.com)

## Yaremenko Andrey Valeriyevich

Director of Innovations, SODIS Lab LLC, Russia, 143026, Moscow, Skolkovo Innovation Center, Bolshoy bulvar, 42, stroyenie 1, [ay@sodislab.com](mailto:ay@sodislab.com)

## Мозжухин Дмитрий Александрович

Технический директор ООО «СОДИС Лаб», Россия, 143026, Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 42, строение 1, [dmoz@sodislab.com](mailto:dmoz@sodislab.com)

## Mozzhukhin Dmitry Alexandrovich

Technical Director of SODIS Lab LLC, Russia, 143026, Moscow, Skolkovo Innovation Center, Bolshoy bulvar, 42, stroyenie 1, [dmoz@sodislab.com](mailto:dmoz@sodislab.com)

## Трофимов Иван Дмитриевич

Руководитель отдела внедрения ООО «СОДИС Лаб», Россия, 143026, Москва, Инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 42, строение 1, [itrofimov@sodislab.com](mailto:itrofimov@sodislab.com)

## Trofimov Ivan Dmitrievich

Head of the Implementation Department of SODIS Lab LLC, Russia, 143026, Moscow, Skolkovo Innovation Center, Bolshoy bulvar, 42, stroyenie 1, [itrofimov@sodislab.com](mailto:itrofimov@sodislab.com)

## Шмук Николай Александрович

Руководитель группы цифровизации управления территориального развития и строительства, ООО «Гиперглобус», Россия, 125493, Москва, улица Смольная, 14, 1 этаж, [n.shmuk@globus.ru](mailto:n.shmuk@globus.ru)

## Shmuk Nikolay Alexandrovich

Head of the Digitalization Group of the Territorial Development and Construction Department, Hyperglobus LLC, 125493, Moscow, Smolnaya ulitsa, 14, 1 ehtazh, [n.shmuk@globus.ru](mailto:n.shmuk@globus.ru)

## Юрин Алексей Александрович

Руководитель управления территориального развития и строительства, ООО «Гиперглобус», Россия, 125493, Москва, улица Смольная, 14, 1 этаж, [a.yurin@globus.ru](mailto:a.yurin@globus.ru)

## Yurin Alexey Alexandrovich

Head of the Department of Territorial Development and Construction, Hyperglobus LLC, 125493, Moscow, Smolnaya ulitsa, 14, 1 ehtazh, [a.yurin@globus.ru](mailto:a.yurin@globus.ru)

**Аннотация.**

В статье рассматриваются возможности применения цифровых двойников зданий для контроля качества строительства. Дано определение понятия «цифровой двойник здания», описаны ключевые характеристики систем управления строительством и эксплуатацией, которые служат основой для создания и актуализации цифровых моделей. Особое внимание уделено процессному подходу к организации контроля качества, включая стандартизацию данных, автоматизацию документооборота и интеграцию BIM-технологий. В качестве примера приведена реализация подсистемы контроля качества на базе цифрового двойника с использованием QR-кодов для этикетирования помещений в рамках строительства гипермаркетов «Глобус».

Актуальность исследования обусловлена растущей сложностью строительных проектов, увеличением объёмов данных

**Abstract.**

The article explores the application of building digital twins for construction quality control. It provides a definition of the "building digital twin" concept and describes the key characteristics of construction and facility management systems that serve as the foundation for creating and updating digital models. Special attention is given to the process-based approach to quality control, including data standardization, document flow automation, and BIM technology integration. As a case study, the implementation of a quality control subsystem based on a digital twin using QR codes for room labeling in the construction of "Globus" hypermarkets is presented.

The relevance of the study stems from the increasing complexity of construction projects, growing data volumes, and the in-

**Введение**

Современные строительные проекты характеризуются высокой сложностью: от реализации инновационных архитектурных решений до интеграции многочисленных инженерных систем. Это приводит к экспоненциальному росту объёмов данных, с которыми традиционные методы управления качеством строительства зачастую не справляются.

В результате возникают такие проблемы, как фрагментированность информации, ошибки в документации, дублирование процессов и отсутствие единого источника достоверных данных. Всё это снижает прозрачность контроля качества, увеличивает сроки строительства и повышает риски дорогостоящих ошибок.

**Актуальность проблемы** обусловлена необходимостью перехода от устаревших бумажных и разрозненных цифровых систем к интегрированным платформам, обеспечивающим сквозной контроль качества на всех этапах жизненного цикла здания. Цифровые двойники, построенные на основе BIM-технологий, предлагают принципиально новый подход к управлению строительными проектами. Они позволяют не только визуализировать объект, но и в реальном времени отслеживать его состояние, автоматизировать документооборот, стандартизировать процессы и минимизировать человеческий фактор.

**Целью данной работы является анализ потенциала использования цифровых двойников для повышения эффективности контроля качества в строительстве.**

В рамках исследования были решены следующие задачи:

- выявлены текущие проблемы и узкие места в существующих процессах;
- построена процессная модель компании «Глобус» в части реализации строительства гипермаркетов;

и неэффективностью традиционных методов управления. Показано, что цифровые двойники позволяют решать проблемы фрагментированности информации, ошибок в документации и отсутствия единой информационной среды. Описаны ключевые функциональные блоки систем управления строительством, включая работу с BIM-моделями, KPI, задачами и интеграцию с IoT. Приведены примеры интерфейсов и метрик для оценки эффективности процессов. Результаты демонстрируют, что внедрение цифровых двойников повышает прозрачность, скорость и качество контроля на всех этапах жизненного цикла здания.

**Ключевые слова:** цифровой двойник; контроль качества строительства; BIM-технологии; информационная модель; процессный подход; автоматизация документооборота; управление жизненным циклом здания.

efficiency of traditional management methods. It is demonstrated that digital twins help address issues such as information fragmentation, documentation errors, and the lack of a unified information environment. The article outlines key functional modules of construction management systems, including BIM model integration, KPIs, task management, and IoT connectivity. Examples of interfaces and performance metrics are provided. The results show that implementing digital twins enhances transparency, speed, and quality control across all stages of a building's lifecycle.

**Keywords:** digital twin; construction quality control; BIM technologies; information model; process-based approach; document flow automation; building lifecycle management.

- проведена автоматизация строительных процессов с интеграцией в информационную модель объекта;
- внедрено QR-кодирование элементов модели с их физическим размещением на строительной площадке для обеспечения оперативного доступа участников строительства к информации и цифровому двойнику объекта.

**1. Актуальные проблемы контроля качества строительства**

Возросшая в последние десятилетия сложность строительных объектов как в плане реализации сложных конструктивных решений, так и в развитии и увеличении объёма инженерных систем привела к увеличению потоков данных, что усугубляет проблему управления проектами в такой консервативной отрасли, как строительство.

Ввиду этого к одной из основных проблем контроля качества строительства можно отнести сложность управления большими потоками данных, причинами которой являются:

- множество различных систем и инструментов ведения документации, что приводит к неструктурированности, к временным затратам на поиск информации и актуальных документов;
- ошибки при заполнении бумажных и электронных, не связанных между собой, форм и журналов работ;
- отсутствие единой базы данных для хранения информации, что усложняет доступ к актуальным документам для всех участников проектирования и строительства;
- неструктурированность или отсутствие глубоко формализованных процессов проектирования и строительства;
- отсутствие единой информационной среды взаимодействия всех участников строительного проекта.

**2. Цифровые двойники зданий. Системы управления строительством и эксплуатацией**

В настоящее время в действующей нормативной базе отсутствует понятие «цифровой двойник объекта (здания)». В то же время присутствует понятие «информационная модель объекта». В соответствии с Градостроительным кодексом РФ [1], информационная модель объекта – это совокупность взаимосвязанных сведений, документов и материалов об объекте капитального строительства, формируемых в электронном виде на этапах выполнения инженерных изысканий, осуществления архитектурно-строительного проектирования, строительства, реконструкции, капитального ремонта, эксплуатации и (или) сноса объекта капитального строительства.

В соответствии с ГОСТ Р 57563-2017 «Моделирование информационное в строительстве» [2], информационная модель – это объектно-ориентированная параметрическая 3D-модель, представляющая в цифровом виде физические, функциональные и прочие характеристики объекта (или его отдельных частей) в виде совокупности информационно насыщенных элементов.

Также отметим, что ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [3] устанавливает единое определение понятия «цифровой двойник изделия»: цифровой двойник изделия – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями.

Принимая во внимание указанные выше определения, введём понятие «цифровой двойник объекта (здания, сооружения)».

Цифровой двойник объекта (здания, сооружения) – это цифровое представление физического объекта, которое в реальном времени синхронизируется с оригиналом через данные, поступающие от датчиков, устройств или других источников информации. Цифровой двойник позволяет моделировать, анализировать и оптимизировать процессы или характеристики объекта на протяжении его жизненного цикла.

Упрощая, можно проследить следующую эволюцию цифрового двойника объекта:

1. Переход от двухмерных электронных чертежей к 3D-моделям;
2. Переход от 3D-моделей к информационным моделям (BIM-моделям), которые дополняются разнородной информацией;
3. Эволюционирование моделей до цифровых двойников путём интеграции BIM-моделей с процессами и данными, в том числе от IoT-устройств [4].

Основным отличием цифрового двойника от BIM-модели является связь с оригиналом через получение информации из различных источников и возможность измерения и анализа различных параметров функционирования физического объекта.

Поэтому цифровой двойник здания можно представить в виде следующих компонентов:

- система управления информацией, обеспечивающая процессный подход к сбору, накоплению, обработке, изменению (актуализации) и представлению всей информации об объекте и его составных частях (включая инженерные системы и их компоненты)

в систематизированном виде на протяжении всего жизненного цикла объекта, в том числе на базе информационных моделей здания (BIM-моделей). Фактически такая информационная система формирует цифровую модель и обеспечивает двусторонние информационные связи с объектом (зданием);

- информационные модели объекта (BIM-модели), включающие трёхмерные модели, содержащие связи с согласованной технической, сметной, технологической и эксплуатационной документацией по объекту в соответствии со стадиями его жизненного цикла.

С учётом тренда цифровизации строительной отрасли, информационные системы, обеспечивающие процессный подход к управлению потоками данных, становятся основным инструментом для построения цифровых двойников зданий, в том числе для системного решения задач контроля и управления качеством строительства.

Далее, для простоты изложения, будем называть системы, обеспечивающие процессный подход к управлению потоками данных в строительстве и эксплуатации зданий, системами управления строительством и эксплуатацией.

Отметим важные технические требования, или признаки, современных и перспективных систем управления строительством и эксплуатацией для построения цифровой модели здания в условиях наличия больших потоков данных и неструктурированности входящей информации [5].

Признаки современных и перспективных систем управления строительством и эксплуатацией для построения цифровой модели здания с поддержкой BIM-технологии:

1. **Датацентричность системы.** При работе система опирается на актуальный и достоверный источник данных (объект системы), при этом, в зависимости от задач пользователя (группы или ролей пользователей), представляет эти данные в различных требуемых разрезах (представлениях).
2. **Объектно-ориентированность системы.** Возможность формирования любого количества сущностей и связей между ними (конструктивный элемент здания, элемент инженерной системы, документ, замечание, задача, проект, цель, актив и пр.).
3. **Масштабируемость системы.** Обеспечение расширения функциональности системы – как за счёт визуальной настройки (low-code подход), так и за счёт разработки дополнительных программных модулей – на более низком уровне (hard-code подход), например, на языках Python, C# и пр.
4. **Современный стек технологий с опорой на микросервисную архитектуру системы.** Обеспечивает возможность гибкой масштабируемости системы с точки зрения потребных аппаратных мощностей, сокращает время разработки новой функциональности, повышает скорость, качество и гибкость разработки новых, а также доработки имеющихся функциональных блоков.
5. **Поддержка BIM-технологии.** Возможность импорта информации о компонентах информационных моделей, обеспечение связей между компонентами

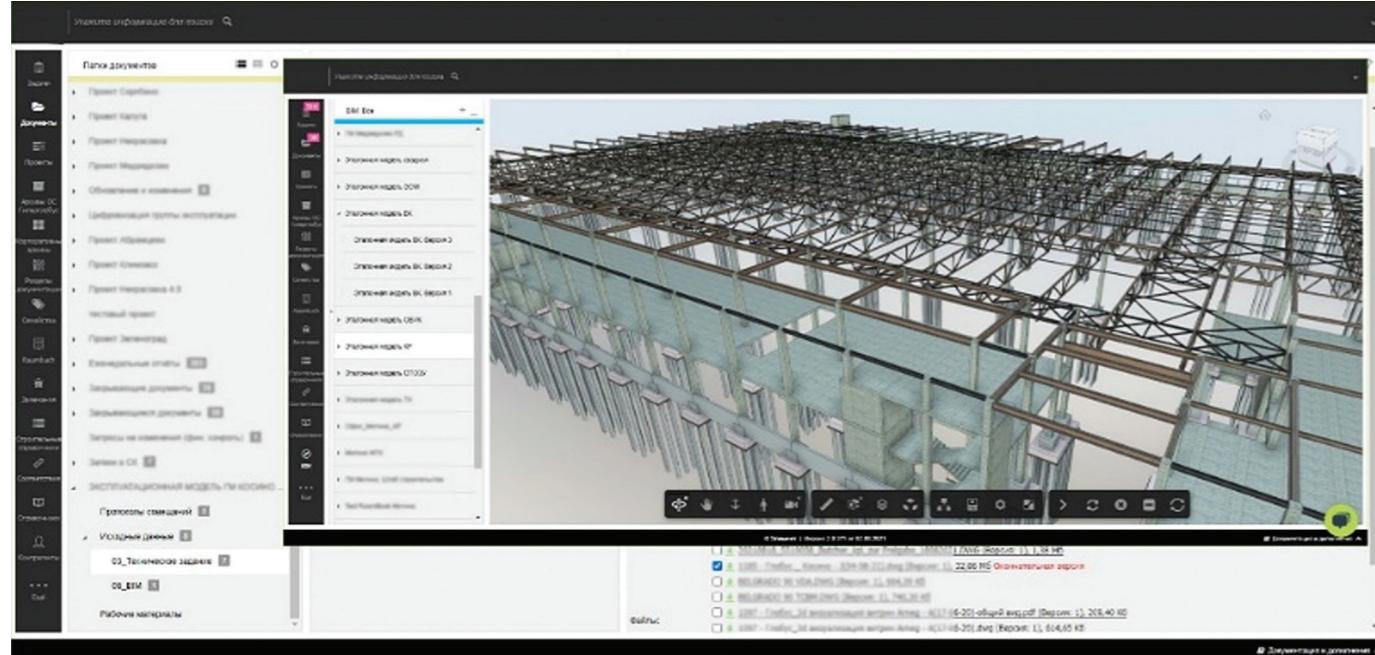


Рис. 1. Пример интерфейса системы управления строительством и эксплуатацией.

Рабочее место руководителя

Fig. 1. An example of an interface for a construction and maintenance management system.  
Supervisor's workplace

информационных моделей и системы, обеспечение возможности отображения информационных моделей в системе в различных представлениях.

6. Наличие развитого инструментария разработки и интеграции с внешними системами, в частности, наличие REST API и пакета SDK.

В перечень основных функциональных блоков систем управления строительством и эксплуатацией, необходимых для построения цифровой модели и реализации концепции цифрового двойника здания с поддержкой BIM-технологий, входят блоки для работы: с задачами, с проектами, с ключевыми показателями (КП), графиками

проектов, со справочниками, с бизнес-процессами (маршрутами), с документами и технической документацией с поддержкой BIM-технологии (контроль, согласование, формирование замечаний, запросов на изменения, версий и редакций), для контроля качества и приёмки строительно-монтажных работ и др.

На рисунках 1–4 приведены примеры интерфейсов системы управления строительством и эксплуатацией.

### 3. Процессный подход к организации контроля качества строительства

Как отмечалось выше, основой формирования цифровой модели и цифрового двойника здания является

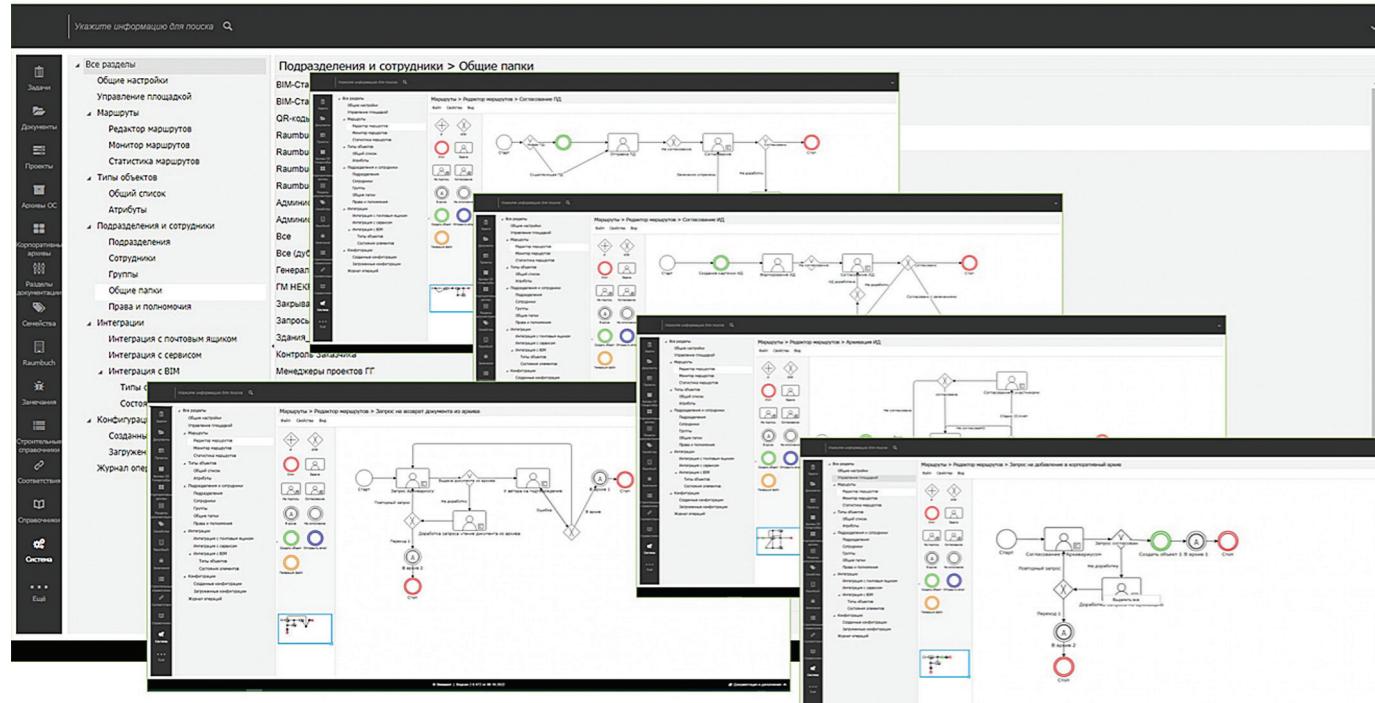


Рис. 2. Пример интерфейса системы управления строительством и эксплуатацией. Настройки системы. Редактор бизнес-процессов

Fig. 2. An example of an interface for a construction and maintenance management system. System settings. Business Process Editor

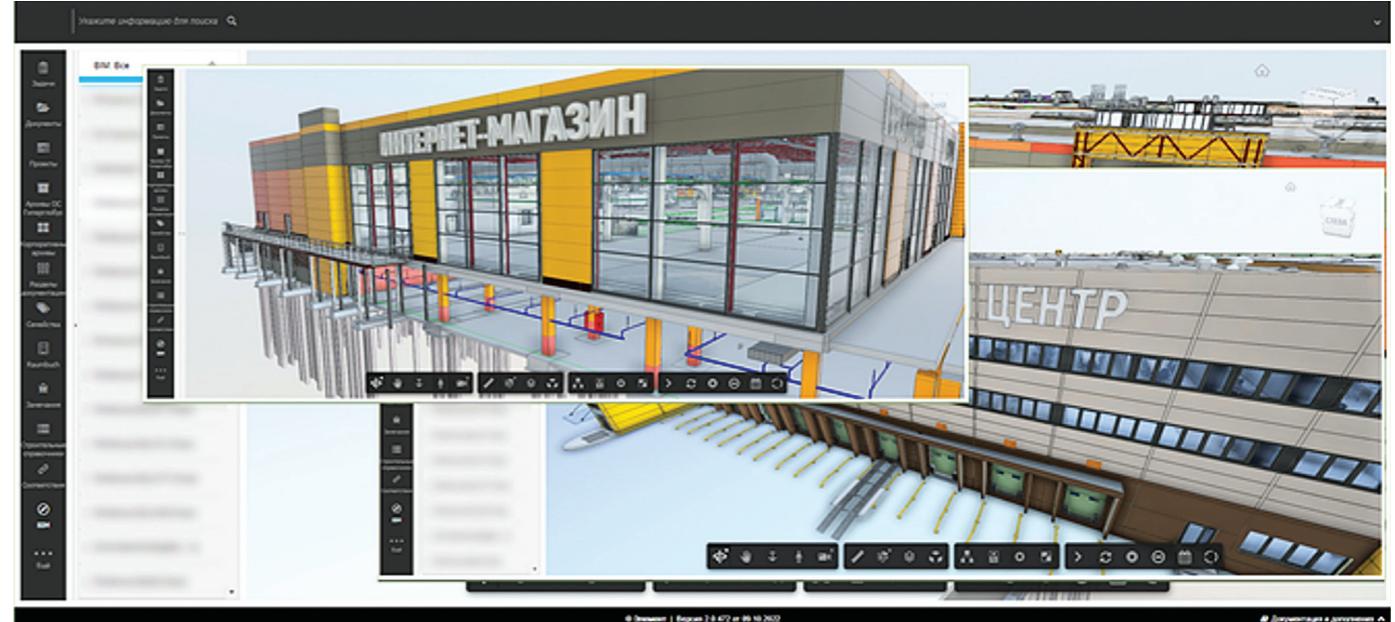


Рис. 3. Пример интерфейса системы управления строительством и эксплуатацией. Настройки системы. Динамические реестры BIM-моделей

Fig. 3. An example of an interface for a construction and maintenance management system. System settings. Dynamic registers of BIM models

систематизация информационных потоков и структурирование данных.

Процессный подход в рамках данной концепции дополнительно повышает ценность от автоматизации управления информацией – как за счёт обеспечения возможности глубокой стандартизации процессов управления, так и за счёт обеспечения получения качественных и количественных метрик для поддержки принятия управленческих решений при строительстве и эксплуатации зданий.

Так, в стандарте ГОСТ Р ИСО 9001 «Системы менеджмента качества. Требования» [6], процессный подход – это один из ключевых принципов системы менеджмента качества, который акцентирует внимание на управлении организацией через понимание, контроль и улучшение взаимосвязанных процессов. Этот подход помогает орга-

низации повышать качество и эффективность своих процессов и продукции.

Процессный подход предполагает, что любая деятельность или набор действий в организации можно рассматривать как процесс. Процессы в организации взаимосвязаны и взаимодействуют между собой, образуя единую систему. Цель процессного подхода – обеспечить контроль за всеми процессами, их оптимизацию и постоянное улучшение.

Для реализации процессного подхода в системах управления строительством и эксплуатацией должна быть обеспечена возможность создания и настройки основных элементов процессов, формирования связей между элементами процессов, а также подсчёта, как минимум, указанных выше ключевых метрик скорости и качества выполнения процессов. На рисунке 4 приведён

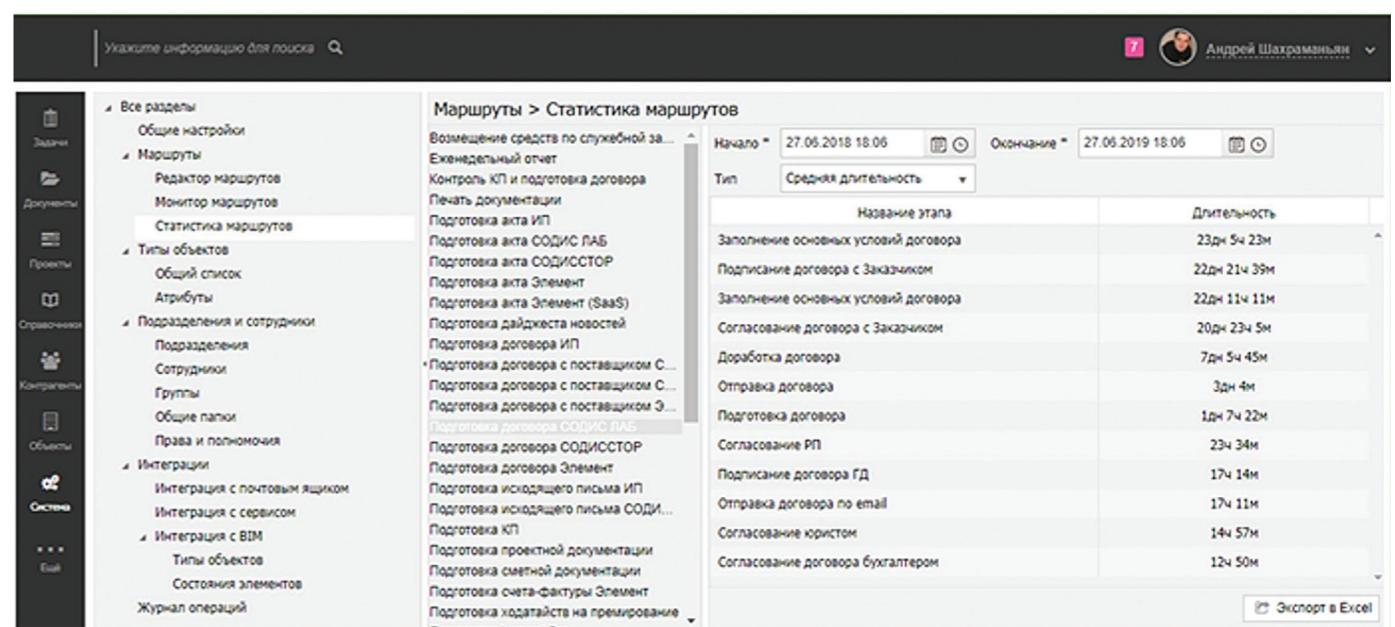


Рис. 4. Метрики процесса в системе управления строительством и эксплуатацией

Fig. 4. Process metrics in the construction and operation management system

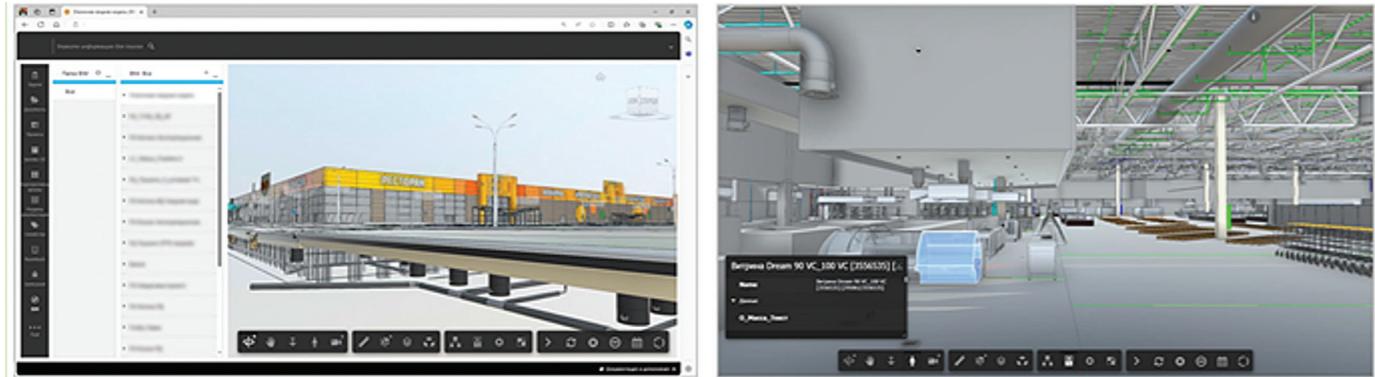


Рис. 5. Общий вид эталонной модели гипермаркета «Глобус»  
Fig. 5. General view of the reference model of the Globus hypermarket

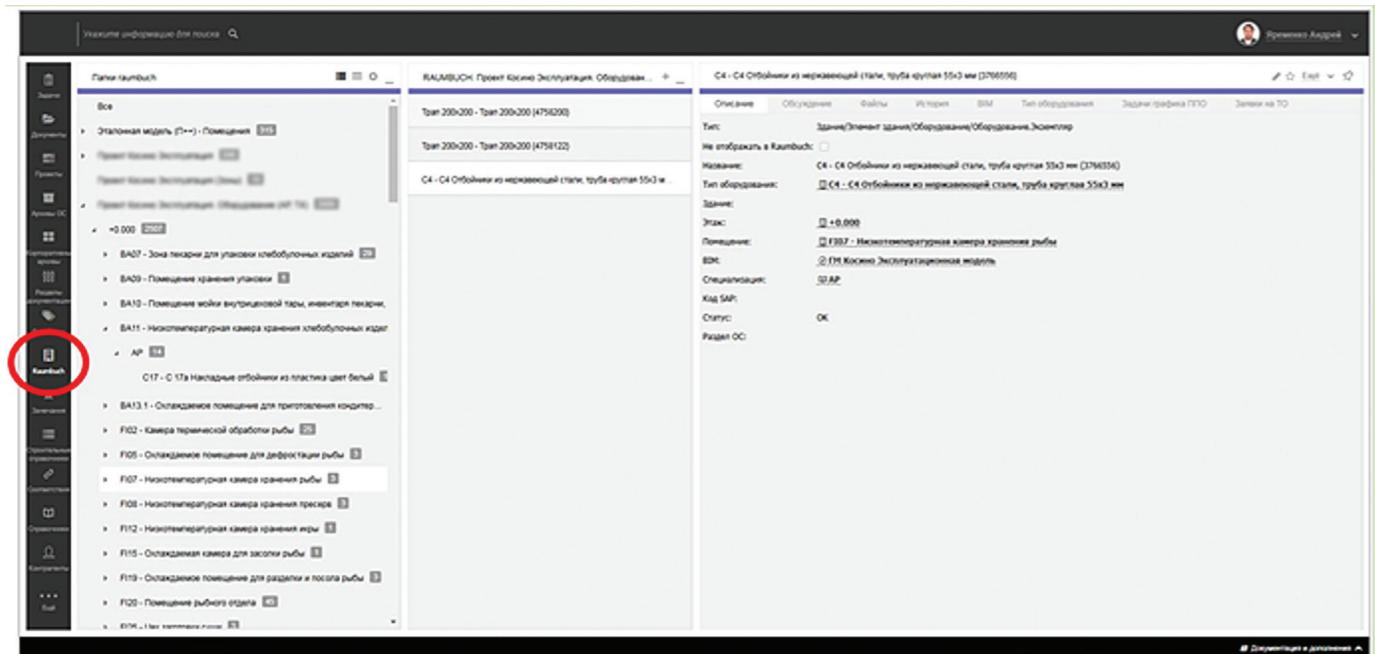


Рис. 6. Общий вид интерфейса категории «Raumbuch»  
Fig. 6. General view of the "Raumbuch" category interface

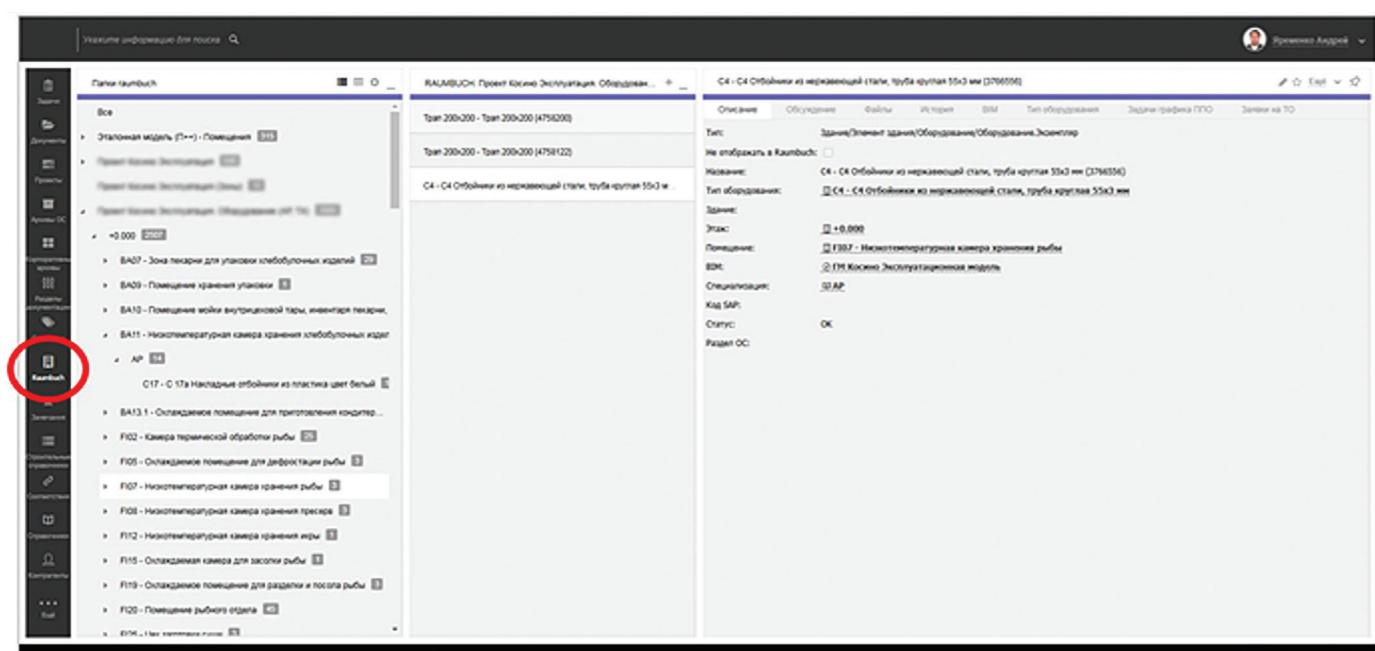


Рис. 7. Вид карточки помещения в категории «Raumbuch»  
Fig. 7. Type of room card in the "Raumbuch" category

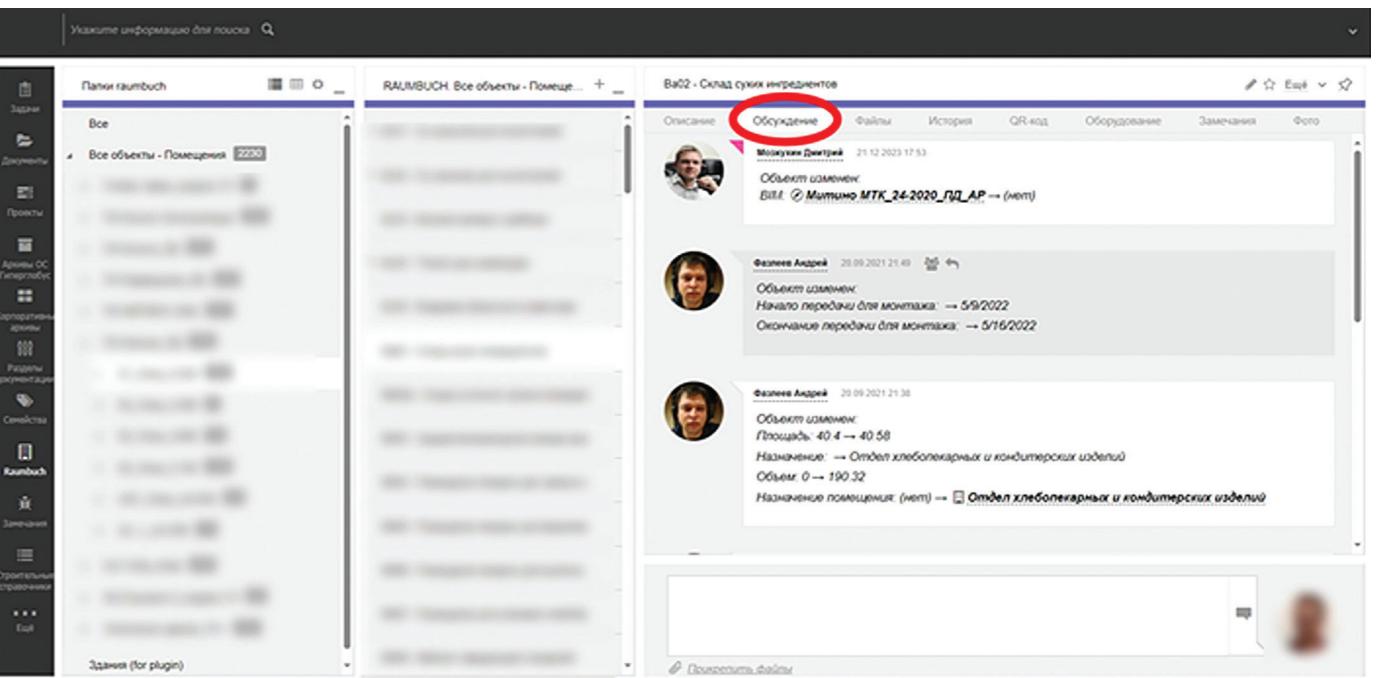


Рис. 8. Вкладка «Обсуждение»  
Fig. 8. The "Discussion" tab

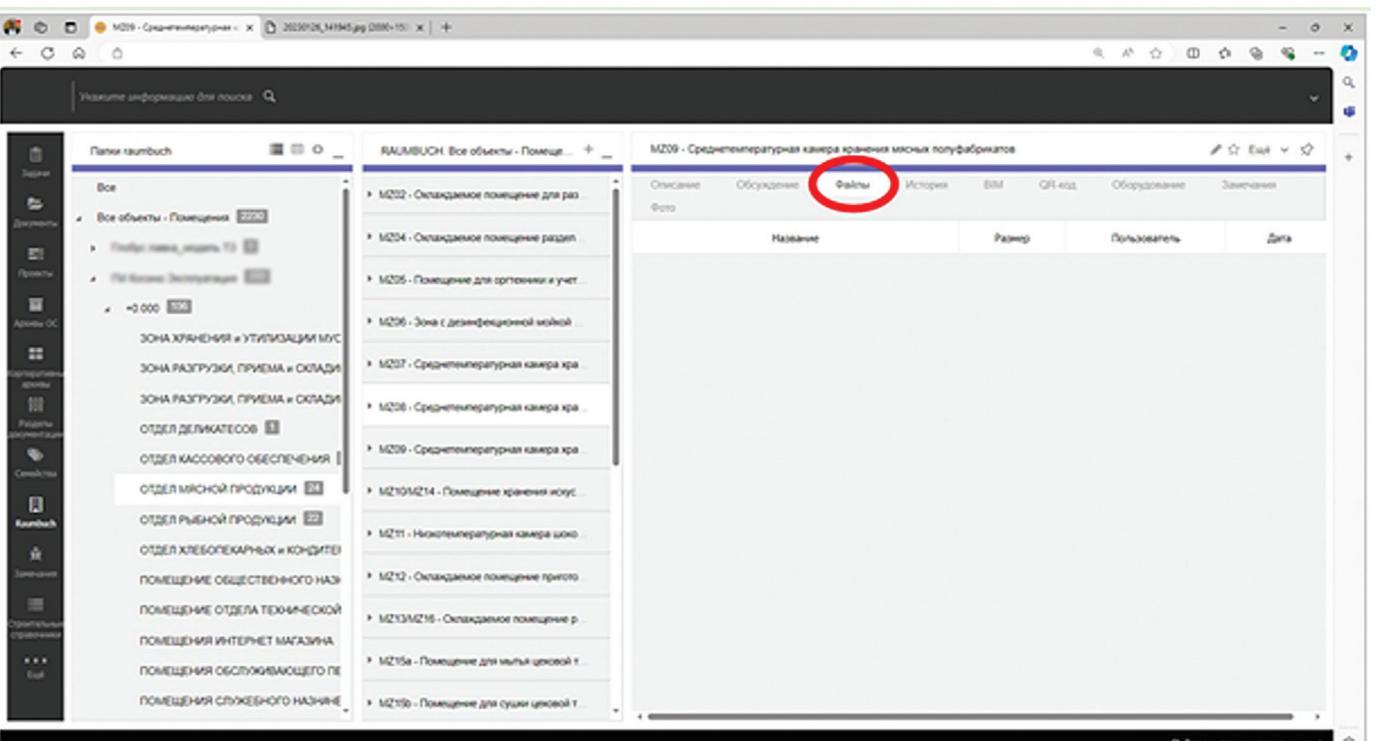


Рис. 9. Вкладка «Файлы»  
Fig. 9. The "Files" tab

пример настройки подсчёта ключевых метрик выполнения процесса в системе управления строительством и эксплуатацией.

#### 4. Пример контроля качества с использованием цифровых двойников

Для повышения качества строительства объектов ООО «Гиперглобус» на базе системы управления строительством и эксплуатацией SODIS Building и low-code платформы Lement Pro (далее – Система) был настроен инструмент контроля качества строительно-монтажных работ по готовым к приёмке помещениям объекта с ис-

пользованием BIM-модели и этикетированием элементов здания на основе QR-кодов.

BIM-модель строящегося объекта создаётся в соответствии с корпоративным BIM-стандартом ООО «Гиперглобус» и типовой процедурой проектирования, ядром которой служит наличие «эталонной модели объекта», являющейся преднастроенным шаблоном для работы проектировщиков и генподрядчика с корректно смоделированными, запараметризованными и заклассифицированными элементами всех компонентов и систем строящегося здания (рисунок 5).

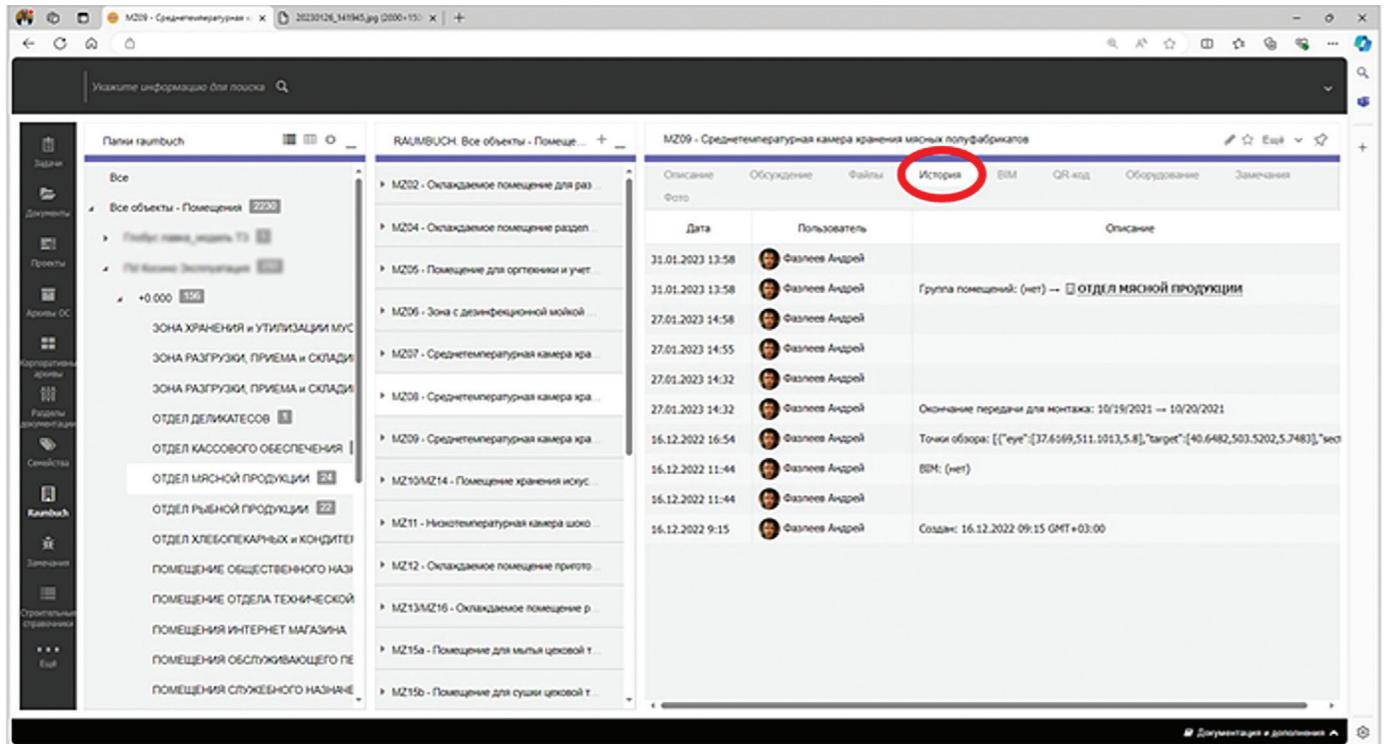


Рис. 10. Вкладка «История»  
Fig. 10. The History tab

Ниже рассмотрим порядок действий и описание инструмента контроля качества строительно-монтажных работ по помещениям.

1. При помощи специального инструмента из BIM-модели в Систему выгружается и собирается в отдельной категории динамическая ведомость помещений, именуемая в системе ГИПЕРГЛОБУС, по-немецки «Raumbuch» (или «Книга помещений», «Ведомость помещений»), рисунок 6.

2. По каждому выгруженному из BIM-модели помещению в Системе автоматически создаётся карточка, где

во вкладке «Описание» из модели собирается требуемая информация по помещению (рисунок 7), в нашем случае это:

- площадь;
- объём;
- материалы отделки полов, потолков и стен (если эти данные внесены в модель);
- дата начала передачи помещения генподрядчиком для монтажа торгового и производственно-технологического оборудования;

– дата окончания передачи помещения генподрядчиком для монтажа торгового и производственно-технологического оборудования.

3. Во вкладке «Обсуждение» пользователи Системы могут вести диалог по вопросам, касающимся данного помещения (рисунок 8).

4. Во вкладке «Файлы» пользователи, при необходимости, могут размещать файлы любого типа (рисунок 9).

5. Во вкладке «История» администраторам проекта доступны для анализа и контроля все действия пользо-

вателей в Системе, относящиеся к данному помещению (рисунок 10).

6. Во вкладке «BIM» доступен просмотр и интерактивное взаимодействие с BIM-моделью помещения как частью BIM-модели всего объекта, включая создание замечаний (заявок) по отдельным объектам модели – элементам здания или единицам инженерного или производственно-технологического оборудования (рисунок 11).

7. Во вкладке «QR-код» доступен уникальный QR-код данного помещения, автоматически генерируемый Системой и служащий мостом между единой цифровой

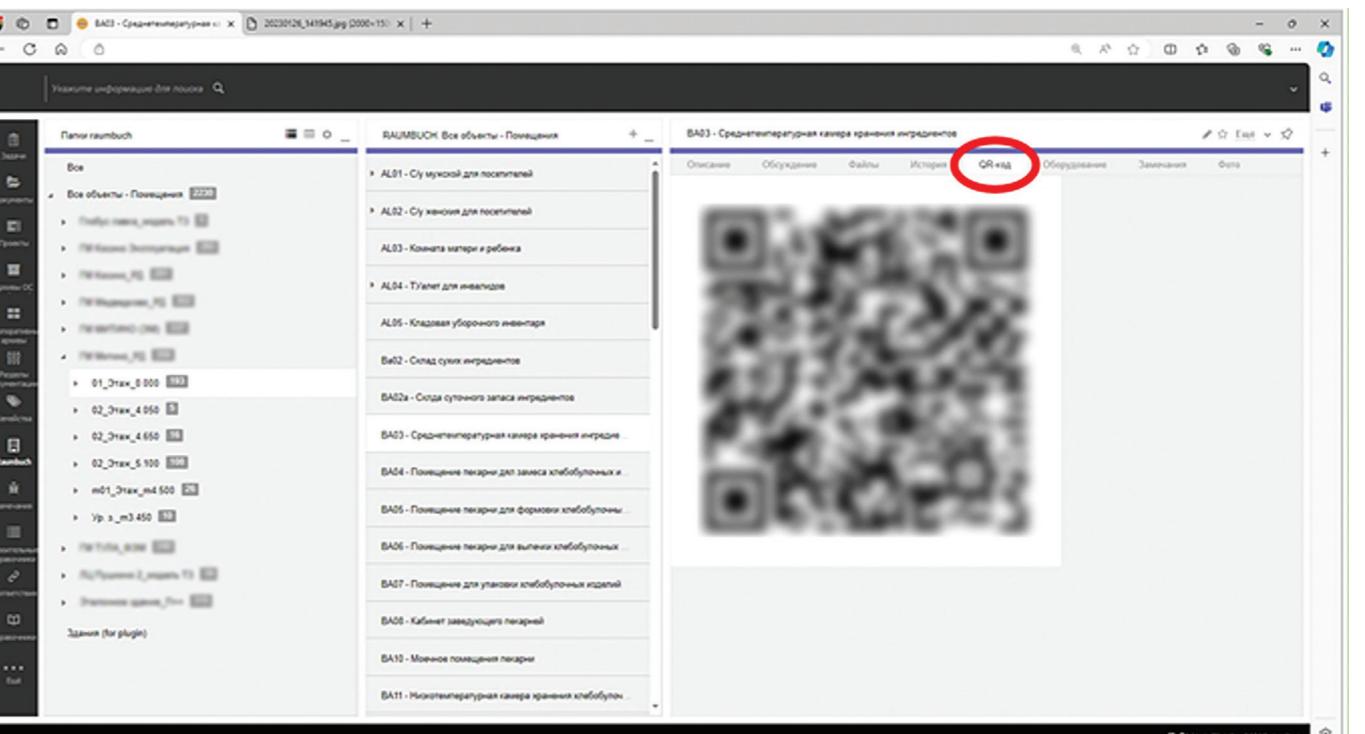


Рис. 12. Вкладка «QR-код»  
Fig. 2. The "QR code" tab

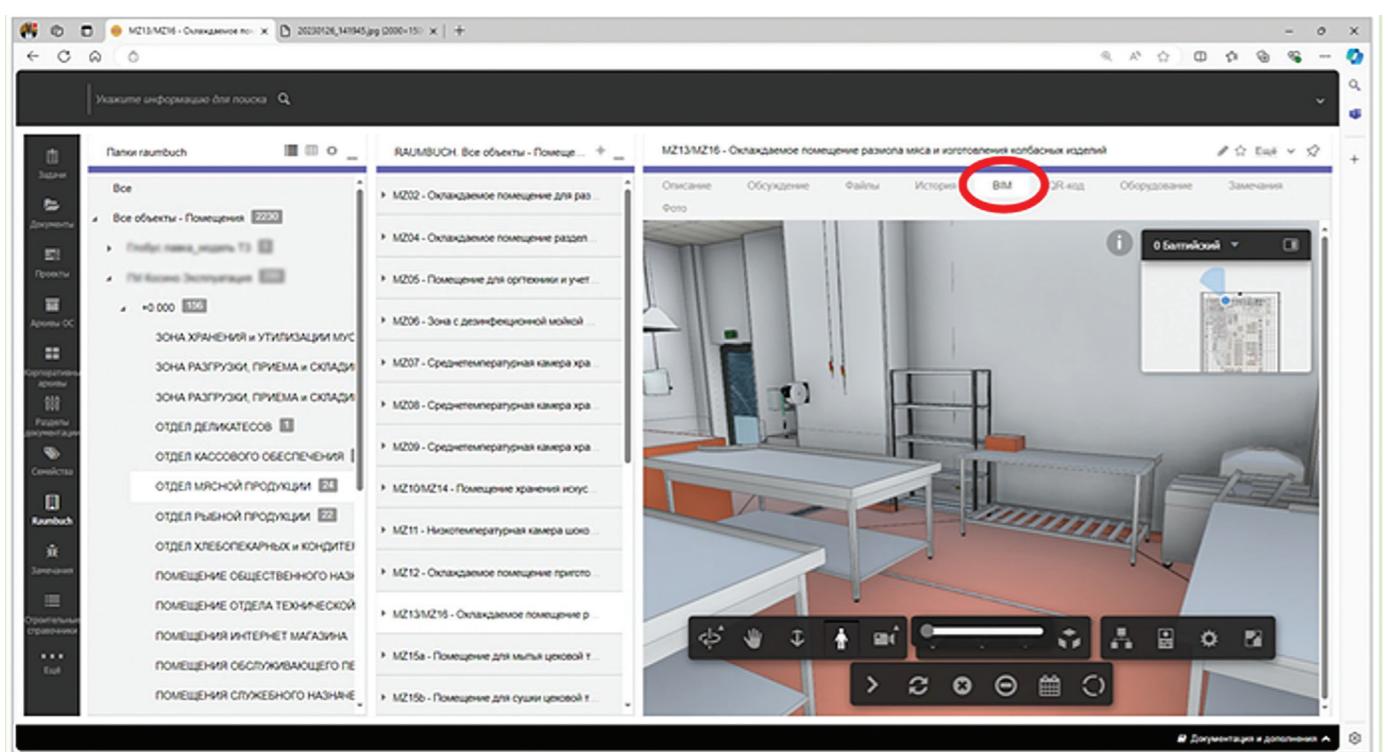


Рис. 11. Вкладка «BIM»  
Fig. 11. The "BIM" tab

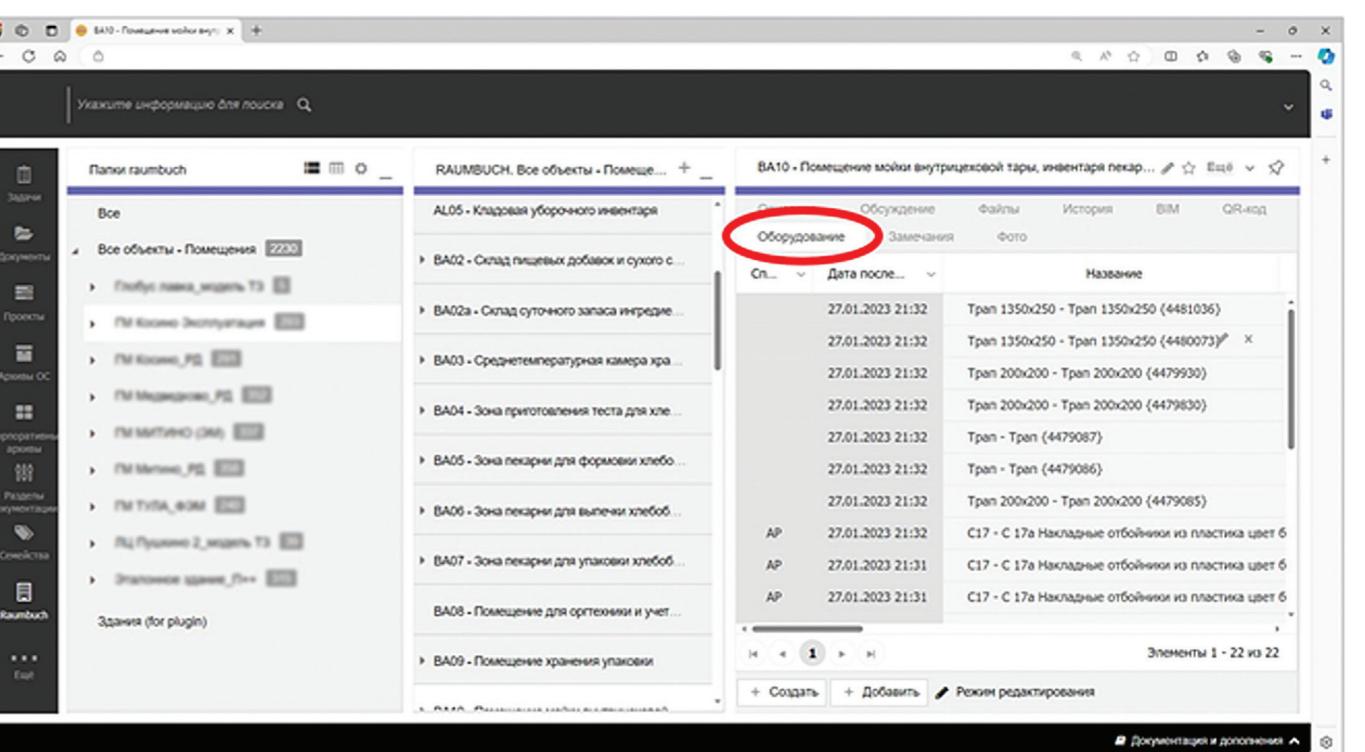


Рис. 13. Вкладка «Оборудование»  
Fig. 13. The "Equipment" tab

платформой и реальным физическим миром строительного процесса (рисунок 12).

8. Во вкладку «Оборудование» автоматически выгружается перечень имеющегося в данном помещении BIM-модели инженерного, торгового и производственно-технологического оборудования (рисунок 13).

9. Во вкладке «Замечания» доступны замечания или заявки, формирующиеся с привязкой к помещению и элементу модели, в которых при создании может назначаться ответственный исполнитель. Эта функциональ-

ность также может широко использоваться на этапе эксплуатации объекта (рисунок 14).

10. Вкладка «Фото». В ней во время строительства размещаются референсные фото данных помещений по другим объектам как образцы того, как должно данное помещение выглядеть в готовом виде. Этот инструмент был очень востребован в процессе строительства объектов ГМ «Косино» и ГМ «Митино», поскольку позволял оперативно визуализировать спорные вопросы по инженерии и отделке (рисунок 15).

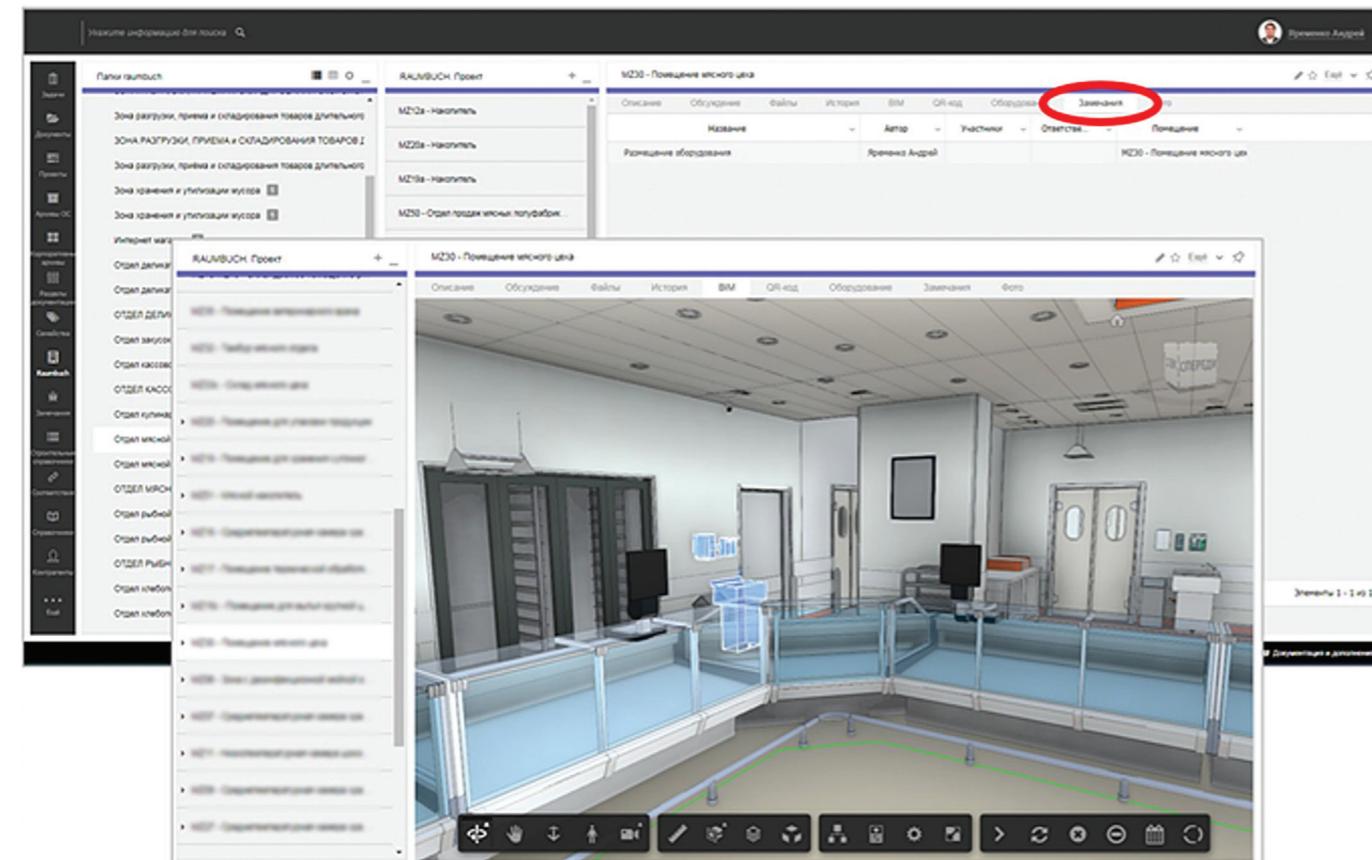


Рис. 14. Вкладка «Замечания»  
Fig. 14. The "Remarks" tab

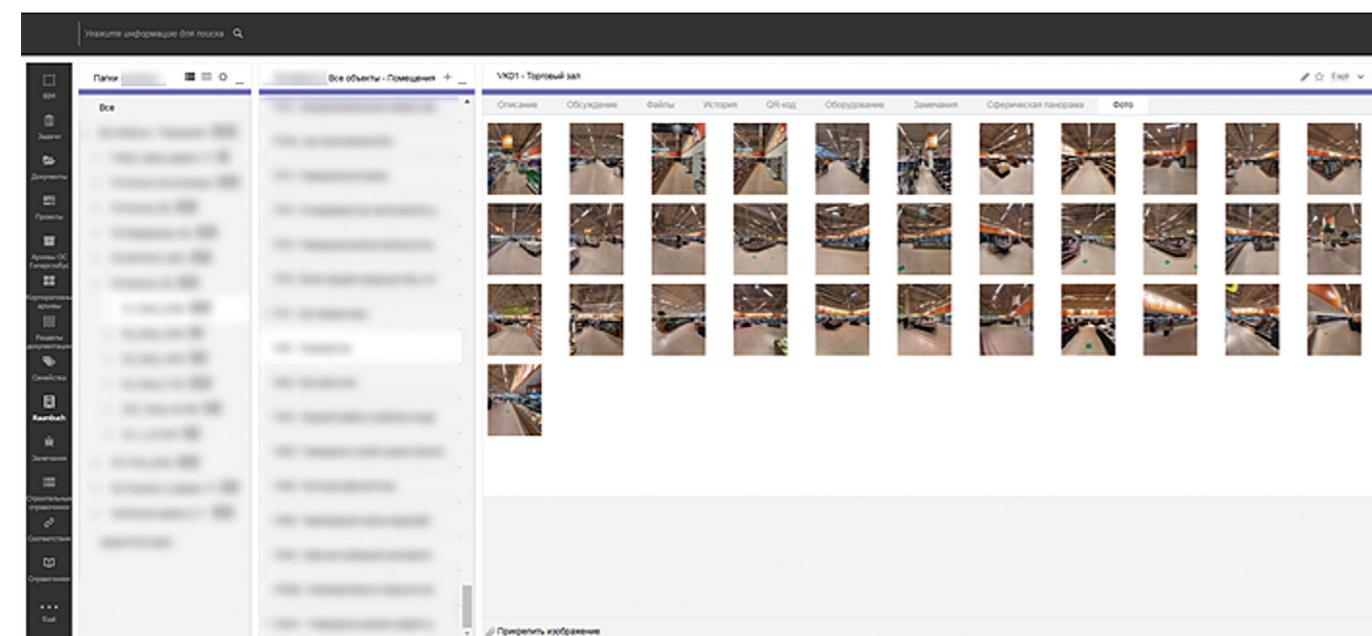


Рис. 15. Вкладка «Фото»  
Fig. 15. The "Photos" tab

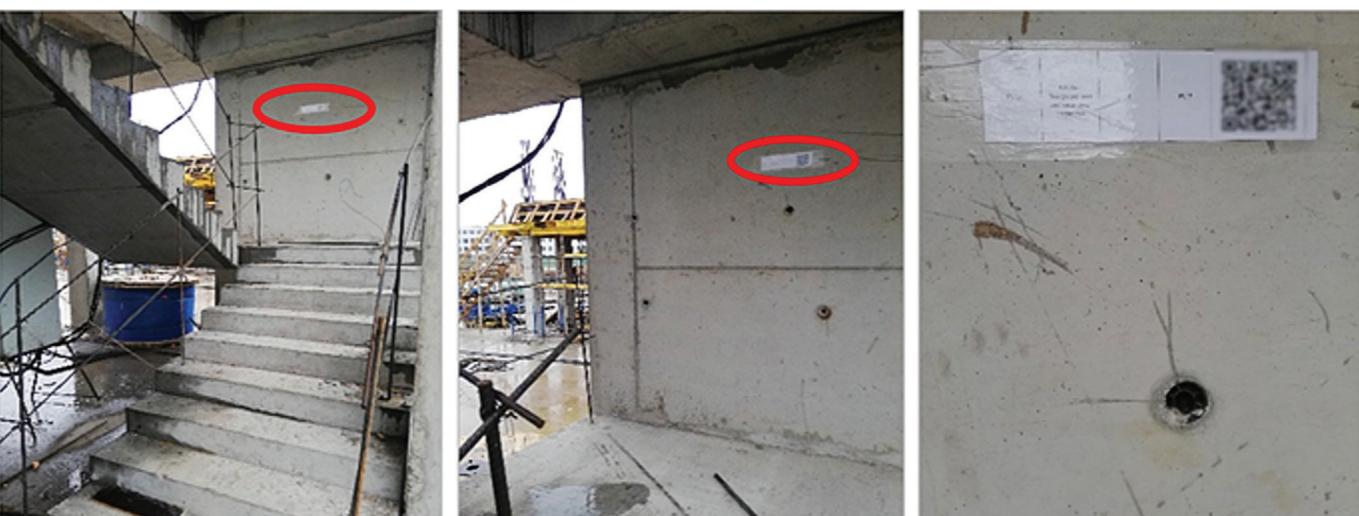


Рис. 16. Этикетки с QR-кодом на объекте  
Fig. 16. QR code labels on the object

Отметим, что на данный момент также добавлена возможность размещения и отображения сферических панорам помещений.

### 5. «Этикетирование» помещений

В Системе настроена автоматизированная выгрузка выборочной информации из карточек помещений категории «Raumbuch» для формирования «этикеток помещений». Этикетки автоматизированно выгружаются по этажам в преднастроенный шаблон формата Excel и могут быть распечатаны на листы формата А4.

После распечатки этикетки наклеиваются на доступные поверхности помещений строящегося объекта (рисунок 16):

Далее на стройплощадке с использованием смартфона или планшета обеспечивается переход к соответствующему помещению в Системе для получения информации, оперативного взаимодействия с участниками проекта или размещения замечаний.

### Результаты

Несмотря на отсутствие чёткой нормативной базы, регулирующей применение цифровых двойников в строительстве, их использование демонстрирует значительный экономический эффект. Как показывают глобальные тренды, рынок цифровых двойников стремительно растёт: по итогам 2023 года его объём достиг \$12,81 млрд, а согласно прогнозам Verified Market Research (март 2024 года), в ближайшие годы отрасль ожидает ускоренное развитие [7; 8].

В рамках данного исследования была разработана методология оценки эффективности цифровых двойников на основе анализа реального кейса внедрения системы управления строительством и эксплуатацией объектов сети гипермаркетов «Глобус». Ключевые критерии оценки включали:

- снижение трудозатрат за счёт автоматизации процессов;
- оптимизацию документооборота (технического и административного);
- ускорение проектирования, строительства и эксплуатационного контроля.

### Основные выводы:

1. Сокращение трудозатрат на 25 % за счёт:

- устранения дублирования данных;
- автоматизации отчётности и контроля качества;
- снижения времени на поиск и согласование документации.

2. Срок окупаемости проекта составил менее 2 лет, что подтверждает его высокую экономическую целесообразность даже в условиях отсутствия стандартизованных методик расчёта.

3. Косвенный эффект выразился:

- в повышении прозрачности процессов для всех участников проекта;
- в снижении количества ошибок и переделок на этапах строительства;
- в формировании единой цифровой базы данных для последующей эксплуатации объекта.

Хотя российская нормативная база пока не закрепляет понятие «цифрового двойника здания», практические результаты внедрения, как в случае с «Глобусом», доказывают его рентабельность и потенциал для масштабирования. Данный опыт может стать основой для разработки отраслевых стандартов оценки эффективности цифровых двойников в строительстве.

### Заключение

В данной статье авторы рассмотрели аспекты применения цифровых двойников в контексте единой информационной системы управления строительством и эксплуатации зданий с применением BIM-технологии, рассмотрена общая концепция процессного подхода к управлению строительством, приведён пример реализации процесса контроля качества строительства в рамках цифровой модели и цифрового двойника здания, описан подход к оценке экономической эффективности.

Резюмируя, отметим, что, с учётом роста сложности и информационной насыщенности современных строительных проектов, увеличения неструктурированных информационных потоков и общего тренда цифровизации строительной отрасли, глубокая систематизация информации об объекте капитального строительства и процессные подходы в контексте применения цифровых двойников зданий становятся особенно актуальными.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190 ФЗ : ред. от 01.05.2024 : принят Государственной Думой 22 декабря 2004 года : одобрен Советом Федерации 24 декабря 2004 года. – Москва, 2004. – 256 с. – Издание официальное.
- Моделирование информационное в строительстве. Основные положения по разработке стандартов информационного моделирования зданий и сооружений : ГОСТ Р 57563-2017 : Национальный стандарт Российской Федерации : утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28.07.2017 № 763-ст и введен в действие с 01 декабря 2017 г. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 15 с.
- Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения : ГОСТ Р 57700.37-2021 : Национальный стандарт Российской Федерации : утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 сентября 2021 г. № 979-ст и введен в действие впервые. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021. – 18 с.
- The Gemini Principles: Guiding values for the national digital twin and information management framework / A. Bolton, M. Enzer, J. Schooling et al. – DOI <https://doi.org/10.17863/CAM.32260> // Centre for Digital Built Britain. – UK, 2018 (дата обращения: 23.05.2025).

## REFERENCES

- Gradostritel'nyj kodeks Rossiijskoj Federatsii ot 29.12.2004 № 190 FZ : red. ot 01.05.2024 [Urban Planning Code of the Russian Federation dated 29.12.2004 No. 190 FZ : ed. Dated 05/01/2024] : priyat Gosudarstvennoj Dumoj 22 dekabrya 2004 goda : odobren Sovetom Federatsii 24 dekabrya 2004 goda [adopted by the State Duma on December 22, 2004 : approved by the Federation Council on December 24, 2004]. – Moscow, 2004. – 256 p. – Official publication.
- Modelirovanie informatsionnoe v stroitel'stve. Osnovnye polozheniya po razrabotke standartov informatsionnogo modelirovaniya zdanij i sooruzhenij [Information modeling in construction. The main provisions on the development of standards for information modeling of buildings and structures] : GOST R 57563-2017 : Natsional'nyj standart Rossiijskoj Federatsii [GOST R 57563-2017 : National Standard of the Russian Federation] : utverzhdyon Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskому regulirovaniyu i metrologii ot 28.07.2017 № 763-st i vvedyon v dejstvie s 01 dekabrya 2017 g. [approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated July 28, 2017 No. 763-st and entered into force on December 01, 2017]. – Moscow : Standartinform, 2017. – 15 p.
- Komp'yuternye modeli i modelirovanie. TSifrovye dvojnikи izdelij. Obshchie polozheniya [Computer models and modeling. Digital counterparts of products. General provisions] : GOST R 57700.37-2021 : Natsional'nyj standart Rossiijskoj Federatsii [GOST R 57700.37-2021 : National Standard of the Russian Federation] : utverzhdyon Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskому regulirovaniyu i metrologii ot 16 sentyabrya 2021 g. № 979-st i vvedyon v dejstvie vperwyje [approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September 16, 2021 No. 979-st and put into effect for the first time]. – Moscow : Rossijskij institut standartizatsii [Russian Institute of Standardization], 2021. – 18 p.
- The Gemini Principles: Guiding values for the national digital twin and information management framework / A. Bolton, M. Enzer, J. Schooling et al. – DOI <https://doi.org/10.17863/CAM.32260> // Centre for Digital Built Britain. – UK, 2018 (accessed: 23.05.2025).
- Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) – Information management using building information modelling : ISO 19650-1:2018 : Part 1: Concepts and principles / International Organization for Standardization. – 2018. – 34 p.
- Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya [Quality management systems. Requirements] : GOST R ISO 9001-2015 Natsional'nyj standart Rossiijskoj Federatsii [GOST R ISO 9001-2015 : National Standard of the Russian Federation] : utverzhdyon i vvedyon v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskому regulirovaniyu i metrologii ot 28 sentyabrya 2015 g. № 1391-st : pereizdanie v fevrale 2020 g. [approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September 28, 2015 No. 1391-st : republished in February 2020]. – Moscow : Standartinform, 2020. – 32 p.
- Tsifrovoy dvojnik Digital Twin of Organization, DTO [The Digital Twin of the Organization, DTO] // Tadviser.ru. Gosudarstvo. Bизнес.Tekhnologii [Tadviser.ru. State. Business. Technologies] : [online resource]. – 04/25/2024. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой\\_двойник\\_\(Digital\\_Twin\\_of\\_Organization,\\_DTO\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_(Digital_Twin_of_Organization,_DTO)) (accessed: 23.05.2025).
- MarketsandMarkets. Digital Twin Market by Industry (Manufacturing, Energy & Utilities, Aerospace, Healthcare), Application (Product Design & Development, Predictive Maintenance), Technology, and Region – Global Forecast to 2030. – URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html> (accessed: 23.05.2025).

УДК 69.059

## Политика и инновации в управлении строительными отходами и продуктами сноса в постконфликтной Сирии

Policy and Innovation for Managing Construction and Demolition Waste in Post-Conflict Syria

Перунов Александр Сергеевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Испытания сооружений», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, PerunovAS@mgsu.ru

Perunov Alexander Sergeevich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Testing of Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, tonydayoub1995@hotmail.com

Дауб Тони

Аспирант кафедры «Технологии и организация строительства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, tonydayoub1995@hotmail.com

Dayoub Tony

Postgraduate student of the Department of Technologies and Organization of Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, tonydayoub1995@hotmail.com

## Аннотация.

В этом исследовании основное внимание уделяется разработке устойчивой структуры управления строительными отходами в постконфликтной Сирии, интеграции передового мирового опыта с локализованными решениями. В исследовании подчеркивается острая необходимость перехода от утилизации отходов на полигонах, к принципам круговой экономики, с использованием таких технологий, как роботизированная автоматизация и многокритериальный анализ решений (AHP, PROMETHEE).

Особое внимание уделяется сирийской методологии IRMIDD, которая позволяет перерабатывать строительные отходы непосредственно на месте. Это снижает зависимость от импортных материалов на 70 % и превращает миллионы тонн бетонных отходов в повторно используемые ресурсы. Методология также способствует созданию локальных рабочих мест и

## Abstract.

This study focuses on developing a sustainable framework for managing construction waste in post-conflict Syria, integrating global best practices with localized solutions. The research highlights the urgent need to transition from landfill-dependent waste disposal to circular economy principles, leveraging technologies such as robotic automation, and multi-criteria decision analysis (AHP, PROMETHEE).

A key emphasis is placed on Syria's IRMIDD methodology, which enables on-site recycling of debris, reducing reliance on imported materials by 70 % and transforming millions of tons of concrete waste into reusable resources. The analysis demon-

## Введение

Постконфликтное восстановление Сирии сталкивается с беспрецедентными вызовами, включая необходимость управления миллионами тонн строительного мусора и продуктов сноса [1]. Для решения этой проблемы требуется комплексный подход, объединяющий политики-нормативные механизмы, инновационные технологии и локальные решения. В исследовании анализируются мировые практики и адаптируемые к региональным условиям инновации, такие как сирийская методология IRMIDD. Настоящая работа направлена на разработку

минимизации экологического ущерба. Анализ показывает, что стратегические политические реформы в сочетании с цифровыми инструментами и локализованными центрами переработки отходов могут сэкономить миллиарды долларов на реконструкцию, одновременно минимизируя вред окружающей среды. В исследовании предлагаются действенные рекомендации для политиков и строительных компаний, выступающих за смену парадигмы, когда отходы становятся ресурсом, способствуя экономическому восстановлению и экологической устойчивости в Сирии.

**Ключевые слова:** современные строительные технологии; выбор строительной техники; BIM в строительстве; переработка строительных отходов и продуктов сноса; устойчивое строительство; роботизированная автоматизация; многокритериальный анализ решений; бережливое строительство; чувствительность анализа.

strates that strategic policy reforms, combined with digital tools and localized waste-processing hubs, could save billions of dollars in reconstruction costs while minimizing environmental harm. The paper proposes actionable recommendations for policymakers and construction firms, advocating for a paradigm shift where waste becomes a resource, fostering economic recovery and ecological resilience in Syria.

**Keywords:** modern construction technologies; construction equipment selection; BIM in construction; construction and demolition waste recycling; sustainable construction; robotic automation; multi-criteria decision analysis; lean construction; sensitivity analysis.

плана устойчивого управления строительными отходами в Сирии, сочетающего уроки мировой практики и адаптированные к региональным условиям инновации [1].

Акцент сделан на роли государственной политики в создании нормативной базы, стимулирующей переработку, внедрение цифровых инструментов (например, 3D-сканирование) для планирования демонтажа, а также развитие локальных перерабатывающих мощностей. Исследование опирается на анализ опыта стран с высоким уровнем переработки [2], данных по сирийским разрушениям [1] и научных работ, посвященных многокритери-

альным методам выбора технологий [3]. Это позволяет сформулировать комплексные рекомендации, учитывающие не только технико-экономические, но и социальные аспекты (например, создание рабочих мест через локальную переработку). Цель статьи – предложить стратегию, которая преобразует строительные отходы из проблемы в ресурс, способствуя экологически безопасной и экономически эффективной реконструкции Сирии.

## Материалы и методы

Материалы и методы исследования включают комплексный анализ научных публикаций, статистических данных и практических примеров, адаптированных к условиям постконфликтного восстановления Сирии. Для выбора оптимальной строительной техники применены методы многокритериального анализа (АНР и PROMETHEE). Процесс включал следующие этапы:

- **Определение критерииев.** Были выделены ключевые параметры, такие как производительность, стоимость владения, экологическая эффективность и способность к интеграции с системами переработки отходов.
- **Назначение весов.** Каждому критерию был присвоен вес на основе экспертных оценок и данных из литературы [3]. Например, экологическая эффективность получила больший вес (0,4) по сравнению с экономическими параметрами (0,3) и техническими характеристиками (0,3).
- **Ранжирование альтернатив.** Используя АНР, были ранжированы различные модели строительной техники. PROMETHEE дополнит этот анализ, учитывая предпочтения экспертов через функции предпочтений для каждого критерия.

Дополнительно проведен анализ экологических показателей переработки отходов, включая потенциал повторного использования материалов. Все данные обобщены для формулирования стратегии, направленной на минимизацию образования отходов и максимизацию их переработки. На основе проведенного анализа были получены следующие результаты, демонстрирующие потенциал внедрения предложенной стратегии в условиях Сирии. Особое внимание уделяется количественным оценкам объемов отходов и их экономической эффективности при переработке.

## Результаты

### 1. Роль инновационных технологий в управлении строительными отходами при восстановлении Сирии

Постконфликтное восстановление Сирии требует внедрения технологий, которые не только ускоряют реконструкцию, но и минимизируют образование строительных отходов и продуктов сноса. Автоматизация и цифровые инструменты играют ключевую роль в этом процессе. Например, роботизированные комплексы, такие как полуавтоматический каменщик SAM, увеличивают скорость кладки в 5–6 раз по сравнению с ручным трудом, сокращая при этом потери материалов из-за ошибок и перепадов [4]. Это напрямую снижает объемы строительного мусора, что критично для регионов, где уже накоплено свыше 140 млн тонн обломков [1].

Цифровые технологии, такие как информационное моделирование зданий (BIM) и 3D-сканирование, трансформируют подходы к демонтажу. Как показано в исследовании Ge et al. (2017), интеграция BIM с данными аэрофотосъемки позволяет создавать точные модели разрушенных зданий, оптимизируя разборку конструкций для максимального повторного использования материалов [5]. В Сирии это особенно актуально, где методология IRMIDD предполагает локальную переработку обломков непосредственно в зонах разрушений, что снижает потребность в транспортировке и импорте новых ресурсов [1].

Таким образом, современные технологии становятся инструментом не только для ускорения строительства, но и для реализации принципов устойчивого управления отходами. Их внедрение в сирийских условиях позволяет превратить строительный мусор в ресурс, сократив затраты на восстановление и снизив экологический ущерб.

### 2. Критерии выбора строительной техники в контексте управления отходами

Правильный выбор строительных машин в постконфликтной Сирии напрямую влияет на скорость восстановления, минимизацию образования отходов и их интеграцию в цикл переработки. Хотя традиционно технику выбирали исходя из производительности и стоимости владения, современные условия требуют расширения критериев оценки [6].

Основные группы критериев (подробно представлены в таблице 1) теперь включают возможность интеграции с системами переработки: оборудование, обеспечивающее щадящий демонтаж (например, экскаваторы с навесным инструментом для аккуратного извлечения арматуры), повышает долю вторичных материалов и адаптацию к локальным условиям. В Сирии, где инфраструктура повреждена, приоритет получают мобильные и компактные машины, способные работать в стесненных условиях разрушенных кварталов.

Многокритериальные методы (АНР, PROMETHEE) теперь оценивают не только экономику владения, но и

Группа критериев Criteria group	Конкретные параметры Specific parameters
Технические показатели Technical Indicators	Производительность, мощность, вылет стрелы, проходимость, надежность работы Productivity, power, boom reach, terrain capability, operational reliability
Экономические показатели Economic indicators	Цена приобретения, затраты на топливо и обслуживание, срок окупаемости, остаточная стоимость Purchase price, fuel and maintenance costs, payback period, residual value
Условия строительства Construction conditions	Тип грунта и рельеф местности, ограниченность пространства, наличие коммуникаций, климатические условия / Soil type and terrain, spatial constraints, utility presence, climatic conditions
Организационно-управленческие критерии / Organizational	Наличие своей техники или аренда Ownership vs. rental availability
Факторы труда и безопасности Labor & safety	Квалификация и количество персонала Workforce qualifications and size

Табл. 1. Основные факторы, влияющие на выбор строительной техники  
Tab. 1. Key factors influencing construction equipment selection

Регион Region	Доля отходов, отправляемых в переработку Recycling rate	Принципы обращения с отходами Waste management principles
Москва (около 2012 г.) Moscow (circa 2012)	~ 36 %	Большинство отходов вывозится на полигоны захоронения Most waste is landfilled
Дания, Нидерланды, Швеция Denmark, Netherlands, Sweden	~ 90 %	Почти все отходы перерабатываются; захоронение только при невозможности переработки Nearly all waste is recycled; landfilling only when recycling is impossible

Табл. 2. Уровень переработки строительных отходов и продуктов сноса в разных регионах  
Tab. 2. Construction and demolition waste recycling rates in different regions

экологический след. Например, Байрам И. и Чалыш Г. (2017) учитывали расход топлива и выбросы при выборе экскаваторов [3], что в сирийском контексте дополняется анализом способности техники разделять материалы на этапе демонтажа (бетон, металл, кирпич) и совместимости с локальными перерабатывающими комплексами методологии IRMIDD [1].

Правильное ранжирование и учёт перечисленных факторов позволяет подобрать технику, не только соответствующую условиям проекта, но и минимизирующую образование отходов. Например, выбор машин с функцией щадящего демонтажа (экскаваторы с навесным инструментом для извлечения целых элементов) повышает долю повторно используемых материалов на 40–60 %, что критично для Сирии, где переработка миллионов тонн скопившихся бетонных обломков может сэкономить миллиарды долларов. Это сокращает не только сроки и себестоимость работ, но и экологический след, снижая нагрузку на полигоны.

Многокритериальный подход, учитывающий локальные условия (разрушенная инфраструктура, доступность перерабатывающих мощностей) и глобальные практики (циркулярная экономика), подтверждает свою эффективность: в сирийских проектах методология IRMIDD, интегрирующая технику для сортировки отходов, сократила потребность в импортных материалах на 70 % [1].

Таким образом, научно обоснованный выбор техники становится основой для перехода от линейной модели строительства к замкнутой, где отходы превращаются в ресурс.

### 3. Экологические аспекты переработки строительных отходов

Масштабное строительство ежегодно генерирует более 2,5 млрд тонн материалов, включая строительные отходы и продукты сноса (например, бетон, металл, кирпич), что составляет треть от общего объема твердых отходов человечества. Без переработки эти материалы представляют серьезную экологическую проблему. Традиционно основные методы обращения со строительным мусором – вывоз на полигоны и частичное повторное использование в виде вторичных материалов. Однако захоронение на свалках приводит к загрязнению почв и грунтовых вод, а также к утрате ценных ресурсов. Как отмечают Золотухин С. Н. с соавторами, удаление строительных отходов на полигоны – наиболее экологически небезопасный метод, хотя он до сих пор широко применяется.

Во многих развитых странах проводится политика, затрудняющая захоронение строительного мусора и стимулирующая его переработку. Например, в странах ЕС уже установлены законы, делающие вывоз на свалку экономически невыгодным, и в результате утилизация и рециклирование старых конструкций становятся не только экологически полезными, но и экономически целесообразными [7].

В таблице 2 сопоставлены показатели переработки отходов в различных регионах. В Москве в 2012 году перерабатывалось лишь около 36 % строительного мусора, остальное вывозилось на полигоны [2]. Очевидно, что львиную долю строительных отходов можно успешно перерабатывать, а получившееся вторсырье вновь пускать в оборот. Соответствующая цель была поставлена Правительством РФ: в 2022 году был утвержден паспорт программы по применению вторичных ресурсов в сфере строительства и ЖКХ на период до 2030 года. Ожидается, что к этому моменту около 40 % вторичных ресурсов строительных отходов будут использоваться повторно.

Однако пока ситуация обещает ждать лучшего. Так, по данным Росприроднадзора [8], за 2023 год в России было обработано 97 млн тонн отходов, из которых лишь 12,3 млн тонн (то есть менее 13 %) было направлено на дальнейшую переработку. Для сравнения, в передовых странах Европы (Дания, Нидерланды, Швеция) повторно используется до 90 % строительных отходов, и захоронение допускается только при доказанной невозможности переработки [2]. Очевидно, что России есть, к чему стремиться в области обращения со строительными отходами. Повышение уровня переработки позволило бы существенно снизить нагрузку на свалки и потребность в новых сырьевых материалах.

Что касается сирийского случая, то главный урок, извлеченный из вышеизложенной информации, заключается в том, что восстановление разрушенных территорий требует отказа от массового сноса и необходимости государственной поддержки, которая показала свои положительные результаты в Москве и Европе. Возможные меры, такие как введение налоговых льгот для компаний, использующих вторсырье, и увеличение стоимости вывоза отходов на полигоны, сделают переработку экономически привлекательной.

Низкая доля утилизации в ряде регионов обусловлена устаревшими методами демонтажа зданий. Часто применяют снос с обрушением конструкций с последующим дроблением обломков. Полученный при этом бетонный бой обычно используют лишь как заполнение при планировке или на отсыпках, а металл сдаают в лом для переплавки. Такой подход считается тупиковым с точки зрения экологии и экономики: качество вторичного щебня низкое из-за карбонизации бетона, переплавка металла требует много энергии и сопровождается выбросами.

Исследования показывают, что прочность бетона старых зданий со временем не снижается, так же как и прочностные характеристики арматуры и кирпича, находившихся в благоприятных условиях эксплуатации. Это означает, что эти материалы пригодны для повторного применения. Поэтому вместо грубого дробления конструкций всё большую поддержку получает идея разборки зданий поэлементно с сохранением материалов.

При поэтапном демонтаже извлекаются целые элементы (плиты, блоки, металлические части), которые после проверки прочности могут быть повторно использованы в новом строительстве. Такой метод значительно сокращает объём строительного мусора и связанные с ним выбросы CO<sub>2</sub>. Золотухин С. Н. и соавторы называют переход к безотходным технологиям разборки и отказ от сплошного сноса одной из первоочередных задач для обеспечения экологической безопасности городского развития [2].

Кроме того, переработка отходов позволяет снизить потребность в первичных материалах. К примеру, дроблённый бетон можно использовать в качестве заполнителя (щебня) при дорожном строительстве или для неответственных бетонных слоёв. В работе Навагамува У. П. (2015) показано, что обломки кирпичной кладки (бутовый мусор) после удаления штукатурки напрямую пригодны для устройства дорожного основания, а измельчённый строительный мусор с добавлением пластиковых гранул может заменять грунт при сооружении насыпей [9]. Таким образом отходы превращаются во вторичное сырьё.

Однако для реализации этого потенциала требуются соответствующие технологии сортировки, дробления и очистки отходов. В Москве переработкой строительного мусора с 1996 года занимается, например, корпорация «Сатори» – первая компания в городе, внедрившая комплекс по переработке отходов строительства [2]. Сейчас действуют несколько стационарных линий переработки, производящих вторичные щебень и песок.

Сирия может многому научиться у Москвы, ведь есть причина, по которой российское правительство вкладывает в это так много усилий. Переработка строительных отходов важна не только с экологической, но и с экономической точки зрения.

Экономическая эффективность вторичного использования подтверждается расчётами в ряде исследований. Так, Агад А. А. и др. оценили, что традиционный вывоз и захоронение ~ 142,5 млн тонн бетонных обломков и ~ 6,65 млн тонн стали, оставшихся после военных разрушений в Сирии, обошлись бы почти в \$19 млрд, тогда как переработка этого же объёма на месте – около \$3 млрд. Экономия – порядка \$15–17 млрд, не считая создания рабочих мест на локальных перерабатывающих предприятиях.

В таблице 3 представлены оценочные объёмы основных видов строительных отходов и продуктов сноса, образовавшихся в разрушенных районах Сирии. Анализ показывает, что большинство материалов может быть возвращено в хозяйственный оборот, что обеспечивает значительную экономическую выгоду. Например, переработанный бетон может служить заполнителем в новом бетоне, металл – повторно использоваться в конструкци-

Вид отходов Waste type	Количество Volume	Примечание Note
Бетон и железобетон Concrete and reinforced concrete	≈ 142,5 млн тонн / million tons	Основной объём отходов; переработка экономит ~ \$15 млрд (против захоронения) Main waste volume; recycling saves ~\$15 billion (vs. landfilling)
Стальной лом Steel scrap	≈ 6,65 млн тонн / million tons	Арматура, металлоконструкции; переработка экономит ~ \$0,8 млрд Rebar, metal structures; recycling saves ~ \$0.8 billion
Прочие материалы Other materials	≈ 0,78 млн тонн / million tons	Подлежат сортировке; часть использована повторно, остальное – утилизировано Sorted; part reused, remainder eco-processed

Табл. 3. Оценочные объёмы строительных отходов и продукты сноса при восстановлении разрушенных районов (сирийский опыт) и эффект от их переработки

Tab. 3. Estimated volumes of construction and demolition waste in the reconstruction of destroyed areas (Syrian case) and the effect of their recycling

ях или отправляются в металлургический цикл, а пластики – перерабатываются для различных целей [1].

#### 4. Новые методы оптимизации строительных процессов

Современные условия требуют не только новых машин и экологичных решений, но и совершенствования самой организации строительного производства. Оптимизация процессов – важнейшее направление повышения эффективности строительства. Рассмотрим некоторые новые подходы к оптимизации, появившиеся в последние годы.

Современный выбор строительной техники основывается на научно обоснованных методах, таких как много критериальный анализ (AHP, TOPSIS), что оптимизирует процесс подготовки строительства [3]. Например, методика формирования рационального комплекта землеройных машин, предложенная Ефимовым В. В. (2022), обеспечивает устойчивую и ритмичную работу техники в городских условиях [6]. В целом, интеграция методов оптимального планирования при подготовке строительных работ – важный резерв повышения производительности.

Другим направлением оптимизации является совершенствование технологий работ для сокращения продолжительности операций. Пример – комплексная механизация земляных работ с синхронной работой нескольких машин. Если раньше экскаватор и бульдозер могли работать последовательно, то сейчас разрабатываются организационные схемы их параллельной работы в котловане с учётом технологической надёжности и взаимозаменяемости техники [6]. Применяется принцип равномерности: машины подбираются так, чтобы их производительности были сбалансированы и ни одна не простоявала.

Кроме того, используются программные комплексы для оперативного управления строительно-монтажными работами (системы планирования и мониторинга строительства). Они позволяют оптимизировать графики работ в режиме реального времени, перераспределять ресурсы при отклонениях и тем самым избегать потери времени.

Наконец, важным новым инструментом стала концепция Lean Construction (бережливого строительства), хотя в представленных источниках она прямо не рассматривалась. Её суть – устранение всех видов потерь (простоев, лишних перевозок, лишних запасов материалов) за счёт оптимальной организации процессов. Это достигается, как раз, с помощью вышеупомянутых технологий: точного планирования (BIM), своевременного обеспечения (в том числе через локальную переработку отходов), гибкого управления техникой и персоналом. В итоге строительные проекты реализуются быстрее, с меньшими издержками и отходами.

Всё вышесказанное относится к проектам переработки отходов и реконструкции. Например, в военном стро-

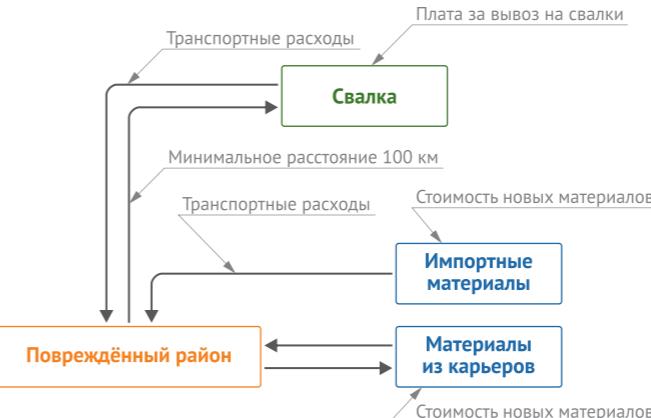


Рис. 1. Схема обычной транспортировки твёрдых отходов  
Fig. 1. Layout of Conventional solid waste transportation

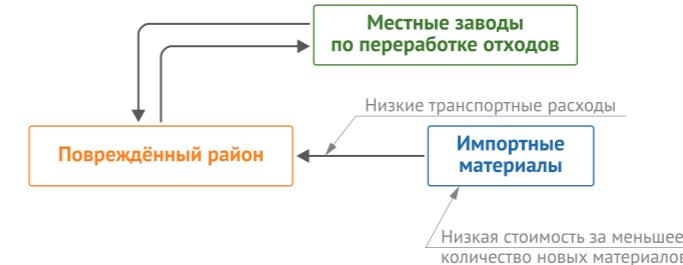


Рис. 2. Схема инновационной методологии восстановления переработки строительного мусора в повреждённых районах (IRMIDD)  
Fig. 2. Layout of Innovative Rehabilitation Methodology of Recycling Buildings' Debris in Damaged Districts (IRMIDD)

ительстве и реконструкции после катастроф также внедряются оптимизационные подходы. В рассмотренном сирийском случае предложена «Иновационная методология восстановления» (IRMIDD), которая предполагает создание локальных пунктов переработки непосредственно в районах разрушения вместо вывоза мусора на дальние свалки. Район напрямую обеспечивается восстановлением материалов через местные перерабатывающие заводы, а необходимость в дальних перевозках и импорте новых материалов минимальна. Такой подход одновременно решает задачу трудоустройства местного населения и удешевляет восстановительные работы. Внедрение IRMIDD позволило сократить продолжительность и стоимость вывоза отходов практически до нуля для основной массы материалов, что существенно ускорило процесс расчистки территорий [1].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Awad, A. A. Innovative Rehabilitation Methodology of Recycling Buildings' Debris in Damaged Districts (IRMIDD) / A. A. Awad, F. A. Alkhaili, A. Al-Dulaimy // Jeaconf. – 2022. – Vol. 1, Iss. 1.
2. Грибкова, О. С. Эколого-экономическая оценка мероприятий по переработке строительных отходов в Москве / О. С. Грибкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 5. – С. 368–369.
3. Bayram, İ. Selection of Construction Equipment Using Multi-Criteria Decision-Making Methods / İ. Bayram, G. Çalış // Procedia Engineering : Creative Construction Conference 2017, CCC 2017, 19-22 June 2017, Primosten, Croatia. – Croatia, 2017. – Vol. 196. – Pp. 286–293.
4. Azmi, A. Selection Criteria of Equipment in Construction Projects / A. Azmi, S. K. Ahmad, M. Danish // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 4, Iss. 7. – Pp. 2328–2335.
5. Deconstruction Waste Management Through 3D Reconstruction and BIM: A Case Study / X. J. Ge, P. Livesey, J. Wang et al. // Visualization in Engineering. – 2017. – Vol. 5. – Art. 13.
6. Ефимов, В. В. Обоснование рационального комплекта машин для земляных работ в условиях городской застройки : дис. ... канд. техн. наук : 2.1.7 / Ефимов Владимир Владимирович ; МГСУ. – Москва, 2023. – 114 с.
7. New Approaches to the Development of Construction Technologies / S. Zolotukhin, O. Kukina, E. Artemova et al. // E3S Web of Conferences : International Conference on Efficient Production and Processing (ICEPP-2021). – 2021. – Vol. 247. – Art. 01014.
8. Отчёт по форме 2-ТП (отходы) : Информация об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления // Росприроднадзор. Федеральная служба по надзору в сфере природо-

На рисунках 1 и 2 показаны различия между обычной схемой транспортировки твёрдых отходов и схемой IRMIDD.

#### Заключение

Восстановление Сирии требует перехода от линейных методов утилизации строительных отходов и продуктов сноса к устойчивым, циклическим системам:

- Интеграция политики: стимулирование переработки через налоговые льготы и штрафы за использование свалок.
- Разработка нормативной базы, регулирующей использование вторичных материалов.
- Внедрение технологий: развёртывание роботизированных систем для точной деконструкции и мобильных установок по переработке материалов.
- Расширение прав и возможностей на местном уровне: внедрение методологии IRMIDD для создания децентрализованных центров переработки отходов, создания рабочих мест и сокращения выбросов от транспорта на 90 %.
- Создание локальных перерабатывающих мощностей с применением цифровых технологий, таких как BIM и 3D-сканирование.

Предлагаемый подход не только решает текущие проблемы постконфликтного восстановления Сирии, но и создаёт прецедент для устойчивого развития городов в других регионах мира. Социальные преимущества включают создание до 50000 рабочих мест в сфере переработки отходов, особенно в регионах с высоким уровнем безработицы. Кроме того, локальные инициативы по переработке могут повысить экологическую осведомлённость населения и способствовать формированию культуры устойчивого потребления.

Однако исследование имеет ряд ограничений:

- Отсутствие полномасштабных экспериментальных данных для некоторых регионов Сирии.
- Ограниченная доступность статистики по реально-му уровню переработки отходов в постконфликтных условиях.

В будущем рекомендуется провести эмпирические исследования для проверки предложенной стратегии в реальных условиях, а также изучить влияние социальных факторов (например, уровня осведомлённости населения) на успешность внедрения устойчивых практик.

пользования : [официальный сайт]. – URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/>.

9. Nawagamuwa, U. P. Utilization of Building Debris for Road Construction in the Northern Province of Sri Lanka /

#### REFERENCES

1. Awad, A. A. Innovative Rehabilitation Methodology of Recycling Buildings' Debris in Damaged Districts (IRMIDD) / A. A. Awad, F. A. Alkhalil, A. Al-Dulaimy // Jeaconf. – 2022. – Vol. 1, Iss. 1.
2. Gribkova, O. S. Ekhologo-ekhonomicheskaya otsenka mero-priyatiy po pererabotke stroitel'nykh otkhodov v Moskve [Ecological and Economic Assessment of Measures for Recycling Construction Waste in Moscow] / O. S. Gribkova // Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. – 2012. – No. 5. – Pp. 368–369.
3. Bayram, İ. Selection of Construction Equipment Using Multi-Criteria Decision-Making Methods / İ. Bayram, G. Çalış // Procedia Engineering : Creative Construction Conference 2017, CCC 2017, 19-22 June 2017, Primosten, Croatia. – Croatia, 2017. – Vol. 196. – Pp. 286–293.
4. Azmi, A. Selection Criteria of Equipment in Construction Projects / A. Azmi, S. K. Ahmad, M. Danish // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 4, Iss. 7. – Pp. 2328–2335.
5. Deconstruction Waste Management Through 3D Reconstruction and BIM: A Case Study / X. J. Ge, P. Livesey, J. Wang et al. // Visualization in Engineering. – 2017. – Vol. 5. – Art. 13.
6. Efimov, V. V. Obosnovanie ratsional'nogo komplekta mashin dlya zemlyanykh rabot v usloviyakh gorodskoj zastroyki : dis.... kand. tekhn. nauk [Substantiation of a rational set of machines for earthworks in urban conditions : dis. ... Candidate of Technical Sciences] : 2.1.7 / Efimov Vladimir Vladimirovich ; MGSU. – Moscow, 2023. – 114 p.
7. New Approaches to the Development of Construction Technologies / S. Zolotukhin, O. Kukina, E. Artemova et al. // E3S Web of Conferences : International Conference on Efficient Production and Processing (ICEPP-2021). – 2021. – Vol. 247. – Art. 01014.
8. Otchet po forme 2-TP (otkhody) [Report on form 2-TP (waste)] : Informatsiya ob obrazovanii, obrabotke, utilizatsii, obezvrezhivanii, razmeshhenii otkhodov proizvodstva i potrebleniya [Information on the formation, treatment, disposal, neutralization, and disposal of industrial and consumer waste] // Rosprirodnadzor. Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere prirodopol'zovaniya [Rosprirodnadzor. Federal Service for Supervision of Natural Resources Management] : [official website]. – URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/>.
9. Nawagamuwa, U. P. Utilization of Building Debris for Road Construction in the Northern Province of Sri Lanka / U. P. Nawagamuwa, P. Shankar // Proceedings of International Conference on Structural Engineering : International Conference on Geotechnical Engineering, Colombo, Sri Lanka 2015. – Colombo, Sri Lanka, 2015. – Vol. 1. – Pp. 637–640.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Статья или её части не должны быть ранее опубликованы или находиться на рассмотрении в других изданиях. Автор несёт ответственность за соответствие информации, содержащейся в представленных документах.
2. Статьи должны содержать результаты научных исследований, аналитику, описание проектов и др. в области технического регулирования в строительстве.
3. Статью необходимо представить в электронном виде.
4. Перед названием статьи должен быть указан индекс УДК.
5. Название статьи, Ф. И. О. авторов, аннотацию, ключевые слова, название таблиц и иллюстраций следует приводить на русском и английском языках.
6. На отдельном листе нужно представить сведения об авторах: фамилия, имя, отчество (полностью), учёная степень, звание, должность, место работы, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты.
7. Объём рукописи не должен превышать 20 страниц (файл в формате .doc в MS Word).
8. Текст статьи должен быть напечатан следующим образом: с подрисуночными подписями, номерами рисунков и необходимыми пояснениями к ним; шрифт – Times New Roman, 12 пт., межстрочный интервал – полуторный.
9. Рисунки с подрисуночными подписями и номерами следует направлять отдельными файлами в формате .jpeg (разрешение не менее 300 dpi). Имя файла должно соответствовать наименованию или номеру рисунка в тексте статьи.
10. Библиографический список на русском и английском языках должен включать только литературу, цитируемую в статье. Ссылки на источники следует приводить в тексте в квадратных скобках. Список оформляется в соответствии с ГОСТ 7.0.5 - 2008.

**Научно-технический журнал  
«Строительное производство» издаётся с 2010 года  
под следующими наименованиями:**

**с 2010 года** – «Техническое регулирование. Строительство.  
Проектирование. Изыскания»

**с 2012 года** – «Технология и организация строительного производства»

**с 2019 года** – «Строительное производство»

**Издатель: ООО «Национальный образовательный центр»**

**Учредитель: Старикин Ю.И.**

**Главный редактор: Лапидус А. А.**

**Выпускающий редактор: Козлова А. Ю.**

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере  
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций  
(Роскомнадзор)

**Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 – 75299  
от 25.03.2019 ЭЛ № ФС 77 – 75165 от 22.02.2019**

Цитирование, частичное или полное воспроизведение материалов –  
только с согласия редакции

Авторы опубликованных материалов несут ответственность  
за достоверность приведенных в статьях сведений, точность данных  
по цитируемой литературе и за использование в статьях данных,  
не подлежащих открытой публикации

Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения,  
не разделяя точку зрения автора

Редакция не несет ответственности за содержание рекламы  
и объявлений

СТРОИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО 2 (54) 2025  
Дата публикации: 25 июня 2025 года

Отпечатано в типографии ООО «PROMZONA»  
105066, Москва, ул. Ольховская, д. 14, стр. 4  
Тираж 550 экз. Свободная цена

Корректор: Широкова М. А.  
Дизайн и вёрстка: Соколов А. Е.

