

Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий

Строительные конструкции,
здания и сооружения

Основания и фундаменты,
подземные сооружения

Строительные материалы
и изделия

Технология и организация строительства

Строительная механика

Градостроительство, планировка сельских
населенных пунктов

Управление жизненным циклом объектов
строительства





ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2022 года)

eISSN 2949-1835
DOI: 10.23947/2949-1835

Том 4, № 4, 2025

Журнал создан в целях информирования читательской аудитории о новейших достижениях, тенденциях и перспективах в области строительства, архитектуры, градостроительства и смежных научных направлений. Издание является платформой для научно-образовательного сотрудничества российских и иностранных исследователей, вовлеченных в строительную сферу.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

- 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)
- 2.1.5 – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 2.1.7 – Технология и организация строительства (технические науки)
- 2.1.9 – Строительная механика (технические науки)
- 2.1.13 – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 2.1.14 – Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)

Индексация
и архивация

РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, Internet Archive, Google Scholar, Mendeley, AGRIS, SCILIT, Baidu, OpenAlex, Library of Congress, Semantic Scholar, Berkeley, OpenAIRE, MIT Libraries

Наименование
органа,
зарегистрировавшего
издание

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 83923 от 16 сентября 2022 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Учредитель
и издатель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

Периодичность

4 выпуска в год

Адрес учредителя
и издателя

344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

E-mail

sovtrendstr@gmail.com

Телефон

+7 (863) 2-738-372

Сайт

<http://www.stsg-donstu.ru/>

Дата выхода в свет

31.12.2025





Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning

Peer-reviewed scientific and practical journal (published since 2022)

eISSN 2949–1835
DOI: 10.23947/2949–1835

Vol. 4, no. 4, 2025

A peer-reviewed scientific and practical journal designed to inform the readers about the latest advancements, trends and prospects in the field of construction, architecture, urban planning and adjacent scientific fields. The journal serves a platform for scientific and educational cooperation of researchers and scholars engaged in field of construction.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific publications (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation), where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Science in scientific specialties and their respective branches of science should be published.

The journal publishes articles in the following fields of science:

- Building Constructions, Buildings and Engineering Structures (Engineering Sciences)
- Footings and Foundations, Subsurface Structures (Engineering Sciences)
- Construction Materials and Products (Engineering Sciences)
- Technology and Organization of Construction (Engineering Sciences)
- Structural Mechanics (Engineering Sciences)
- Urban Planning, Rural Settlements Planning (Engineering Sciences)
- Facilities Life Cycle Management (Engineering Sciences)

*Indexing
and Archiving*

RISC, CyberLeninka, CrossRef, Internet Archive, Google Scholar, Mendeley, AGRIS, SCILIT, Baidu, OpenAlex, Library of Congress, Semantic Scholar, Berkeley, OpenAIRE, MIT Libraries

*Name of the Body
that Registered the
Publication*

Extract from the Register of Registered Mass Media № ФС 77 – 83923 dated September 16, 2022, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media

*Founder
and Publisher*

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
Don State Technical University (DSTU)

Periodicity

4 issues per year

*Address
of the Founder
and Publisher*

1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

E-mail

sovrendstr@gmail.com

Telephone

+7 (863) 2–738–372

Website

<http://www.stsg-donstu.ru/>

Date of Publication

31.12.2025



Редакционная коллегия

Главный редактор

Маилян Дмитрий Рафаэлович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Заместитель главного редактора

Щербань Евгений Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Выпускающий редактор

Студеникова Светлана Геннадьевна, начальник отдела публикационной активности, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Ответственный секретарь

Шевченко Надежда Анатольевна, начальник отдела научно-технической информации и научных изданий, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Беккиев Мухтар Юсубович, доктор технических наук, профессор, директор Высокогорного Геофизического Института (Нальчик, Российская Федерация);

Ходжаев Аббас Агзамович, доктор технических наук, профессор, начальник отдела контроля учебных программ и учебной литературы Министерства высшего и среднего профессионального образования (Ташкент, Республика Узбекистан);

Несветаев Григорий Васильевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Прокопов Альберт Юрьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Скибин Геннадий Михайлович, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация);

Плешко Михаил Степанович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (Москва, Российская Федерация);

Котляр Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Зайченко Николай Михайлович, доктор технических наук, профессор, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (Макеевка, Российская Федерация);

Адылходжаев Анвар Ишанович, доктор технических наук, профессор, Ташкентский государственный транспортный университет (Ташкент, Республика Узбекистан);

Григорян Вардес Игитович, доктор технических наук, профессор, руководитель Ассоциации промышленных предприятий Армении (Ереван, Республика Армения);

Байбурин Альберт Халитович, доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация);

Толкынбаев Темирхан Анапияевич, доктор технических наук, профессор, действительный (иностранный) член Российской академии архитектуры и строительных наук, первый проректор Таразского университета (Тараз, Казахстан);

Языев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Акимов Павел Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, академик Российской академии архитектуры и строительных наук (Москва, Российская Федерация);

Панасюк Леонид Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Беспалов Вадим Игоревич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Данилина Нина Васильевна, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Москва, Российская Федерация);

Сидоренко Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация);

Товмасян Саркис Арисаткакесович, доктор архитектурных наук, доцент, член Палаты архитекторов Армении (Ереван, Республика Армения).

Editorial Board

Editor-in-Chief

Dmitry R. Mailyan, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Deputy Chief Editor

Evgenii V. Shcherban', Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Executive Editor

Svetlana S. Studennikova, Head of the Publication Activity Department, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Executive Secretary

Nadezhda A. Shevchenko, Head of the Scientific and Technical Information and Scientific Publications Department, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Mukhtar Yu. Bekkiev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Director of the High-Mountain Geophysical Institute (Nalchik, Russian Federation)

Abbas A. Khodzhaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Curricula and Educational Literature Control Department, Ministry of Higher and Secondary Vocational Education of the Republic of Uzbekistan (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

Grigory V. Nesvetaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Albert Yu. Prokopov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Gennady M. Skibin, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (Novocherkassk, Russian Federation)

Mikhail S. Pleshko, Dr.Sci. (Engineering), Professor, National University of Science and Technology MISIS (Moscow, Russian Federation)

Vladimir D. Kotlyar, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Nikolai M. Zaichenko, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (Makeevka, Russian Federation)

Anvar I. Adilkhodjaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Tashkent State Transport University (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

Vardges I. Grigoryan, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Association of Industrial Enterprises of Armenia (Yerevan, Republic of Armenia)

Albert Kh. Bayburin, Dr.Sci. (Engineering), Professor, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

Temirkhan A. Tolkynbaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Full (Foreign) Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), First Vice-Rector, Taraz University (Taraz, Republic of Kazakhstan)

Baty尔 M. Yazev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Pavel A. Akimov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS) (Moscow, Russian Federation)

Leonid N. Panasyuk, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Vadim I. Bespalov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Nina V. Danilina, Dr.Sci. (Engineering), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU) (Moscow, Russian Federation)

Vladimir F. Sidorenko, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Volgograd State Technical University (VSTU) (Volgograd, Russian Federation)

Sarkis A. Tovmasyan, Dr.Sci. (Architecture), Associate Professor, Member of the Chamber of Architects of the Republic of Armenia (Yerevan, Republic of Armenia)

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

- Розанцева Н.В., Бабурин Н.А.** Анализ контроля сроков строительства с учетом методов раннего предупреждения срыва сроков 7

ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

- Данилина Н.В., Котлярова Е.В., Глаголев В.О.** Разработка методики принятия решений при градостроительном планировании и проектировании береговых территорий малых рек в городах 19

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

- Сабитов Л.С., Али Л.** Критический анализ использования технологии анализа цифровых изображений при мониторинге строительных конструкций и материалов 27

- Тихомиров А.Л., Лысова Е.П.** Повышение эффективности этапа проектирования жизненного цикла системы теплоснабжения строительного объекта 37

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

- Кондратьева Т.Н., Чепурненко А.С.** Прогнозирование несущей способности трубобетонных колонн квадратного сечения при помощи методов машинного обучения 44

- Римшин В.И., Усанов С.В., Выдрин А.Н., Керн А.Е., Макарова Е.С.** Нейросетевое моделирование прочности нормальных сечений сборных железобетонных ребристых плит 53

- Мясников Д.О., Репин В.А., Роцкина С.И.** Адгезивная прочность клеевого соединения древесины с арматурой из отработанных полотен ленточных пил 61

- Чэ Сяньюй** Методы усиления железобетонных колонн, с помощью углеродного волокна в Китае 69

- Чжсан Юань, Прокопов А.Ю.** Перспективы применения LEGO-блоков для возведения складских и емкостных сооружений агропромышленного комплекса 78

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Степин Д.Н., Хафизов Т.М., Байбурина А.Х., Овчинников А.Д., Каминская Э.А., Коломиец Н.О.** Корреляции между прочностью и электрическим сопротивлением бетона. Часть 1. Краткий обзор 95

- Деркач В.Н., Демчук И.Е.** Оценивание прочности на сжатие бетона в конструкции в случаях сомнений в его соответствии установленным требованиям 104

CONTENTS

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

- Rozantseva NV, Baburin NA** Analysis of Control of Construction Timing Taking into Account the Early Warning System of Missed Deadlines 7

URBAN PLANNING, PLANNING OF RURAL SETTLEMENTS

- Danilina NV, Kotlyarova EV, Glagolev VO** Development of a Methodology for Decision-Making in Urban Planning and Design of Coastal Areas of Small Rivers in Cities 19

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES

- Sabitov LS, Ali L** Critical Analysis of the Use of Digital Image Analysis Technology to Monitor Construction Facilities and Materials 27

- Tikhomirov AL, Lysova EP** Improving the Efficiency of the Design Stage of the Life Cycle of the Heat Supply System of a Construction Facility 37

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

- Kondratieva TN, Chepurnenko AS** Predicting the Load-Bearing Capacity of Square-Section Pipe-Concrete Columns Using Machine Learning Methods 44

- Rimshin VI, Usanov SV, Vydrin AN, Kern AE, Makarova ES** Neural Network Modeling of the Strength of Normal Sections of Prefabricated Reinforced Concrete Ribbed Slabs 53

- Myasnikov DO, Repin VA, Roshchina SI** Adhesive Strength of Wood Glue Joints with a Reinforcement Made from Used Band Saw Blades 61

- Che XiangYu** Methods for Strengthening Reinforced Concrete Columns Using Carbon Fiber in China 69

- Yuan Zh, Prokopov AYu** Prospects for the Use of LEGO Blocks for the Construction of Warehouse and Storage Facilities of the Agro-Industrial Complex 78

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Stepin DM, Khafizov TM, Baiburin AKh, Ovchinnikov AD, Kaminskaya EA, Kolomiets NO** Correlations between the Strength and Electrical Resistance of Concrete. Part 1. A Brief Overview 95

- Derkach VN, Demchuk IE** Assessment of the Compressive Strength of Concrete in a Structure in Cases of Doubt as to its Compliance with the Established Requirements 104

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION



УДК 656

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-7-18>

Оригинальное эмпирическое исследование

Анализ контроля сроков строительства с учетом методов раннего предупреждения срыва сроков

Н.В. Розанцева , Н.А. Бабурин

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

nrozanceva@lan.spbgu.ru



EDN: CHXJH

Аннотация

Введение. Исследование посвящено оценке существующих методик контроля сроков возведения жилых зданий и обоснованию преимуществ подхода раннего предупреждения (EWS). Традиционные инструменты, такие как календарные планы и мониторинг, недостаточно эффективны ввиду своей реактивности и неспособности заранее выявить риски.

Целью является демонстрация перехода от реактивного управления к проактивному, предвосхищающему потенциальные проблемы [1]. Модернизация традиционных методов путем интеграции цифровых инструментов, внедрения предиктивной аналитики и использования гибридных методологий управления трансформирует контроль сроков из простого отслеживания в проактивное предвидение, что становится важнейшим конкурентным преимуществом, позволяя строительной отрасли эффективно преодолевать вызовы и достигать поставленных целей с максимальной точностью.

Материалы и методы. Объект изучения — система управления сроками строительства, включающая методы планирования, мониторинга и реагирования. Основные недостатки традиционного подхода заключаются в запоздалом выявлении проблем, эти методы преимущественно фиксируют проблемы по факту их возникновения, субъективизме оценки и отсутствии целостной информационной среды.

Результаты исследования. В рамках работы ожидается создание авторской системы EWS-индикаторов, адаптированных под реалии условий российского строительства, методики интеграции предиктивной аналитики в BIM-среду, а также экономико-математической модели для расчета эффекта от внедрения EWS. Данные решения позволят снизить количество срываемых сроков на 20–30 %, автоматически обнаруживать риски за неделю–полторы до их наступления и достичь точности прогнозирования сроков сдачи до 95 %.

Обсуждение и заключение. Предложенные меры имеют высокую прикладную ценность: сокращают финансовые и репутационные издержки застройщиков, способствуют выполнению законодательных норм и повышают доверие участников рынка. Интеграция современных технологий, использование предиктивных моделей и гибких управленческих подходов превращают контроль сроков из пассивного наблюдения в активное предупреждение возможных нарушений. Предполагается, что внедренный метод обеспечит снижение количества случаев нарушения дедлайнов на 20–30 %, и позволит заблаговременно обнаружение возможных угроз до наступления негативных последствий, что улучшит качество оценки временных рамок исполнения проектов.

Ключевые слова: контроль сроков строительства, управление проектами, срыв сроков, раннее предупреждение, календарно-сетевое планирование, Earned Value Management, BIM. предиктивная аналитика

Для цитирования. Розанцева Н.В., Бабурин Н.А. Анализ контроля сроков строительства с учетом методов раннего предупреждения срыва сроков. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):7–18. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-7-18>

Analysis of Control of Construction Timing Taking into Account the Early Warning System of Missed Deadlines

Nadezhda V. Rozantseva  , Nikita A. Baburin 

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation

 nrozantseva@lan.spbgasu.ru

Abstract

Introduction. The study is dedicated to evaluating the existing methods for monitoring the construction time of residential buildings and substantiating the advantages of the early warning system (EWS). Traditional tools such as schedules and monitoring are insufficiently effective due to their reactivity and inability to identify risks ahead of time. The aim is to demonstrate the transition from reactive management to proactive predicting likely problems [1]. Modernization of traditional methods by integrating digital tools, introducing predictive analytics and using hybrid management methodologies transforms time control from simple tracking into proactive projection becoming an important competitive edge, allowing the construction industry to effectively deal with challenges and achieve goals with a maximum accuracy.

Materials and Methods. The object of the study is a construction time management system that includes planning, monitoring, and response methods. The major drawbacks of the traditional approach are delayed identification of problems as these methods mainly record problems as they emerge. Assessments are biased and holistic information environment is lacking.

Research Results. As part of the study, the author is expected to design a unique system of EWS indicators adapted to the realities of the Russian construction conditions, a methodology for integrating predictive analytics into the BIM environment, as well as an economic and mathematical model for calculating the effect of EWS implementation. These solutions will reduce the number of missed deadlines by 20–30%, automatically detect risks a week or a week and a half before they emerge, and achieve up to a 95% accuracy in predicting project completion.

Discussion and Conclusion. The proposed measures have a high practical value as they contribute to reducing developers' financial and reputational costs, implementing legislative norms and increasing amount of trust among those involved in the market. Integration of modern technologies, use of predictive models and flexible management approaches transform timing control from passive monitoring into active prevention of possible disruptions. It is assumed that the implemented method will provide a reduction in the number of cases of missed deadline by 20–30%, and will allow early detection of possible threats prior to the impact of negative consequences improving the quality of project time frame assessment.

Keywords: construction timing control, project management, missed deadlines, early warning, calendar and network planning, Earned Value Management, BIM predictive analytics

For citation. Rozantseva NV, Baburin NA. Analysis of Control of Construction Timing Taking into Account the Early Warning System of Missed Deadlines. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):7–18. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-7-18>

Введение. В условиях современного строительного рынка, характеризующегося высокой конкуренцией, возрастающей сложностью проектов и строгими требованиями к бюджету, контроль сроков выполнения работ является одним из наиболее критически важных аспектов управления, в последующем обеспечивающим успешную реализацию и своевременную сдачу объектов.

Задержки в строительстве не просто приводят к дополнительным финансовым затратам — они подрывают доверие заказчиков, негативно сказываются на репутации подрядчиков, влекут за собой судебные иски и могут привести к полной остановке проекта.

Целью исследования является разработка практико-ориентированного алгоритма модели превентивного контроля сроков строительства на основе интеграции методов раннего предупреждения.

Задачи разработки:

1. Критический анализ текущих систем контроля сроков.
2. Структурирование методологии EWS (Early Warning System) для строительной отрасли, определение ключевых индикаторов риска.

Материалы и методы. Объект исследования — система контроля сроков строительства жилых объектов в ее текущем состоянии, в том числе:

- процедуры планирования (календарные графики, СРМ-анализ, распределение ресурсов);
- методы мониторинга прогресса (отчетность, инструменты фиксации данных);
- механизмы реагирования на отклонения;
- взаимодействие участников проекта (заказчик, подрядчик, субподрядчики).

Традиционные методы контроля, такие как построение календарных графиков, диаграмм Ганта (рис. 1), использование метода критического пути (CPM) (рис. 2), фиксация в журналах учета и отчетности и этапные проверки, безусловно, заложили основу для систематического планирования и отслеживания прогресса¹ и десятилетиями доминируют в отрасли.

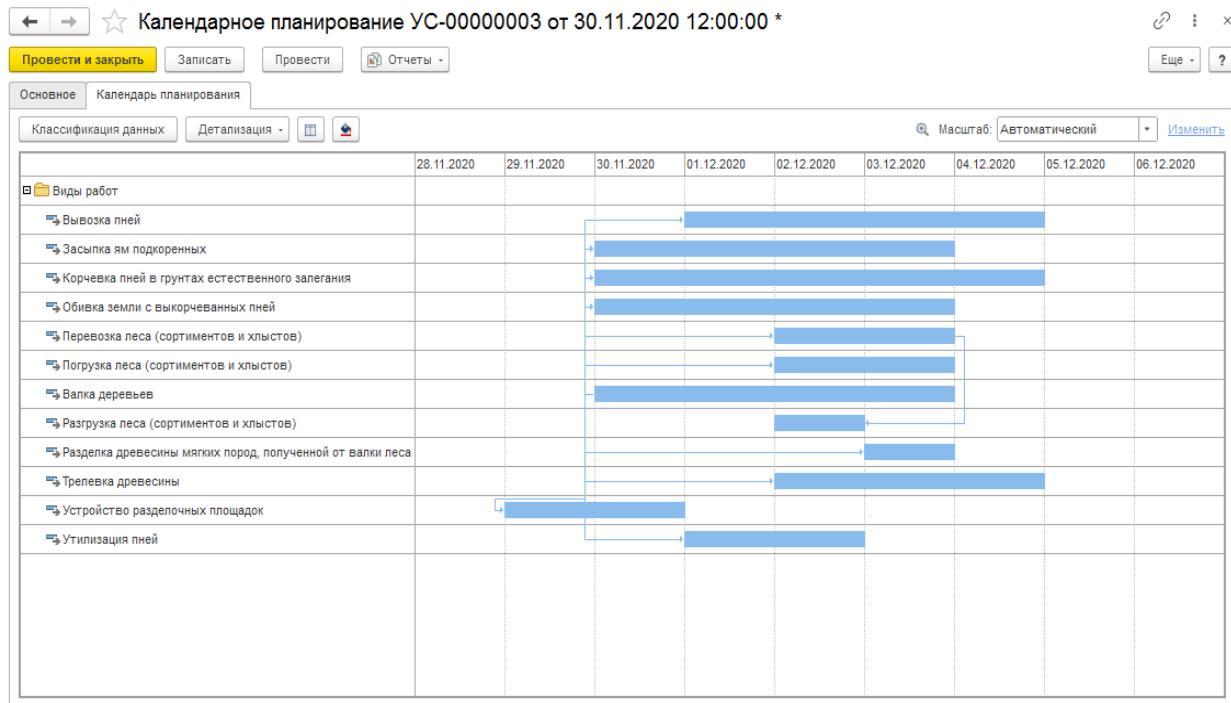


Рис. 1. Пример диаграммы Ганта

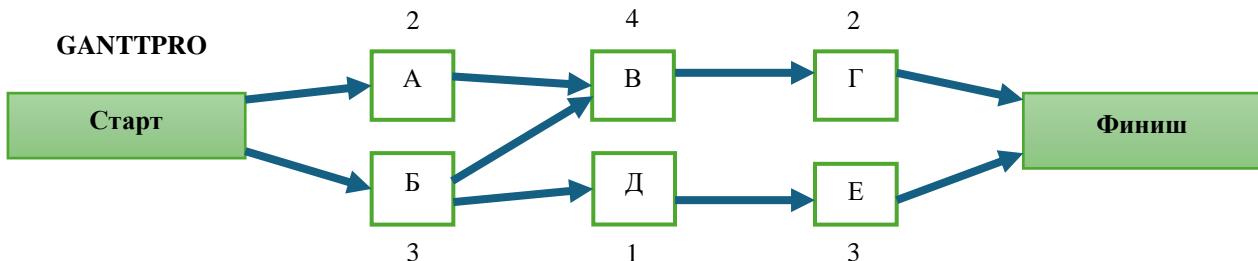


Рис. 2. Метод критического пути в управлении строительством, на основании сетевого графика

Проведем анализ ключевых традиционных подходов в контроле сроков [2]:

1. *Календарное (в основном линейное) планирование:*

Суть этого метода, его основной механизм: разработка поэтапных планов с фиксированными датами начала и окончания работ.

Основные инструменты: диаграммы Ганта, сетевые графики (типа PERT).

Способы применения: типичны для любых проектов с заранее предсказуемыми этапами возведения объекта, например, фундамент → каркас → отделка → контроль качества (особенно, скрытых работ) → сдача в эксплуатацию.

2. *Журнальный учет и отчетность:*

Основной механизм: фиксация выполненных работ в бумажных или электронных журналах, например, в «Журнале производства работ».

Способы применения через учет данных: за счет поступающих ежедневных отчетов от прорабов о затраченном времени, объемах, выполненных за определенный промежуток времени работ, возникающих проблемах.

3. *Этапные проверки [3]:*

Суть этапных проверок заключается в контроле качества на ключевых стадиях строительства для предотвращения дефектов и обеспечения соответствия проекта нормам.

¹ Бовтев С.В. *Методы и формы организации строительного производства: учебное пособие*. СПб: СПбГАСУ; 2022. 221 с.

Способы, формы контроля (см. рис. 3):

– *входной контроль*: проверка материалов и оборудования, в том числе машин и механизмов, перед началом этапа работ: сертификаты, паспорта, соответствие ГОСТ, наличие возможных дефектов — от упаковки до более существенных. Например, на стройке ЖК «Лахта-2» в г. Санкт-Петербурге была отклонена партия арматуры из-за несоответствия диаметра — 12 мм вместо 14 мм по проекту;

– *операционный контроль*: мониторинг технологических процессов в ходе выполнения работ (технология, геометрия, температура в процессе бетонирования) бывает очень высокоэффективным при правильном применении современных технических средств. Например, при строительстве монолитных сходов с «Большого Смоленского моста» через р. Неву датчики температуры выявили перегрев бетона до + 40 °C вместо + 25 °C, и работы были остановлены для охлаждения. Применение датчиков Concrete DNA с прогнозом прочности на 72 часа вперед способствовало качественному выполнению работы с нулевым браком и сокращению сроков на 18 дней;

– *приемочный контроль*: как завершающий этап перед началом следующих работ, проверка соответствия чертежам, прочности материалов, документации, подписание актов после завершения этапа (например «Акт освидетельствования скрытых работ»), достаточно часто подразумевает необходимость проведения работ по устранению недостатков. Например, в ЖК «Эталон» в Южном Бутово в г. Москве (2021 г.), приемка каркаса последнего объекта была задержана из-за трещин, обнаруженных ультразвуком в колоннах, что потребовало усиления конструкций колонн.

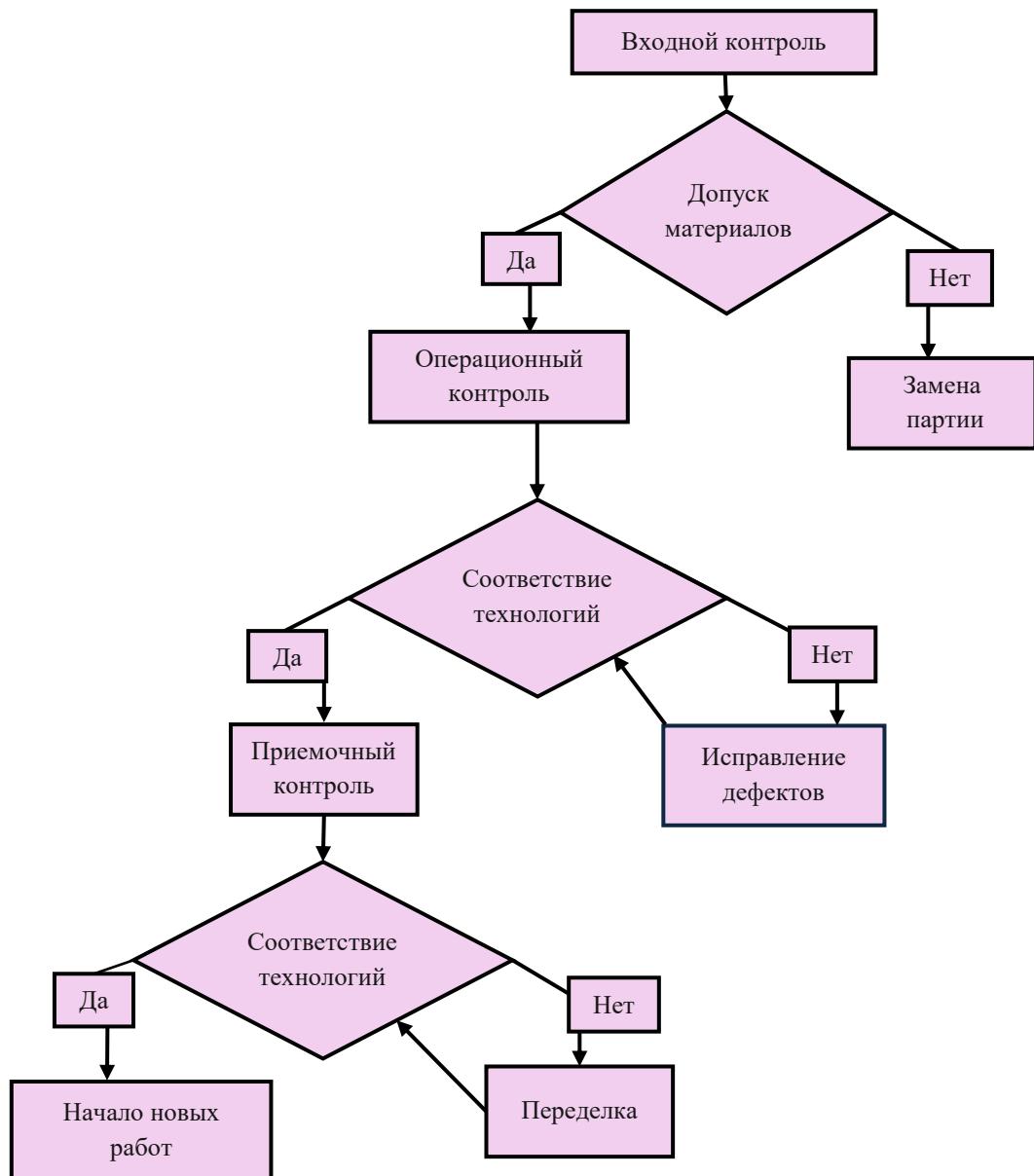


Рис. 3. Существующая схема этапных проверок

Критический анализ текущих систем контроля сроков позволяет выявить основные положительные качества и слабые места традиционных методов (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ методов и их уязвимостей

Метод	Преимущества	Недостатки	Пример последствий / оценка экономических потерь
Календарные графики	Наглядность, простота использования	Жесткость, невозможность оперативной корректировки	Задержка сдачи ЖК на 3 месяца (г. Москва)
Журнальный учет	Юридическая значимость	Субъективность, фальсификации	Перерасход бюджета: – ЖК «Северная долина», г. Санкт-Петербург: трещины в стенах обнаружены после сдачи — распалубка при недостаточной прочности бетона из-за отсутствия термометров; – ЖК «Эталон», г. Москва, 2021: добавление воды в бетон — водители миксеров разбавляли смесь для упрощения разгрузки.
Этапные проверки	Соответствие нормативам (СП 48.13330)	Точечность, пропуск дефектов	Обрушение плиты в ТЦ «Кировский» — точечный ультразвуковой контроль пропустил пустоты в бетоне

В табл. 2 произведено уточнение ключевых результатов.

Таблица 2

Уточнение ключевых акцентов. Результаты возникновения задержек [4]

Критерий	Объект исследования/ Проблематика/Последствия	Предмет исследования для принятия решения
Сущность	Система контроля сроков несовершенна — низкая точность — недостоверные исходные данные Человеческий фактор: субъективизм при контроле (визуальная оценка опалубки); фальсификация отчетности (завышение объема работ на 15–20 %). Технические ограничения: точечный контроль пропускает скрытые дефекты (обрушения плит в ТЦ «Кировский» в 2020 г., ТК «Голливуд» в декабре 2021 г.).	Процесс трансформации через EWS-методы
Фокус проблемы	Проблемы существующей системы: – <i>реактивность</i> : отклонения от графика выявляются поздно, часто только при еженедельной отчетности; – <i>запаздывание</i> : невозможность оперативного вмешательства ведет к накоплению задержек; – <i>финансовые потери</i> : исправление ошибок поглощает до 30 % бюджета проекта.	Проактивность, прогнозирование рисков на ранних стадиях
Инструменты	Недостатки традиционной системы: – разрозненные базы данных (графики, журналы, геоданные хранятся отдельно); – ручной ввод информации замедляет процесс; Результат: задержки согласований, потеря документов, расхождения планов с фактами до 7–10 дней.	Цифровые технологии (BIM, AI), автоматизированные KPI, алгоритмы предикции. Блокчейн-платформа «СтройКонтроль»
Цель изучения	Диагностика недостатков текущей системы	Разработка модели интегрированного EWS-контроля для жилых домов

На основании этого можно сделать вывод, что эффективность традиционных методов ограничена скрытыми недостатками, основной недостаток заключается в том, что они чаще используются для констатации факта отставания от графика, нежели для предотвращения его возникновения [4].

Иными словами, большинство традиционных подходов являются по своей сути реактивными, активируясь уже после того, как проблема со сроками стала очевидной.

Необходимость перехода от реактивного к проактивному управлению сроками строительства стала основополагающей задачей данного исследования.

Современный подход требует внедрения методов раннего предупреждения, способных выявить потенциальные угрозы срыва сроков задолго до того, как они станут критическими. Это позволяет менеджменту проекта своевременно разработать и реализовать корректирующие действия, минимизируя негативные последствия [5]. Ключ к эффективному раннему предупреждению лежит в комплексном использовании данных, технологий и отлаженных коммуникационных процессов. К основным способам усиления этапов проверки можно отнести цифровизацию, датчики мониторинга, блокчейн и неизменяемые журналы строительного контроля.

Методы прогнозирования риска отклонений от графиков² [6] должны включать:

1. Раннее обнаружение и цифровое управление возможных факторов риска через анализ системы контроля временных показателей.

2. Комплексный подход с мониторингом для предотвращения задержек, включающий стратегию анализа задержек.

3. Профилактику срыва сроков строительства на основании аналитических подходов в управлении временными параметрами.

Одним из фундаментальных методов раннего предупреждения является система управления освоенным объемом (Earned Value Management, EVM). EVM интегрирует данные о стоимости, графике и объеме выполненных работ, предоставляя ценные метрики, такие как отклонение по стоимости (CV) и отклонение по срокам (SV) [7]. Отрицательное значение SV свидетельствует об отставании от плана, а индекс SPI отражает эффективность продвижения проекта относительно графика. Мониторинг этих метрик помогает своевременно обнаружить проблему, предсказать её последствия и принять меры до момента неизбежных задержек. Анализ динамики SPI позволяет точно оценивать ход работ и прогнозировать сроки окончания строительства. В дополнение к EVM критически важную роль играет детальный анализ рисков и управление ими [8]. Раннее выявление рисков и их систематическая оценка на ранних стадиях проекта (например, риски, связанные с поставками материалов, нехваткой квалифицированных кадров, изменением погодных условий, получением разрешительной документации), позволяют разрабатывать профилактические меры. Формирование реестра рисков с расчетом вероятности и последствий создает базу для упреждения угроз. Сценарный анализ и моделирование (метод Монте-Карло) помогают точнее прогнозировать сроки и планировать временные резервы.

Интеграция BIM и сетевого планирования (4D BIM) обеспечивает наглядное представление хода строительства, позволяющее предотвратить будущие конфликты и опережающее решение проблем (рис. 3). Использование датчиков ИТ (Интернет вещей) на оборудовании и в ключевых зонах стройплощадки обеспечивает сбор данных в реальном времени о прогрессе работ, производительности техники и местонахождении ресурсов [9].

Искусственный интеллект и машинное обучение, анализируя огромные массивы данных (рис. 4) из прошлых проектов, текущих метрик и внешних факторов (погода, экономические индексы), способны выявлять скрытые закономерности и предсказывать вероятные задержки с высокой степенью точности, предлагая оптимальные корректирующие действия [10]. Системы управления проектами (PMS) с функцией автоматических оповещений и дашбордов (рис. 5), отображающих ключевые показатели в режиме реального времени, также значительно повышают эффективность раннего предупреждения.

В данном случае все входящие пользовательские запросы располагаются в последовательности и наглядно видны. На основании приоритета ставится ранг запроса или входящей информации, ставятся задачи соответствующим службам и генерируется расписание сроков их выполнения, затем алгоритм уменьшает интегрированные задачи. Эффективная коммуникация способствует решению раннего предупреждения проблем. Открытый обмен данными о текущих задачах, возникших сложностях и необходимых ресурсах помогает своевременно реагировать на отклонения [11]. Регулярные совещания всех участников проекта обеспечивают оперативное обсуждение прогресса и возникающих трудностей. Важность имеет также внедрение четких процедур управления изменениями: четкое оформление изменений (дизайна, объемов работ, материалов) и анализ их влияния на сроки и стоимость снижают риск срыва графика. Неконтролируемые изменения являются одной из главных причин срыва сроков.

² Олейник П.П. Бродский В.И., Кузьмина Т.К., Чередниченко Н.Д. Теория, методы и формы организации строительного производства: учебник по направлению подготовки 08.04.01 Строительство. 1 часть. Москва: МИСИ — МГСУ; 2019. С 174–244.



Рис. 4. Пример применения BIM-технологии



Рис. 5. Пример дашборда

Постоянный мониторинг критического пути [12], определенного на этапе планирования, важен для раннего предупреждения. Динамическое обновление путей регулярно пересчитывается и анализируется для учета реальных темпов выполнения. Изменение критического пути или появление новых критических задач сигнализирует о потенциальных проблемах со сроками. Оценка временных резервов времени (float) позволяет выявить потенциально опасные этапы, где даже небольшие задержки могут повлиять на общий срок завершения.

Результаты исследования.

Структурирование методологии EWS для строительной отрасли:

1. Определение ключевых индикаторов риска:

- скорость расходования временных буферов;
- динамика производительности труда (отклонение > 15 % от нормы);
- задержки поставок критичных материалов.

2. Разработка алгоритма предиктивной аналитики на основе исторических данных (ML-модели).

Управленческие инновации:

- система триггеров для оперативного реагирования;
- адаптация процессов управления рисками под превентивную модель.

Пример триггера: при фиксации ИТ-датчиками падения скорости монтажа ЖБК на 18 % система автоматически:

- пересчитывает сроки критического пути;
- инициирует заказ дополнительной техники;
- уведомляет генподрядчика о риске срыва этапа.

Выдвинуто предложение: структурировать технологическую архитектуру системы с учетом оптимизации критического пути [15].

Таблица 3

Интеграция инструментов

Технология	Функционал
BIM 4D/5D	Визуализация графика + автоматическое обновление прогресса
IT-датчики	Мониторинг темпов работ (например, объем уложенного бетона в смену)
Cloud-платформы	Агрегация данных → генерация тревог (SMS/e-mail)

Процессная модель управления рисками.

1. Внедрение трехуровневой системы триггеров (рис. 6):

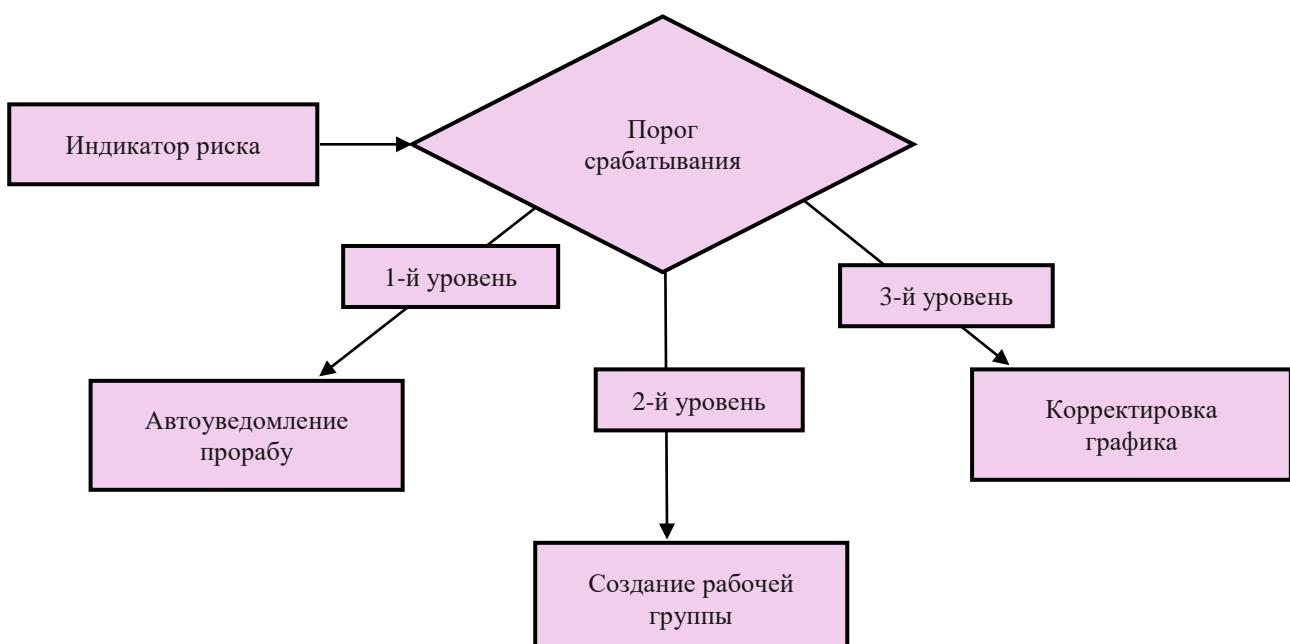


Рис. 6. Алгоритм внедрения трехуровневой системы

2. Регламент оперативного реагирования (сроки: 1–24 часа).

3. Кейс-стади апробации модели.

Пилотное внедрение EWS на жилом комплексе ЖК «Лахта-2» (данные 2022–2024 гг.).

Параметры: 24 этажа, 356 квартир, срок строительства — 28 мес.

Результаты:

- снижение задержек на 27 %;
- экономия 11 млн. руб. за счет сокращения простоев.

4. Формирование рекомендаций:

- для застройщиков: алгоритм внедрения EWS (этапы, бюджет, ROI);
- для регуляторов: предложения по актуализации СНиП/ГОСТ с учетом превентивного контроля.

Предмет фокусируется на создании алгоритма упреждающего управления сроками, который:

- Снижает частоту срываов. Алгоритм непрерывно контролирует ключевые показатели проекта. Отклонения (падение производительности на 15 %, задержка поставок) запускают раннюю тревогу. Ранняя реакция предотвращает накопление негатива и снижает затраты на коррекцию графика.

– Интегрирует EWS-индикаторы в ежедневные процессы. Центральный элемент алгоритма — система индикаторов раннего предупреждения (EWS). Индикаторы отражают изменения в проекте и предупреждают о будущих проблемах. Пример: темп расхода резерва критического пути. Быстрое исчерпание резервов сигнализирует о надвигающихся сроках и требует срочных мер. Интеграция EWS даёт доступ к актуальной информации и поддержку принятия решений в режиме реального времени.

– *Формализует ответные действия*. Для обеспечения оперативного и единообразного реагирования на идентифицированные риски алгоритм предусматривает формализацию ответных действий. Это означает, что для каждого потенциального сценарного отклонения или при достижении определенных пороговых значений EWS-индикаторов заранее определяются конкретные корректирующие мероприятия. Например, установление триггера: «при сокращении резерва времени на 50 % → инициировать пересмотр логистики». Такой подход сокращает время на принятие решений, исключает субъективизм и обеспечивает немедленное выполнение заранее утвержденных протоколов реагирования.

Для понимания механики работы алгоритма рассмотрим следующий сценарий: внедрение ИТ-датчиков, предназначенных для непрерывного отслеживания темпов затвердевания бетона на монолитных конструкциях. Собранные данные, включающие температуру, влажность и другие параметры окружающей среды, подвергаются машинному обучению (ML-анализу). На основе исторических данных и текущих показателей ML-модель способна прогнозировать потенциальную задержку в выполнении монолитных работ, например, за 10 дней до того, как эта задержка станет очевидной и приведет к срыву. Получив такой прогноз, система инициирует автоматическую или ручную корректировку общего графика строительства, что может включать перераспределение ресурсов, изменение последовательности смежных работ или активацию альтернативных планов для компенсации выявленной задержки. Этот пример демонстрирует, как алгоритм переходит от сбора данных к их анализу, прогнозированию и в конечном итоге к проактивным управляющим воздействиям.

Ожидаемая научная новизна.

1. *Авторская система EWS-индикаторов для строительной отрасли* (адаптированных под реалии РФ). В исследовании создается первая специализированная система индикаторов раннего предупреждения (EWS) для строительного сектора РФ. Учет местных факторов (климат, законодательство, цены, квалификация рабочих) дополнен уникальной методологией измерения, приоритизации и объединения показателей.

2. Метод интеграции предиктивной аналитики в BIM-среду.

Научная новизна исследования состоит в создании оригинального метода алгоритмизации процесса двустороннего обмена данными между предиктивными моделями (машинное обучение, нейросети) и BIM-платформой, превращающей ее в BIM-модель. Метод позволяет прогнозировать отклонения по срокам, ресурсам и затратам, используя исторические и текущие данные проекта. Двусторонний автоматически обновляемый обмен данными между аналитическими моделями и BIM превращает последнюю из диагностического инструмента, отображающего текущее состояние проекта, в средство прогнозирования и оптимизации строительных процессов.

3. Экономико-математическая модель расчета эффекта от внедрения EWS.

Новизна модели заключается в ее способности учитывать как прямые финансовые выгоды (например, снижение штрафов за срыв сроков, оптимизация затрат на ресурсы, минимизация рисков перерасхода бюджета), так и косвенные, но не менее значимые преимущества (такие как повышение репутационной ценности застройщика, снижение судебных издержек, рост доверия дольщиков и инвесторов). Модель будет включать алгоритмы для расчета возврата инвестиций (ROI), чистого дисконтированного дохода (NPV) и других ключевых показателей эффективности, а также позволит проводить сценарный анализ и оценку чувствительности к различным параметрам, что обеспечит надежное обоснование управленческих решений.

Практическое значение исследования заключается в радикальном повышении надежности и стабильности строительного процесса благодаря внедрению упреждающей системы контроля сроков, основанной на глубокой интеграции методов раннего предупреждения (EWS). Модель уменьшает финансовые и репутационные риски застройщиков, улучшает выполнение требований федерального закона № 214-ФЗ от 31.12.2004 г. «Об участии в долевом строительстве многоквартирных домов и иных объектов недвижимости и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации», повышает доверие дольщиков и инвесторов к строительным компаниям — прозрачность, предсказуемость и своевременность реализации проектов значительно сокращают количество потенциальных судебных исков и претензий, что создает благоприятный инвестиционный климат и укрепляет конкурентные позиции застройщика на рынке жилого строительства.

Модель обеспечивает:

- сокращение сривов сроков на 20–30 % благодаря непрерывному мониторингу ключевых показателей;
- автоматическое выявление рисков за 7–14 дней до их проявления, что предоставляет руководителям проектов бесценное окно возможностей для своевременного принятия корректирующих мер, перераспределения ресурсов или активации альтернативных планов, минимизируя негативные последствия;
- увеличение точности прогнозирования сроков до 95 %.

В результате проекты реализуются вовремя, снижаются судебные претензии и административные санкции, улучшаются инвестиционная привлекательность и конкурентоспособность компаний.

Перспективы модернизации традиционных методов. Интеграция цифровых инструментов:

– *BIM (Building Information Modeling)*: одним из ключевых направлений является использование BIM для 4D-планирования. Эта технология позволяет динамически связывать детальные графики выполнения работ с 3D-моделями проекта, что обеспечивает автоматическое выявление потенциальных коллизий, конфликтов и неточностей в последовательности операций уже на ранних этапах планирования. Это существенно снижает риск ошибок и переделок на строительной площадке.

– *IT-датчики*: Широкое внедрение IT-датчиков обеспечивает непрерывный мониторинг критически важных параметров строительных процессов в реальном времени. Например, отслеживание темпов бетонирования, уровня вибрации или температурных режимов на площадке. Успешный опыт таких проектов, как жилой комплекс «Лахта-2» в Санкт-Петербурге, наглядно демонстрирует высокую эффективность подобных систем в повышении контроля и предсказуемости хода работ.

Внедрение предиктивной аналитики: раннее предупреждение рисков. Активное использование предиктивной аналитики является вторым важным аспектом модернизации. Современные алгоритмы, основанные на анализе обширных исторических данных и методов машинного обучения, способны с высокой точностью прогнозировать потенциальные задержки и риски. Например, при фиксировании падения производительности труда в определенном сегменте работ на 15 % система автоматически генерирует соответствующее предупреждение (alert), позволяя менеджерам оперативно реагировать и корректировать планы до того, как проблема станет критической.

Гибридная методология управления: Waterfall + Agile. Модернизация методов управления также предполагает освоение гибридных методологий, сочетающих в себе элементы традиционного каскадного (Waterfall) и гибкого (Agile) подходов. Это подразумевает интеграцию жесткого планирования и последовательного выполнения ключевых этапов проекта (характерного для Waterfall) с гибкими, адаптивными «спринтами» для оперативных корректировок и быстрого реагирования на изменения и выявленные риски (характерного для Agile). Преимущества такого синтеза подтверждаются практикой, например, при строительстве моста через р. Неву: использование цифровых двойников в рамках гибридной методологии позволило сократить общие сроки выполнения работ на 18 дней, демонстрируя потенциал синергии различных подходов в повышении эффективности управления крупными и сложными проектами.

Обсуждение и заключение. Традиционные методы контроля сроков строительства страдают от реактивности, субъективизма и фрагментарности данных. Для преодоления недостатков необходим комплексный подход, объединяющий цифровизацию (BIM, AI), гибкость управления (Waterfall + Agile) и сдвиг к проактивному управлению. Опыт строительства ЖК «Лахта-2» доказывает, что цифровая интеграция снижает задержки на 20–30 %.

Новый подход меняет парадигму управления сроками, превращая пассивное наблюдение в активное предвидение. Требуется интегрированное управление рисками, аналитика данных, технологии и коммуникаций. Внедрение таких методов сокращает вероятность срыва, оптимизирует расходы, повышает качество и репутацию.

Предлагаемый алгоритм упреждающего контроля основан на методах раннего предупреждения (EWS), адаптированных к российским условиям. Система предусматривает индикаторы EWS, предиктивную аналитику и оценку эффектов. Результаты: уменьшение срыва сроков на 20–30 %, автоматическое выявление рисков за 7–14 дней и точность прогнозов до 95 %. Такой подход минимизирует финансовые и репутационные риски, поддерживает требования ФЗ № 214 и усиливает доверие участников рынка. Цифровые инструменты и предиктивная аналитика преобразуют контроль сроков в стратегическое предвидение, обеспечивающее устойчивость и рост строительной отрасли.

Список литературы/References

1. Зотова К.А., Ланкина Ю.А., Мельникова Н.С. Проблемы внедрения технологий информационного моделирования в России. *Ogarëv-Online*. 2023;7(192):1–6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-vnedreniya-tehnologiy-informatsionnogo-modelirovaniya-v-rossii/viewer> (дата обращения 13.10.2025).

Zotova KA, Lankina YuA, Melnikova NS Problems of Introducing Information Modeling Methods in Russia. *Ogarev-Online*. 2023;7(192):1–6. (In Russ.) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-vnedreniya-tehnologiy-informatsionnogo-modelirovaniya-v-rossii/viewer> (accessed: 13.10.2025)

2. Шафранова А.А., Коклюгина Л.А., Коклюгин А.В. Варианты определения продолжительности строительства на основе влияния внешних факторов. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2013;4(26):262–267. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/varianty-opredeleniya-prodolzhitevnosti-stroitelstva-na-osnove-vliyaniya-vneshnih-faktorov/viewer> (дата обращения 13.10.2025).

Shafranova AA, Koklugina LA, Koklugin AV Ways of Calculating the Period of Building Process Considering External Factors. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2013;4(26):262–267. (In Russ.) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/varianty-opredeleniya-prodolzhitevnosti-stroitelstva-na-osnove-vliyaniya-vneshnih-faktorov/viewer> (accessed: 13.10.2025)

3. Топчий Д.В., Токарский А.Я. Концепция контроля качества организации строительных процессов при проведении строительного надзора на основе использования информационных технологий. *Вестник Евразийской науки*. 2019;11(3). URL: <https://esj.today/PDF/52SAVN319.pdf> (дата обращения: 13.10.2025).

Topchiy DV, Tokarskiy AYa The Concept of Quality Control of the Organization of Construction Processes during Construction Supervision through the Use of Information Technology. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019;11(3). (In Russ.) URL: <https://esj.today/PDF/52SAVN319.pdf> (accessed: 13.10.2025)

4. Болотин С.А., Аль-Жанаби М.А., Бохан Х.А. Прогнозирование окончания строительства на основе моделирования нелинейной зависимости от задержек отдельных работ. *Вестник гражданских инженеров*. 2022;2(91):83–90. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2022-19-2-83-90>

Bolotin SA, Al-Janabi MA, Bohan KhA Forecasting of the Construction Completion Based on the Modeling of Non-linear Dependence on Delays of Individual Works. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022;2(91):83–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2022-19-2-83-90>

5. Котовская М.А. *Развитие календарного планирования поточного строительства на основе метода критической цепи и статистического моделирования*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург: СПБГАСУ; 2015.

Kotovskaya MA *Development of Calendar Planning for Online Construction Based on the Critical Chain Method and Statistical Modeling*. Dissertation for the Degree of Candidate of Science in Engineering. St. Petersburg: SPBGASU; 2015. (In Russ.)

6. Михальченко О.Ю., Лапидус А.А., Файзуллин И.Э. Бифуркационные процессы в управлении сроками и затратами строительных проектов. *Вестник Евразийской науки*. 2024;16(6). URL: <https://esj.today/PDF/34SAVN624.pdf> (дата обращения 13.10.2025).

Mikhailchenko OYu, Lapidus AA, Faizullin IE Bifurcation Processes in Managing the Timing and Costs of Construction Projects. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(6). URL: <https://esj.today/PDF/34SAVN624.pdf> (accessed: 13.10.2025).

7. Лапидус А.А., Файзуллин И.Э., Михальченко О.Ю. Метод формирования организационно-технических решений при строительстве объектов капитального строительства. *Строительное производство*. 2024;4:3–8.

Lapidus AA, Faizullin IE, Mikhailchenko OYu Method for Forming Organizational and Technical Solutions during the Construction of Permanent Construction Projects. *Construction Production*. 2024;4:3–8.

8. Тютина А.Д., Галкин М.В. Применение искусственного интеллекта в строительстве и архитектуре. *Евразийское научное объединение*. 2021;3–6(73):481–483.

Tyutina AD, Galkin MV Application of Artificial Intelligence in Construction and Architecture. *Eurasian Scientific Association*. 2021;3–6(73):481–483. (In Russ.)

9. Симанкина Т.Л. *Совершенствование календарного планирования ресурсосберегающих потоков с учетом аддитивности интенсивности труда исполнителей*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург: СПБГАСУ; 2007. 157 с.

Simankina TL *Improving the Calendar Planning of Resource-SavingFlows Taking into Account the Additivity of the Labor Intensity of Performers*. Dissertation for the degree of Candidate Science in Engineering. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2007. 157 p.

10. Михальченко О.Ю., Лапидус А.А., Ткач А.А. Адаптивные модели управления строительной системой. *Вестник Евразийской науки*. 2025;17(1). URL: <https://esj.today/PDF/29SAVN125.pdf> (дата обращения 13.10.2025).

Mikhailchenko OYu, Lapidus AA, Tkach AA Adaptive Models of Construction System Management. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(1). (In Russ.) URL: <https://esj.today/PDF/29SAVN125.pdf> (accessed: 13.10.2025)

11. Захарова М.Ю. Обзор ключевых аспектов BIM на стадиях жизненного цикла строительного объекта. В: *Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2022. С. 79–83.

Zakharova MYu Overview of the Key Aspects of BIM at the Stages of the Life Cycle of a Construction Facility. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. P. 79–83.

12. Leach L.P. *Critical Chain Project Management. Third Edition*. Artech House; 2014. 345 p.

Об авторах:

Розанцева Надежда Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4), [ScopusID](#), [ORCID](#), nrozanceva@lan.spbgasu.ru

Бабурин Никита Андреевич, магистрант кафедры организации строительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4), [ORCID](#), dt.bn@bk.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н.В. Розанцева: научное руководство, формирование основной концепции разработки идеи, доработка текста, корректировка, анализ и формирование выводов.

Н.А. Бабурин: разработка идеи, цели и задачи исследования, подготовка текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Nadezhda V. Rozantseva, Cand.Sci, (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction Organization at the Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4 2nd Krasnoarmeyskaya Str., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), nrozanceva@lan.spbgasu.ru

Nikita A. Baburin, Master's Student at the Department of Construction Organization at the Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4 2nd Krasnoarmeyskaya St., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation), [ORCID](#), dt.bn@bk.ru

Claimed Contributorship:

NV Rozantseva: scientific supervision, formation of the basic concept of the idea development, revision of the manuscript, correction, analysis and formation of the conclusions.

NA Baburin: development of the idea, aims of the research, preparation of the manuscript.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

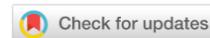
Поступила в редакцию / Received 15.10.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 28.10.2025

Принята к публикации / Accepted 10.11.2025

ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

URBAN PLANNING, PLANNING OF RURAL SETTLEMENTS



УДК 711.4

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-19-26>

Оригинальное эмпирическое исследование

Разработка методики принятия решений при градостроительном планировании и проектировании береговых территорий малых рек в городах

Н.В. Данилина¹ , Е.В. Котлярова² , В.О. Глаголев²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация

² Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ekkot.arch@gmail.com



EDN: EWUFSR

Аннотация

Введение. Исследование направлено на решение проблемы несистемного использования береговых территорий малых рек в российских городах. Актуальность обусловлена существующим фрагментарным подходом к их градостроительному планированию и проектированию, в то время как мировой опыт показывает комплексные решения. Цель работы — разработка методики принятия решений при градостроительном планировании и проектировании береговых территорий малых рек в крупных городах на основании многокритериального анализа.

Материалы и методы. Объектом исследования выступают береговые территории малых рек крупных городов. Авторы предлагают использовать системный подход, учитывающий прилегающие функциональные зоны, их взаимовлияние и экспертную оценку значимости.

Результаты исследования. Разработана методика принятия решений при градостроительном планировании и проектировании береговых территорий малых рек, позволяющая анализировать функциональные назначения отдельных участков и их взаимодействие на предпроектной стадии. Кроме того, создан алгоритм выявления синергетических эффектов между различными зонами освоения.

Обсуждение и заключение. Предложенный авторами подход позволяет преодолеть фрагментарность градостроительных решений относительно береговых территорий малых рек. Перспективы исследования включают расширение методики за счет включения экологических, экономических, социальных и функциональных факторов, а также применение подхода для большего количества типов функциональных зон.

Ключевые слова: градостроительство, малые реки, благоустройство, градостроительное планирование, градостроительное проектирование, многокритериальный анализ

Благодарности. Статья опубликована в рамках субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ.

Для цитирования. Данилина Н.В., Котлярова Е.В., Глаголев В.О. Разработка методики принятия решений при градостроительном планировании и проектировании береговых территорий малых рек в городах. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):19–26. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-19-26>

Development of a Methodology for Decision-Making in Urban Planning and Design of Coastal Areas of Small Rivers in Cities

Nina V. Danilina¹ , Ekaterina V. Kotlyarova² , Vladislav O. Glagolev²

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

² Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 ekkot.arch@gmail.com

Abstract

Introduction. The study is aimed at solving the problem of non-systematic use of coastal areas of small rivers in Russian cities. The relevance is due to the existing fragmentary approach to their urban planning and design, while global experience has been displaying complex solutions. The aim of the study is to develop a methodology for decision-making in urban planning and design of coastal areas of small rivers in large cities based on a multi-criteria analysis.

Materials and Methods. The object of the study are coastal areas of small rivers of large cities. The authors propose making use of a systemic approach that accounts for adjacent functional zones, their mutual influence and expert assessment of significance.

Research Results. A methodology for decision-making in urban planning and design of coastal areas of small rivers has been developed, allowing for the analysis of the functional purposes of individual sections and their interaction at the pre-design stage. In addition, an algorithm for identifying synergetic effects between different development zones has been designed.

Discussion and Conclusion. The approach proposed by the authors allows one to overcome the fragmentation of urban planning solutions regarding coastal areas of small rivers. The prospects of the study include expansion of the methodology due to incorporating environmental, economic, social and functional factors, as well as the application of the approach to a larger number of types of functional zones.

Keywords: urban development, small rivers, improvement, urban planning, urban design, multi-criteria analysis

For citation. Danilina NV, Kotlyarova EV, Glagolev VO. Development of a Methodology for Decision-Making in Urban Planning and Design of Coastal Areas of Small Rivers in Cities. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):19–26. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-19-26>

Введение. Малые реки являются наиболее распространенными элементами гидрографической сети Российской Федерации и охватывают значительные территории, а на их водосборной площади проживает около 30 % населения страны [1]. Как минимум одна малая река присутствует практически в каждом крупном городе и проходит через густонаселенные и перспективные к освоению районы. При этом до сих пор существует проблема грамотного научно-обоснованного использования их береговых территорий, а также отсутствует градостроительный механизм их планирования и проектирования.

Так, создание градостроительной модели комплексного планирования и проектирования береговых территорий малых рек в крупных городах становится необходимым элементом научно-методологических основ градостроительного планирования и проектирования береговых территорий малых рек [2]. Для этого необходимо разработать методику принятия решений при градостроительном планировании и проектировании береговых территорий малых рек, неотъемлемой частью которой мы считаем использование многокритериального анализа.

Материалы и методы. В настоящее время процесс принятия решений при градостроительном планировании и проектировании носит дискретный характер, имея разрывы между этапами [3–4]. Этот факт является препятствием для комплексного развития городской среды с учетом выделенных ранее групп факторов. Любой выбор в градостроительной практике должен быть обоснован и понятен различным группам населения, а также учитывать многие критерии и неопределенности, в том числе временные из-за продолжающегося научно-технического прогресса, а также риски катастрофических событий (аварии на атомных электростанциях, плотинах, землетрясения, затопления и т.д.) и различные группы интересов.

При этом проблемы в строительной и градостроительной сферах редко являются одномерными (проблемы с простыми ценностями). В основном это многомерные проблемы со сложными ценностями [5–8], где последствия не могут быть объективно и адекватно оценены одним критерием (например, с помощью денежных выражений). Системный подход позволил бы изменить практику.

Важно отметить, что примеры решения задач в градостроительстве, транспортном планировании и административно-хозяйственной деятельности территориальных субъектов с использованием многокритериального выбора уже существуют и описаны в ряде работ (таблица 1), что делает возможным применение данного метода для выбора и обоснования градостроительных сценариев развития конкретных городских территорий.

Таблица 1

Теория принятия решений при многих критериях: примеры из практики на основании работ

Р.Л. Кини и Х. Райфа [9–11]

№ п/п	Наименование примера	Краткое описание	Выводы по результатам использования инструментов многокритериального выбора
1	Проблемы загрязнения воздуха	Систематизация исходных данных, проблемы загрязнения с выделением отдельных веществ, конечных результатов и мер борьбы в общую модель оценки программ борьбы с загрязнением воздуха	Использование результатов выполненного анализа и использование их при формировании и выполнении программ борьбы с загрязнением воздуха в Нью-Йорке
2	Деятельность отдельных департаментов	Анализ организации работы департамента на примере пожарного депо, включая использование функции полезности для периодов реагирования как основы для принятия решений в оперативной деятельности	Получение функции полезности для пяти критерии — периодов реагирования с определением относительной ценности каждой минуты периода реагирования, что привело к возникновению структуры полезности в этой области
3	Удаление продуктов очищения сточных вод	Четыре основные цели (минимизация затрат/загрязнения водной среды/загрязнения воздуха/загрязнения земли) привели к вопросу возможности замещений	Были построены вероятностные распределения по четырем направлениям и совершен выбор этапности работ по удалению продуктов очищения сточных вод
4	Выбор профессии или места работы	Особенность — глубокое личное решение, однако возможна формализованная процедура оценки «достоинства» различных ситуаций с большим количеством критерии	Сведение предложений к альтернативам с иерархией целей и критерии, систематизация выбора на основании целей Миллера и с использованием градации целей по Тевелсу (обеспеченность, уверенность, независимость и т. д.)
5	Выбор технических решений по защите ОС	Обобщение и формализация данных и последовательность многокритериального выбора при выборе технических решений по защите окружающей среды	Выбор варианта (равнозначных вариантов) технических решений системы защиты ОС, удовлетворяющего требованиям не абсолютно всех, а наибольшего числа задействованных критерии
6	Анализ проблемы развития аэропорта для Мехико	Анализ альтернатив с позиции каждой группы лиц, принимающих решения и граждан, построение модели принятия решений, определение возможных последствий альтернатив и проведение проектных экспериментов, оценки на 1 год и введение зависимости от времени	Принятие решения на основании многомерной функции полезности и рассмотрения сценариев возможного развития событий, показывающих последствия альтернатив для последующего внесения изменений в стратегию развития города

Мы выбрали в качестве объекта исследования для структурирования методики береговые территории городских (малых) рек, которые взаимодействуют одновременно с транспортно-планировочным и природно-экологическим каркасами, а также с прилегающими функциональными зонами и системой инженерного обеспечения (рис. 1).

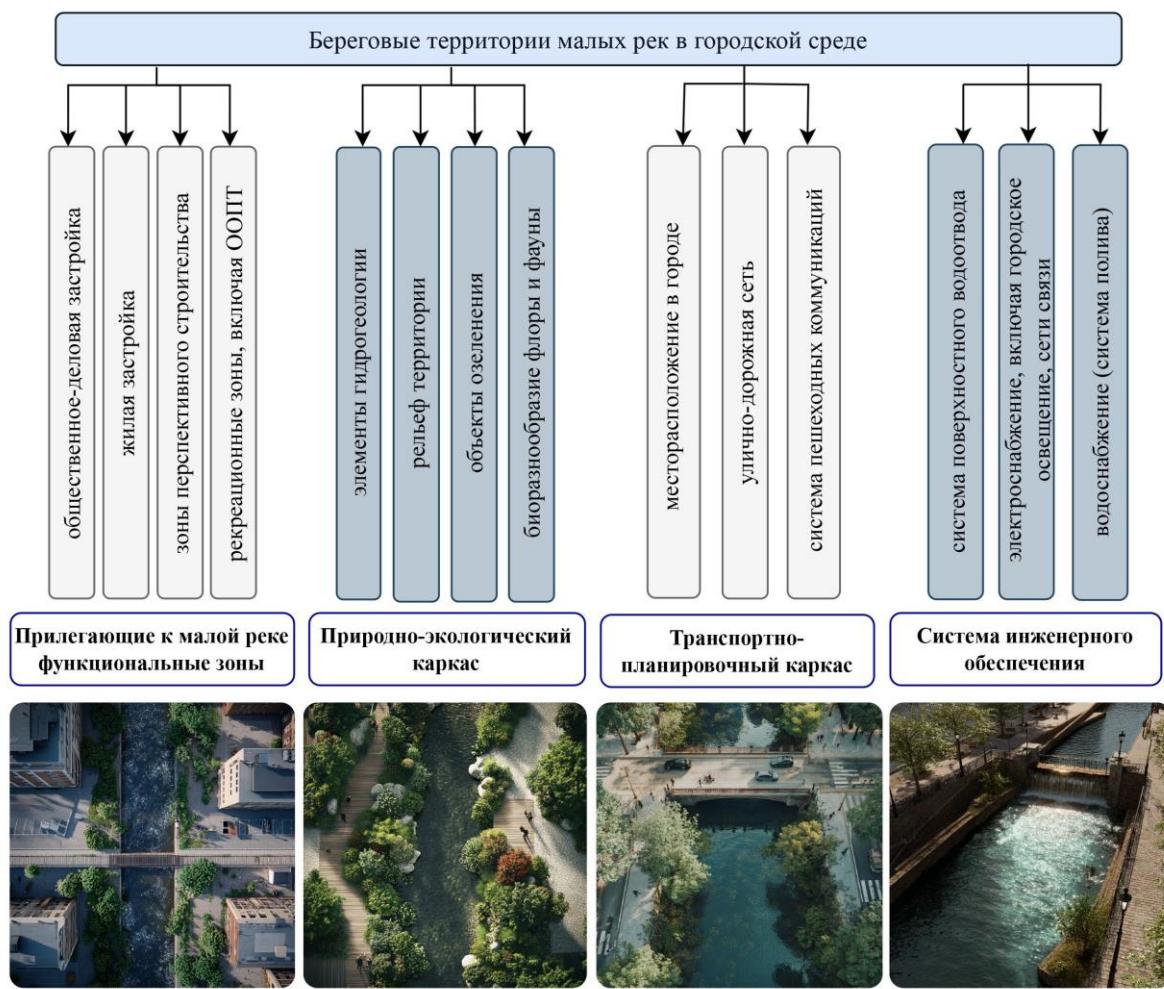


Рис. 1. Малые реки как часть городской среды

Для базовой схемы многокритериального выбора (рис. 2) отработан специальный математический аппарат, позволяющий упростить расчет по сравнению с общим случаем теории принятия решений, включающим в себя предварительный анализ, структурный анализ, дерево решений с вершинами двух типов, анализ неопределенности, а затем полезности и ценности с завершением процедурами оптимизации [9].

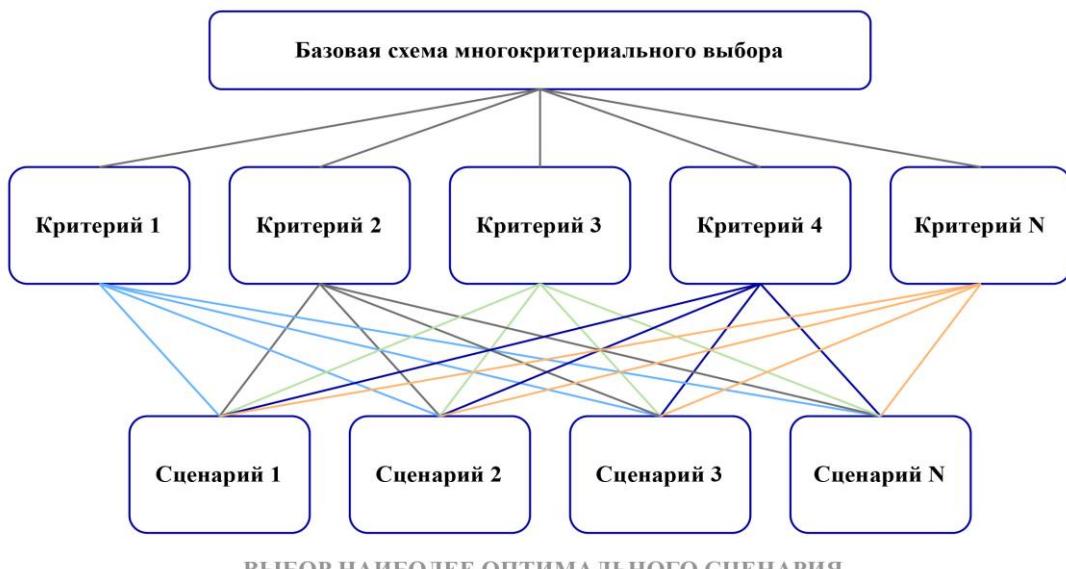


Рис. 2. Обобщенная структура схемы многокритериального выбора

Градостроительные решения — это, в том числе, распределение земли с учетом ограничений различного характера, включая экологические или связанные с культурным наследием. Важно отметить, что территория в городе представляет ценность прежде всего с точки зрения использования того, что на ней расположено. Если исходить из предположения, что эту ценность можно формализовать с помощью некоторой функции, которая на текущем уровне периода прогнозирования и развития различных интересов может быть выражена численно, то тогда стоит задача построить распределение площадей, которое максимизировало бы значение этой функции, а значит и ценность использования земли.

При построении подобной функции важно отметить, что в качестве переменных этой функции выступают критерии, характеризующие различные факторы в своих шкалах измерения. Дальнейшая формализация связана с определением тех вариантов, которые нельзя улучшить хотя бы по одному критерию, не ухудшив по-другому («множество Парето»).

Существуют математические обоснованные «замещения по ценности» выбранных критерии как в условиях определенности, так и в условиях неопределенности. В рамках этого процесса можно предположить результаты перехода определенных типов действий в последствия с помощью использования многомерных функций ценности [9–11]. Процесс исследования выбора, не требующего формализации структуры предпочтений, привел нас к выводам в области их структуризации для градостроительной деятельности и возможностей предлагаемого научного подхода.

Результаты исследования. В результате проведенных исследований было установлено, что в градостроительстве задача распределения площадей на конкретной территории зависит от коэффициента замещения, а именно, какую площадь назначения А мы готовы отдать за приращение площади назначения В на одну единицу. Сложность состоит в том, что коэффициент замещения не является постоянным, а меняется в зависимости от соотношения площадей: если площадь назначения А очень мала, то площадь назначения В велика. Соответственно, коэффициент замещения будет отличаться от противоположного варианта или с равными по размерам территориями назначений А и В.

Мы считаем возможным приложить общую теорию многокритериального выбора к конкретной градостроительной задаче, а именно, распределению площадей береговой территории.

Нами было выбрано два вида распределения площадей на одном участке при множестве вариантов распределения, что упрощает выбор площади от границы береговой линии до границы конкретной функциональной зоны.

Для формирования системного подхода, основанного на многокритериальном анализе, предположим, что:

- ограничения уже учтены при отборе вариантов возможного распределения площадей;
- конкретные особенности данной территории (рельеф, перспективы развития соседних территорий и т.д.) не учитываются для построения базовой модели территории.

Исходя из этого предполагаем, что мы оцениваем только влияние различных назначений территорий друг на друга. После учета влияния происходит конкретизация расположения выбранных площадей с учетом функциональных особенностей территорий.

Таким образом, базовая версия системного подхода включает в себя два назначения площадей: S_1 — под размещение рекреационной зоны, S_2 — под жилую застройку (рис. 3), и мы анализируем только взаимовлияние S_1 и S_2 , а не их конкретное расположение и конфигурацию, планируемые к рассмотрению на следующем этапе исследования.

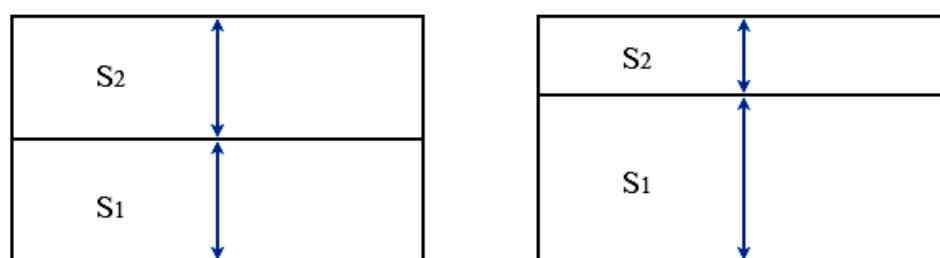


Рис. 3. Системный подход через распределение двух типов площадей

Далее необходимо использовать коэффициент замещения при различных отношениях и построить функцию ценности $W(V_1, V_2)$, где $V_1(S_1)$ и $V_1(S_2)$. С ее помощью можем найти такие значения S_1 и S_2 , при которых W достигает максимального значения.

На втором уровне системного подхода может быть случай с тремя типами назначения площадей (S_1 , S_2 и S_3). В этом случае соотношение становится трехмерным и коэффициент замещения меняется между каждыми двумя значениями площадей, и на них влияет еще и площадь третьего назначения.

Третий и далее уровни системного подхода — это работа с диаграммами (территориями) на 4, 5 и более назначений.

Таким образом, одной из задач становится исследование возможности взаимной компенсации значений критериев относительно друг друга (замещение по ценности). Это возможно при их систематизированной структуризации и использовании соответствующего коэффициента, на который может влиять окружение (уже застроенная территория вокруг) и другие факторы.

Следующим этапом может являться опрос эксперта или лица, принимающего решения (в рамках перечня предложений) об изменении ценности территорий, а также учет экологических, экономических, социальных и функциональных факторов, характеризующих территорию, а также их объединенных групп (рис. 4).



Рис. 4. Многокритериальный анализ при выборе сценария градостроительного планирования и проектирования береговых территорий малых рек

Также методика принятия решений при градостроительном планировании и проектировании береговых территорий малых рек крупных городов должна учитывать наличие интересов различных групп населения, включая бизнес-сообщество и органы местного и федерального управления, которые также сильно изменяются во времени. Результаты проводимых исследований станут частью решения научной проблемы противоречий между современным дискретным подходом к градостроительному планированию и проектированию береговых территорий малых рек и необходимостью перехода к комплексному этапному подходу для их планирования и проектирования с учетом социально-экономических и эколого-функциональных факторов.

Обсуждение и заключение. Таким образом, проведенное исследование подтверждает необходимость перехода от существующей дискретной системы градостроительного планирования и проектирования к системному подходу в освоении береговых территорий малых рек. Предложенная методика многофункционального анализа позволит преодолеть фрагментарность принятия решений и обеспечивает научно-обоснованный подход к распределению функциональных зон.

Ключевым результатом работы явилась разработка теоретической модели, основанной на принципах многомерной оптимизации и теории принятия решений и учитывающей взаимовлияние различных функциональных назначений территорий через систему коэффициентов замещения, что позволяет максимизировать общую ценность выбранной территории без привязки к конкретной конфигурации на начальном этапе.

Практическая значимость исследования заключается в формировании инструментария для сравнения альтернативных сценариев развития территорий при учете соответствующих групп факторов, а также повышении обоснованности принятия градостроительных решений.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в расширении количества рассматриваемых функциональных назначений, интеграции в модель фактора динамики изменения критериев во времени, разработке механизмов учета интересов различных заинтересованных лиц и апробации методики на реальных участках береговых территорий малых рек в городе.

По нашему мнению, внедрение предложенной методики принятия решений при градостроительном планировании и проектировании береговых территорий малых рек в городах будет способствовать созданию сбалансированной и устойчивой городской среды, эффективно использующей их потенциал с учетом принципов биосферной совместимости.

Список литературы/References

1. Котлярова Е.В., Басистая С.П. Проблемы территориального планирования и проектирования береговых территорий малых рек крупных городов. *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2024;4:41–51. <https://doi.org/10.22227/2311-1518.2024.4.41-51>

- Kotlyarova EV, Basistaya SP Problems of Territorial Planning and Design of Coastal Areas of Small rivers of Large Cities. *Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology*. 2024;4:41–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/2311-1518.2024.4.41-51>
2. Kotlyarova E., Oleynikova P., Basistaya S. Coastal territories of small rivers in the context of the modern landscape architecture development. *E3S Web of conferences*. 2024;583:02008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458302008>
3. Андропова Д.Д., Нижегородцева Ю.Е., Гудков А.А. Экологические подходы к формированию общественных приречных пространств как инструмент развития водно-зеленого каркаса города Новокузнецка. *Строительство: наука и образование*. 2024;14:113–148. <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.2.113-148>
- Andropova DD, Nizhgorodtseva YuE, Gudkov AA Ecological Approaches to the Formation of Public Riverside Spaces as a Tool for the Development of Water and Green Framework of Novokuznetsk City. *Construction: Science and Education*. 2024;14:113–148. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.2.113-148>
4. Danilina N., Tsurenkova K., Berkovich V. Evaluating Urban Green Public Spaces: The Case Study of Krasnodar Region Cities, Russia. *Sustainability*. 2021;13:14059. <https://doi.org/10.3390/su132414059>
5. Zubarev K.P. The moisture regime of enclosing structures in different construction areas. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024;20(3):159–166. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-3-159-166>
6. Danilina N., Majorzadehzahiri A. Impact of smart city on formation of a sustainable social smart city. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2791:050025. <https://doi.org/10.1063/5.0143458>
7. Zubarev K.P. Taking into account moisture in increasing the accuracy of calculating heat losses of a building. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024;20(1):154–161. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-1-154-161>
8. Береговских А.Н. Методологические основы для разработки инновационных инструментов градостроительного планирования. *Академический вестник УралНИИпроект РААЧ*. 2025;1(64):15–21. <https://doi.org/10.25628/UNIIP.2025.64.1.020>
- Beregovskikh AN Methodological Foundations for the Development of Innovative Urban Planning Tools. *Academic Bulletin of UralNIIPROEKT RAASN*. 2025;1(64):15–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.25628/UNIIP.2025.64.1.020>
9. Кини Р.Л., Раифа Х. *Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения*. Москва: Радио и связь; 1981. 560 с.
- Keeney RL, Raifa H *Decision Making with Multiple Criteria: Preferences and Substitutions*. M.: Radio i svyaz; 1981. 560 p. (In Russ.)
10. Копытина Е.А., Петрикесва Н.А., Тульская С.Г., Кузнецов С.Н. Применение теории игр в строительной деятельности. *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2018;4(52). <https://doi.org/10.25987/VSTU.2018.52.4.013>
- Kopytina EA, Petrikeeva NA, Tulskaya SG, Kuznetsov SN Application of the Game Theory in Construction Activity. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2018;4(52). (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2018.52.4.013>
11. Савватеев А.В. *Задача многомерного размещения и ее приложения: теоретико-игровой подход*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 08.00.13 — Математические и инструментальные методы экономики. Москва; 2013. 27 с.
- Savvateev AV *Multidimensional Placement Problem and its Applications: Game-Theoretic Approach*. Abstract of Dissertation for the Degree of Doctor of Sciences in Physics and Mathematics in specialty 08.00.13 — Mathematical and Instrumental Methods of Economics. Moscow; 2013. 27 p. (In Russ.)

Об авторах:

Данилина Нина Васильевна, доктор технических наук, член-корреспондент РААЧ, заведующая кафедрой градостроительства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское шоссе, 26), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), nina.danilina@mail.ru

Котлярова Екатерина Владимировна, кандидат экономических наук, доцент, доцент института опережающих технологий «Школа Икс» Донского государственного технического университета (344041, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Шаповалова, 2а), [ORCID](#), ekkot.arch@gmail.com

Глаголев Владислав Олегович, магистрант Института опережающих технологий «Школа Икс» Донского государственного технического университета (344041, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Шаповалова, 2а), vira338565@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

Н.В. Данилина: научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка выводов.

Е.В. Котлярова: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, подготовка текста, проведение расчетов, формирование выводов.

В.О. Глаголев: доработка текста, работа с иллюстрациями, обоснование актуальности исследования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors

Nina V. Danilina, Dr.Sc. (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of the Department of Urban Planning at the National Research Moscow State University of Civil Engineering (26 Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation) [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), nina_danilina@mail.ru

Ekaterina V. Kotlyarova, PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor at the Institute of Advanced Technologies "School of X" of the Don State Technical University (2a Shapovalov Str., Rostov-on-Don, 344041, Russian Federation), [ORCID](#), ekkot.arch@gmail.com

Vladislav O. Glagolev, Master student at the Institute of Advanced Technologies "School of X" of the Don State Technical University (2a Shapovalov Str., Rostov-on-Don, 344041, Russian Federation), yhra338565@gmail.com

Claimed contributorship:

NV Danilina: scientific supervision, analysis of the research results, correction of the conclusions.

EV Kotlyarova: formation of the basic concept, aims of the study, preparation of the manuscript, calculations, conclusions.

VO Glagolev: revision of the manuscript, work with the illustrations, substantiation of the relevance of the study.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 07.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 21.09.2025

Принята к публикации / Accepted 05.10.2025

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 69.059

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-27-36>

Критический анализ использования технологии анализа цифровых изображений при мониторинге строительных конструкций и материалов

Л.С. Сабитов , Л. Али

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация

sabitovLS@mgsu.ru



EDN: HCOBUQ

Аннотация

Введение. В связи с недавним широким внедрением передовых технологий в строительном секторе и неотложной необходимостью завершать проекты в кратчайшие сроки и с минимальными затратами принцип достижения высокого уровня качества при реализации проектов представляет собой сложную задачу для тех, кто работает в области строительства. В этих условиях технология цифрового анализа изображений стала перспективным решением для обеспечения требований по повышению эффективности управления проектами на различных этапах их жизненного цикла. В данном обзоре литературы анализируется роль технологий цифровой обработки изображений в мониторинге строительных материалов и конструкций на протяжении всего жизненного цикла проекта с целью повышения качества и эффективности. Исследование направлено на оценку эффективности этой технологии по сравнению с традиционными методами, обзор последних разработок в области применения цифровой обработки изображений для мониторинга строительных конструкций и определение показателей эффективности, таких как время и стоимость, а также упоминание препятствий, мешающих ее широкому внедрению в инженерной практике.

Материалы и методы. Проведён системный обзор более 30 публикаций (2015–2024 гг.), охватывающих алгоритмы ИИ (CNN, YOLOv4), 3D-моделирование (LiDAR, Structure from Motion) и интеграцию BIM. Оценены их применимость, масштабируемость и влияние на мониторинг состояния конструкций.

Результаты исследования. Полученные результаты показали, что использование технологии цифрового анализа изображений как инструмента для мониторинга конструкций и контроля качества строительных материалов на разных этапах жизненного цикла проекта привело к повышению качества проектов, сокращению времени и затрат, а также улучшению процесса принятия решений на разных стадиях проектного цикла. Интеграция обработки изображений с искусственным интеллектом и системами информационного моделирования зданий обеспечила точность в обнаружении дефектов в зданиях и строительных материалах, повысив эффективность управления проектами на 25 %.

Обсуждение и заключение. ЦОИ демонстрирует трансформационный потенциал, но сталкивается с барьерами: влияние внешней среды, гетерогенность данных и отсутствие стандартизации. Предложены интеграция LiDAR, разработка устойчивых моделей машинного обучения для анализа мультимодальных данных и усиление междисциплинарного взаимодействия. Для преодоления ограничений требуются дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию технологий под реальные условия эксплуатации. ЦОИ революционизирует мониторинг конструкций, однако массовое внедрение возможно лишь через устойчивые инновации, партнерство между отраслями и адаптацию к внешним факторам.

Ключевые слова: анализ цифрового изображения, жизненный цикл проекта, контроль качества, мониторинг

Для цитирования. Сабитов Л.С., Али Л. Критический анализ использования технологии анализа цифровых изображений при мониторинге строительных конструкций и материалов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территории*. 2025;4(4):27–36. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-27-36>

Critical Analysis of the Use of Digital Image Analysis Technology to Monitor Construction Facilities and Materials

Linar S. Sabitov , Lin Ali 

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

 sabitovLS@mgsu.ru

Abstract

Introduction. Due to the latest wide-scale adoption of advanced technologies in the construction sector and the pressure to complete projects in the shortest time and at minimal cost, the principle of achieving a high-quality level in project implementation is a daunting task for those working in construction. In this context digital image analysis technology has served as a viable solution to meet the requirements for improving project management efficiency at different stages. This literature review examines the role of digital image processing technologies in monitoring construction materials and structures throughout the project lifecycle in order to improve their quality and efficiency. The aim of the study is to evaluate the efficiency of this technology compared to traditional methods, review the latest developments in digital image processing for monitoring building structures, and identify performance indicators such as time and cost, as well as mention obstacles preventing its wide-scale adoption in engineering.

Materials and Methods. More than 30 publications (2015-2024) covering AI algorithms (CNN, YOLOv4), 3D modeling (LiDAR, Structure from Motion) and BIM integration were systematically reviewed. Their applicability, scalability, and impact on structural condition monitoring were evaluated.

Research Results. According to the results, the use of digital image analysis technology as a tool for monitoring structures and quality control of construction materials at different stages of a project lifecycle caused improved project quality, reduced time and costs, and boosted decision-making at different stages of a project cycle. The integration of image processing with artificial intelligence and building information modeling systems proved to be accurate in detecting defects in buildings and building materials with a 25% increase in the project management efficiency.

Discussion and Conclusion. Digital image processing (DIP) holds a transformational potential, but it is facing some obstacles such as environmental influences, data heterogeneity and lack of standardization. LiDAR integration, development of sustainable machine learning models for multimodal data analysis, and strengthening interdisciplinary collaboration are set forth. In order to overcome the restraints, further research is required to optimize technologies for real-world operating conditions. DIP is revolutionizing design monitoring, but mass adoption is possible only by means of sustainable innovation, industry-wide partnerships, and adaptation to external factors.

Keywords: digital image analysis, project lifecycle, quality control, monitoring

For citation. Sabitov LS, Ali L. Critical Analysis of the Use of Digital Image Analysis Technology to Monitor Construction Facilities and Materials. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):27–36. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-27-36>

Введение. В связи с быстрым развитием сектора строительного проектирования контроль качества материалов и инфраструктуры является ключевой задачей для инженеров и проектировщиков. На протяжении десятилетий отрасль полагалась на традиционные методы, такие как ручной визуальный осмотр или ручные измерения, которые, как показали исследования, подвержены человеческой ошибке до (30–40 %), особенно в зонах повышенного риска или в труднодоступных местах. Эти методы часто не позволяют своевременно выявить ранние признаки деградации, такие как выцветание или отслоение защитного покрытия, которые могут сигнализировать о начале коррозионных процессов или проникновении влаги в конструкцию. В сочетании с микротрецинами такие дефекты способны со временем привести к снижению несущей способности элементов и, как следствие, угрожать безопасности объекта [1].

В отличие от них методы цифровой обработки изображений стали перспективным решением для повышения точности наблюдения и снижения затрат. В исследовании [2] комбинация алгоритма Otsu и сети YOLOv4 позволила классифицировать трещины в бетоне с точностью 99,75 %, при этом помехи из-за поверхностных включений снизились на 40 %. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с тепловизионными системами показало возможность обследования армированных конструкций в рекордные сроки, сократив период обследования на 30 % по сравнению с традиционными методами [3].

Впрочем, эти методы по-прежнему сталкиваются с препятствиями, связанными с условиями окружающей среды и эксплуатации. Согласно исследованиям [4], при слабом освещении или случайных вибрациях точность обнаружения снижается до 75 %, что подчеркивает необходимость разработки алгоритмов, устойчивых к шумам.

С другой стороны, в работе [5] подчеркивается сложность анализа асфальтовых смесей с помощью двумерных изображений, что побудило авторов разработать индекс IPAR с помощью алгоритма цветовой сегментации для повышения точности оценки распределения заполнителей. Более того, интеграция компьютерного зрения и методов BIM является ключевым фактором повышения эффективности. В статье [6] интеграция данных LiDAR с BIM-моделями обеспечила сравнение геометрического проекта с реальной структурой с пространственной четкостью ± 2 мм, что улучшило проактивное обслуживание. Цифровая корреляция изображений (DIC) доказала свою эффективность в измерении динамических деформаций мостов под действием нагрузок, где чувствительность измерений достигает 0,1 мм, превосходя ручные методы, которые не превышают 0,5 мм [7].

Несмотря на эти достижения, результаты исследования [8] демонстрируют, что эффективность систем мониторинга в значительной степени зависит от качества входных данных, особенно при применении спектральной визуализации и электромагнитного обнаружения для выявления рисков коррозии арматурной стали и свойств бетонного покрытия, что позволило достичь 90 % точности при объединении с лабораторными данными. Исследователи в работах [9, 10] также обсуждают необходимость разработки моделей машинного обучения, способных обрабатывать разнородные данные, например, объединять изображения LiDAR с тепловизионными изображениями, для повышения надежности проектов на открытом воздухе.

Целью данного исследования является обзор последних достижений в области применения цифровой обработки изображений для структурного мониторинга, акцентируя следующее:

1. Инновационные технологические подходы.
2. Интеграция между системами, например: интеграция БПЛА с BIM для повышения эффективности инспекции.
3. Практические проблемы, например: влияние плохого освещения или вибраций на точность результатов.

Проанализировав более 30 исследований, опубликованных в период с 2015 по 2024 год, в данной статье будет дано комплексное представление о роли этих технологий в достижении устойчивости и снижении затрат для повышения эффективности управления проектами, а также предложены решения для устранения ограничений, препятствующих применению этих технологий в будущих проектах.

Материалы и методы. В ходе исследования рассмотрены технологии цифровой обработки изображений в области мониторинга зданий и строительных материалов.

1. Технология цифровой обработки изображений в области мониторинга зданий:

Методы цифровой обработки изображений становятся основой для разработки систем мониторинга сооружений, обеспечивая точные и безопасные решения для раннего обнаружения повреждений. В [11] разработана интегрированная система, основанная на объединении разработанного алгоритма Otsu с морфологическими фильтрами (рис. 1), такими как медианный фильтр и гауссовый фильтр, для выделения трещин в железобетоне, где точность обнаружения достигла 98,75 % при классификации типов повреждений (поверхностные, капиллярные, продольные/поперечные трещины) [12], при этом уменьшив влияние помех, вызванных загрязнениями, на 40 %. В исследовании [2] для повышения скорости классификации также использовалась сеть YOLOv4, основанная на работе искусственного интеллекта, позволяющая исследовать 120 участков изображения в секунду. Для сравнения, ручное исследование занимает несколько минут для каждого участка.

При проведении полевых наблюдений беспилотные летательные аппараты доказали свою полезность для доступа в опасные или труднодоступные районы. В исследовании [1] БПЛА, оснащенные камерами высокого разрешения, использовали механизм обработки изображений (эвристическая обработка), основанный на сочетании нескольких типов алгоритмов (преобразование Шляпы, пороговая обработка HSV, пороговая обработка градаций серого) для обследования железобетонных конструкций и обнаружения трещин и разрушения поверхности в проекте университетского городка, и подтвердили качественное улучшение производительности предложенных алгоритмов по сравнению с традиционными методами. При этом основное внимание уделялось минимизации ошибок (таких как путаница трещин с другими краями) и повышению четкости результатов обнаружения, так как было замечено, что представленный в работе алгоритм дает на 35 % более точные результаты, чем традиционные алгоритмы, в то время как в работе [3] представлен более продвинутый механизм идентификации состояния объекта, основанный на алгоритмах (Canny & Prewitt Edge Detectors) для идентификации трещин, алгоритме (Color Thresholding) для обнаружения присутствия любых живых организмов на поверхности бетона и обнаружения состояния арматуры (рис. 1). Представленная методология была применена к телекоммуникационной башне из бетона высотой 177 метров в Португалии. По результатам исследования система смогла обнаружить коррозию и трещины в бетоне с точностью 92 %, а также обнаружить биоутечки и коррозию арматуры с точностью 90 %, сократив при этом время, необходимое для осмотра, на 30 % по сравнению с традиционными методами, использующими строительные леса и ручные инструменты [3]. Результаты применения технологии обработки цифровых изображений, снятых дронами, и их обработки с помощью алгоритмов (Rich Feature Hierarchies) и (Fast R-CNN) для обнаружения поверхностных повреждений водопропускных

сооружений и мостов (трещин и коррозии), а также использования методов (t-SNE) для уменьшения размеров и визуализации сложных данных, дали точность обнаружения поверхностных трещин до 95 % при сокращении времени, необходимого для осмотра, на 70 % по сравнению с традиционными ручными методами, что привело к повышению точности и эффективности осмотра и мониторинга объектов при снижении рисков для людей [7].

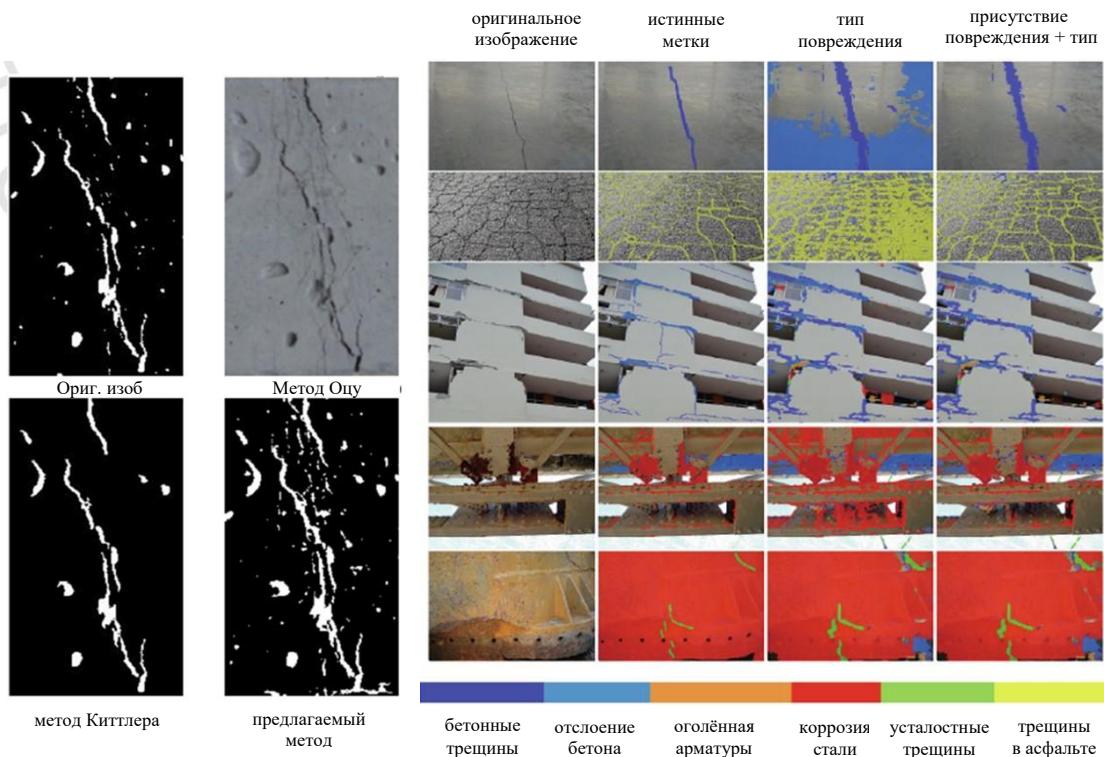


Рис. 1. Анализ цифрового изображения для мониторинга трещин в бетонных элементах [2, 7]

Методы и алгоритмы, основанные на применении фрактального анализа к цифровым изображениям, также применялись для выявления изменений в дефектах бетонных мостов (трещины) путем вычисления фрактальной размерности с помощью алгоритма подсчета коробок [13]. Все эти способы основаны на методах выявления дефектов и мониторинга конструкций с помощью изображений. Кроме того, метод корреляции цифровых изображений (DIC) в исследовании [13, 7] показал превосходную способность измерять деформации моста при динамических нагрузках, зафиксировав чувствительность 0,1 мм на мосту, подвергшемся многократным вибрациям. Данные (DIC) были объединены с результатами конечно-элементного моделирования (FEM), которые подтвердили 95 %-ное согласие результатов, что свидетельствует о возможности их использования для оценки целостности конструкции в режиме реального времени (рис. 2).

В контексте объединения технологий интеграция 3D LiDAR-сканирования и цифровой обработки изображений с BIM (Building Information Modeling) существенно повысила точность и гибкость мониторинга объектов на протяжении всего их жизненного цикла. На этапе проектирования проведено исследование [14], показавшее эффективность лазерного сканирования для создания точных 3D-моделей исторических сооружений, таких как церковь Санта-Марина в Испании, где данные были собраны с помощью цифровой однообъективной зеркальной камеры для получения многоспектральных изображений церковной структуры, а затем объединены с данными 3D-лазерного сканирования для создания точной цифровой модели церковной структуры. Затем изображения были преобразованы в два этапа: во-первых, сегментация по цветовым и текстурным характеристикам, во-вторых, классификация с применением объективной методики классификации для определения материала (биокарентинский известняк) и типов разрушения (трещины, биокоррозия, высыпание). Полученные данные были проанализированы, затем модель была объединена с предварительно обработанными изображениями, и с помощью лазерного сканера были созданы метрические карты для определения мест повреждений на камне с более высокой точностью, чем традиционные методы. Точность обнаружения трещин составила 100 %, а точность обнаружения засоления — 80 % с детальными измерениями допусков поверхности ± 3 мм. Интеграция (LiDAR и BIM) позволила улучшить оценку качества материала и планирование реставрации, а также сократить расходы на 20 % за счет интеграции (ReCap Pro и AutoCAD) для преобразования 3D-модели в подробные чертежи реставрации (рис. 3).

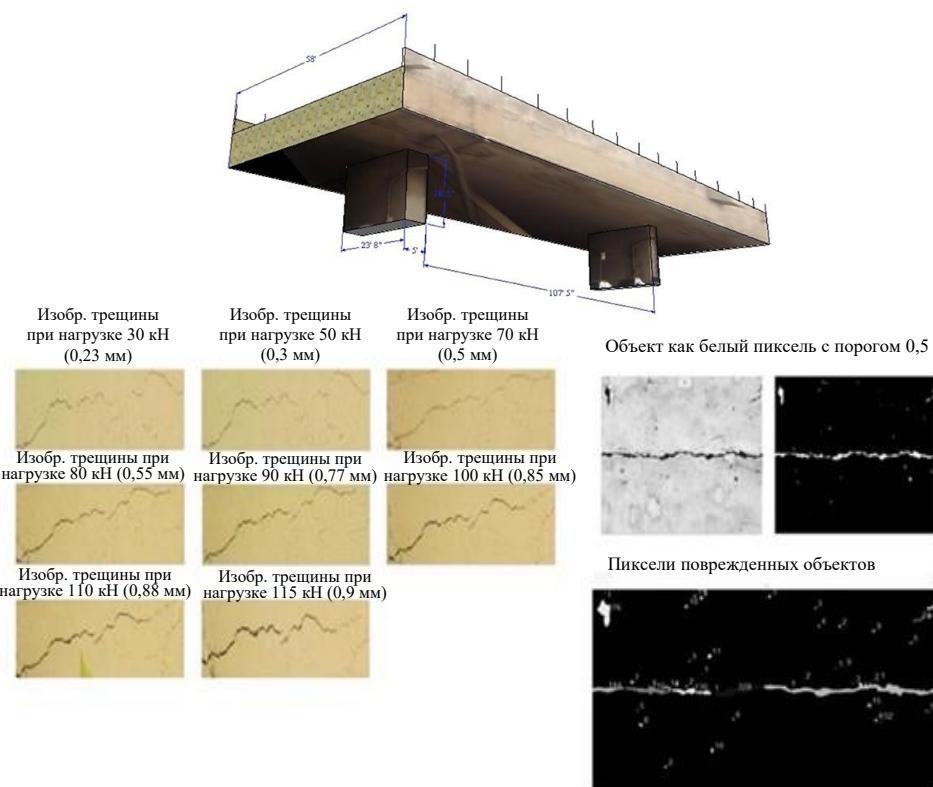


Рис. 2. Цифровой анализ изображений для мониторинга состояния объекта [7]

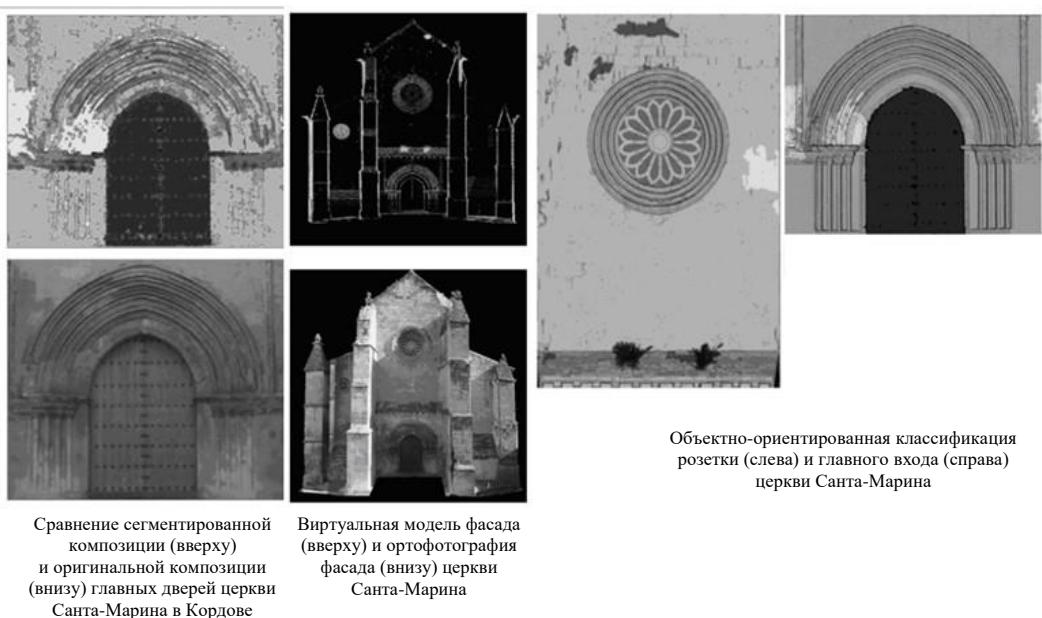


Рис. 3. Интеграция анализа цифрового изображения с лазерным сканированием и BIM [14]

В работе [12] также была описана роль технологии цифровых изображений на этапе строительства для контроля хода работ, где показатели, полученные с помощью предложенной модели, были интегрированы с BIM-моделями для обновления информации о графике и прогнозирования структурных рисков, что позволило снизить зависимость от ручного визуального контроля (рис. 4).

На этапах эксплуатации и ремонта нейронные сети (CNN), обученные на данных LiDAR-съемки, помогли определить дефекты бетонной поверхности с точностью до 95 %, как в исследовании [9], где DenseNet-12 превзошла всех в автоматической классификации и определении размеров повреждений (трещины и высолы) с помощью камеры смартфона. Фрактальный анализ с использованием алгоритма подсчета ящиков также способствовал измерению изменений в структурных дефектах без необходимости точной регистрации изображений, поскольку фрактальная размерность увеличилась с 1,13 (основная трещина) до 1,28 (расширенная трещина) на имитационных изображениях, при этом скорость изменения составила 13,26 % по сравнению с преувеличенными

изменениями (до 184 %) в традиционных методах, таких как вычитание изображений. Алгоритм реконструкции поверхности Пуассона преобразовал облако точек в замкнутую и гладкую сетчатую модель, поддерживающую цифровую реконструкцию сложных структур (рис. 5).

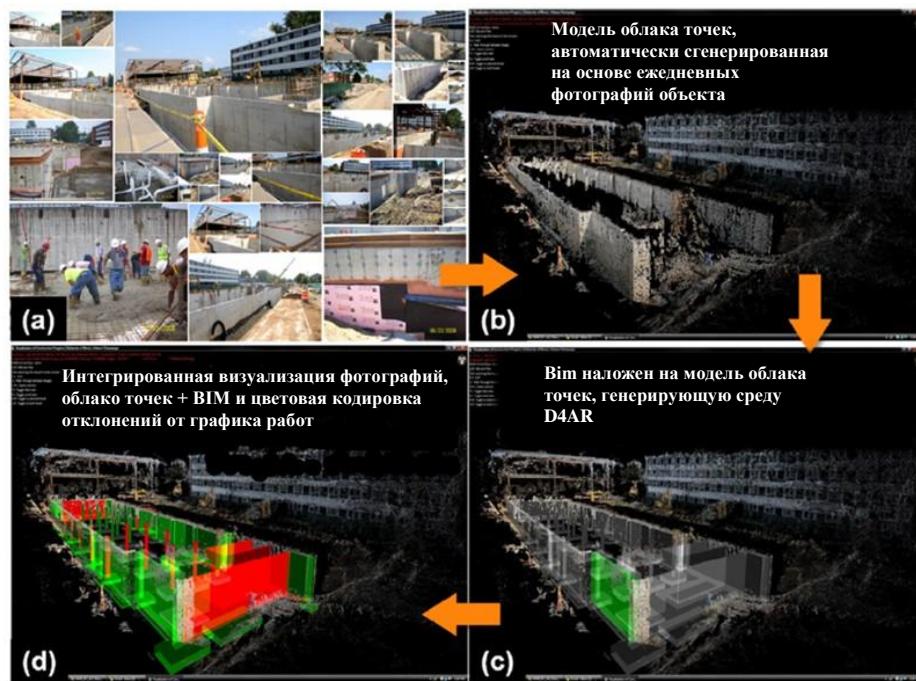


Рис. 4. Цифровой анализ изображений для контроля качества работы на этапе строительства [12]

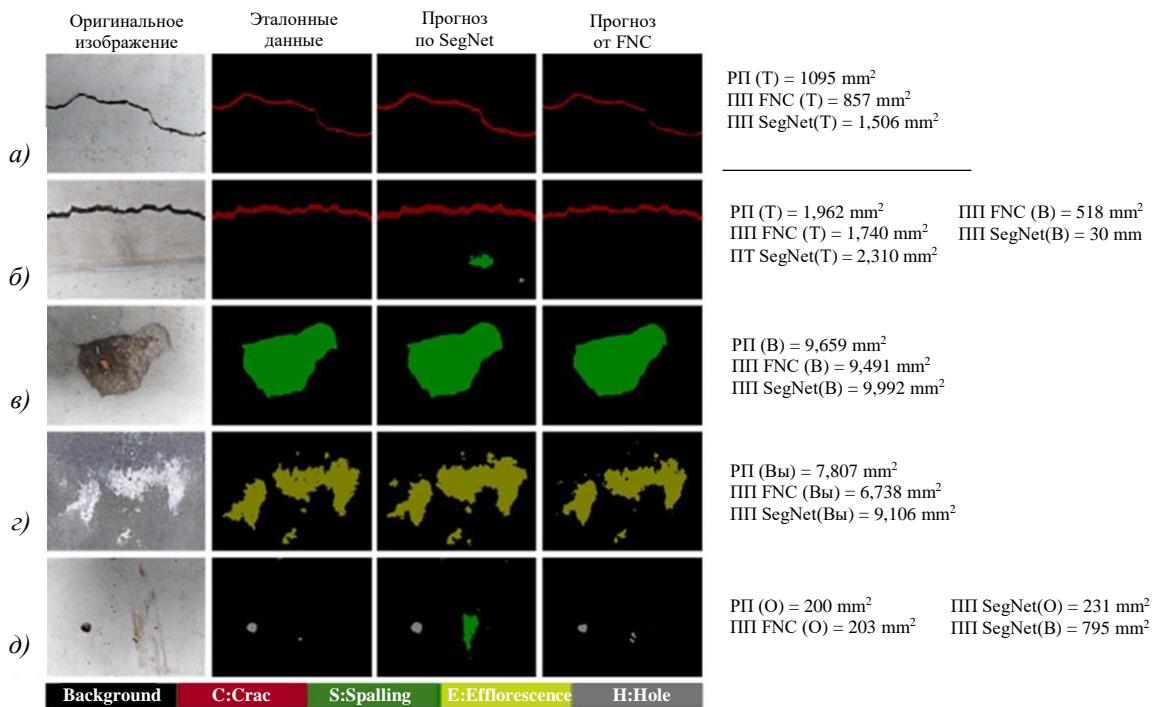


Рис. 5. Метод анализа изображений для прогноза многочисленных дефектов сооружений [7]

Понятие интеграции технологии цифровых изображений в мониторинг объектов и информационное моделирование не ограничивалось областью 3D, а развились до интеграции с 4D-моделями CAD, что позволило визуализировать фактический прогресс проектов и выявить проблемы, связанные с проектированием и планированием, а также сократить время, человеческие усилия и затраты, необходимые для сбора и обновления данных по проектам. Методика обработки цифровых изображений была применена при строительстве подвесного моста в Корее, где камеры, установленные на стройплощадке, использовались для получения изображений и привязки их к точному временному контексту, а после обработки этих изображений с помощью фильтров (Hue-, Saturation-

и Median) — для удаления шума и выявления нежелательного оборудования. Результаты этой обработки были объединены с графиком проекта с помощью программного обеспечения Jet Stream, что помогло обновить 4D-модель, и они показали точность 92 % для коэффициента точности и правильности установки элементов, а 38 % ошибок были исправлены на этапе проектирования, что позволило сократить затраты на 44 % и уменьшить время строительства на 25 % [15].

Впрочем, оказалось, что на точность результатов сильно влияют условия окружающей среды, такие как плохое освещение и вибрации, так как при применении технологии цифровой обработки изображений в подземном туннеле из-за высокой влажности и тумана точность обнаружения снизилась до 75%. Кроме того, интеграция 3D-изображений с данными (LiDAR) увеличила сложность необходимой технологии обработки на 15%.

2. Технология цифровой обработки изображений в области мониторинга строительных материалов:

В сфере оценки качества строительных материалов методы обработки изображений продемонстрировали превосходную способность анализировать тонкие характеристики строительных смесей. В исследовании [16] алгоритм (Color Segmentation) использовался для определения распределения заполнителей по размерам в асфальтовых смесях, где был рассчитан показатель Image Processing Aggregate Proportion (IPAP), и с помощью этого параметра была определена пропорция заполнителя в смеси с точностью до 85 %, что помогло увеличить прочность дороги на 15 % за счет изменения плотности заполнителя. Мультиспектральная съемка (Multispectral Imaging) в исследовании [5] подтвердила свою действенность в обнаружении коррозии металла в конструкциях с точностью 90 %, анализируя спектральные изменения, вызванные окислением, и сравнивая результаты с лабораторными данными для измерения толщины коррозионного слоя. В то же время в работе [17] для определения коэффициента контакта камня с камнем в проницаемых трениях смесях использовался анализ 2D DIP-изображений. Алгоритмы, такие как морфологический анализ, были применены для преобразования изображений в количественные данные, показывающие тесную корреляцию между плотностью контакта гравия и жесткостью поверхностного слоя, что помогло точно настроить качество проектирования смесей. С другой стороны, исследование в [17] было посвящено разработке методик проверки качества промышленных материалов (например, бетона и стали) с использованием статистического анализа изображений для обнаружения тонких дефектов, которые могут повлиять на промышленную безопасность. Например, алгоритмы анализа текстуры применялись к изображениям бетона для выявления крошения или микротрещин, а вейвлет-преобразование использовалось для повышения точности изображений, полученных в не самых лучших условиях освещения (рис. 6). Этот метод позволил сократить время проверки на 30 % по сравнению с традиционными методами.

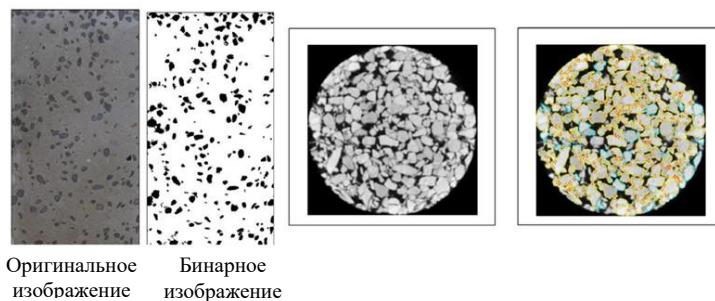


Рис. 6. Анализ цифрового изображения при контроле качества асфальтовой смеси (определение пропорции заполнителя к раствору, определение контактной поверхности между заполнителями) [16]

В рамках исследования [13] оценивалась устойчивость к статической сегрегации в самоуплотняющемся бетоне. Для выявления зон сегрегации использовались такие методы, как преобразование градаций серого и пороговый анализ Otsu, а результаты соотносились с испытаниями на прочность при сжатии для разработки более точных критериев контроля качества. В области легких бетонов исследование [18] способствовало оптимизации бетонных смесей с использованием градационного индекса S8, полученного в результате анализа цифровых изображений пористых заполнителей (Lightweight Aggregates). Благодаря применению таких алгоритмов, как Semantic Segmentation, распределение заполнителей было измерено с точностью до 0,1 мм, что позволило уменьшить пористость и повысить устойчивость материала к воздействию влаги и солей. Кроме того, исследование [16] внесло вклад в анализ распределения размеров заполнителей в асфальтобетонных смесях с помощью методов обработки изображений. Результаты показали, что анализ изображений с помощью таких алгоритмов, как Particle Counting, позволяет оценить свойства смеси (например, устойчивость к сжатию) без необходимости проведения сложных лабораторных испытаний, сократив при этом расходы на 25 %.

В области практического применения в ходе работы над исследованием [19] была разработана методология оценки сегрегации заполнителей в готовом бетоне путем анализа статических изображений с использованием алгоритмов вариационного анализа. Этот метод позволил улучшить контроль качества при крупномасштабном строительстве, определив зоны сегрегации с точностью до 0,5 мм, что помогло свести к минимуму дорогостоящие корректировки после строительства. В ходе обсуждения проблем в исследовании [18] было отмечено, что анализ асфальтовых смесей с неоднородными заполнителями требует разработки передовых алгоритмов, таких как PointNet, для классификации облака точек, где точность модели достигла 88 % при определении градиента размера заполнителя по сравнению с 65 % для традиционных методов. В статье [7] также обсуждается сложность мониторинга материалов в экстремальных условиях окружающей среды (например, при тумане или сильном ветре), что привело к предложению интегрировать тепловидение с компьютерным зрением для повышения надежности проектов инфраструктуры на открытом воздухе. В рамках преодоления препятствий, связанных с условиями освещения, в исследовании [5] представлена методология соединения технологии обработки изображений с генеративными нейронными сетями, которая позволяет определять и прогнозировать степень коррозии арматурной стали, при этом точность прогнозирования толщины коррозионного слоя достигает 95 %.

Результаты исследования. Результаты контроля состояния конструкций:

1) Исследования подтвердили, что методы цифровой обработки изображений способны обеспечить исключительную точность обнаружения структурных повреждений, но показали, что эффективность варьируется в зависимости от условий эксплуатации. При использовании алгоритма Otsu с медианным фильтром и гауссовым фильтром точность идентификации трещин в бетоне достигла 99,75 %, при этом помехи, вызванные поверхностными дефектами, были снижены на 40 %. Использование сети YOLOv4 также способствовало очень быстрой классификации типов трещин (поверхностные, капиллярные, продольные/поперечные), так как за секунду обрабатывались 120 изображений по сравнению с ручным осмотром, который занимает несколько минут на каждое изображение.

2) Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) доказали свою эффективность для доступа к опасным зонам, таким как эстакады мостов. Использование 4К-камер с алгоритмами эвристической обработки позволило обнаружить коррозию и трещины в бетонной конструкции с точностью 92 %, при этом время осмотра сократилось на 30 %, что увеличило эффективность проактивного обслуживания.

3) Несмотря на эти достижения, на точность результатов сильно влияют условия окружающей среды, такие как плохое освещение или вибрации. В ходе эксперимента в подземном тоннеле точность обнаружения упала до 75 % из-за высокой влажности и тумана, что указывает на необходимость разработки алгоритмов, устойчивых к шуму.

4) Интеграция 3D-изображений (Structure from Motion — SfM) с данными LiDAR увеличила сложность обработки на 15 %, но способствовала созданию подробных цифровых моделей исторических сооружений, что облегчило отслеживание прогрессирующей деградации с течением времени.

Результаты мониторинга строительных материалов:

1) В секторе строительных материалов методы обработки изображений продемонстрировали способность анализировать тонкие характеристики смесей. С помощью индекса IPAP (Image Processing Aggregate Proportion) рассчитан гранулометрический состав асфальтобетонных смесей с точностью 85 %, повышая долговечность дорог на 15 % за счет оптимизации пропорций заполнителей.

2) Генеративные нейронные сети (GAN) показали свою способность моделировать влияние факторов окружающей среды (влажность, соленость воздуха) на коррозию стали, где точность предсказания толщины коррорированного слоя достигла 95 %.

Обсуждение и заключение. Несмотря на значительный прогресс, исследования выявили серьезные проблемы, которые ограничивают повсеместное применение этих технологий. На первом месте среди этих проблем стоят плохие условия освещения или случайные вибрации, которые оказывают значительное влияние на точность результатов. Качество оборудования, используемого для получения изображений объектов, также критично: чем ниже разрешение, тем больше времени требуется для обработки данных, что негативно сказывается на сроках реализации масштабных проектов. Для преодоления этих барьеров предложены следующие направления:

- повышение устойчивости к условиям окружающей среды путем разработки алгоритмов, работающих в условиях недостаточной освещенности или тумана;
- интеграция с BIM-системами: прямая связь данных изображений с проектными моделями, повышение точности калибровки;
- расширение сферы применения: включение других материалов.

Цифровая обработка изображений трансформирует мониторинг конструкций и материалов, обеспечивая высокую точность и оперативность. Однако для массового внедрения необходимо устранить технические и экологические ограничения через устойчивые инновации и междисциплинарное сотрудничество. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию алгоритмов под реальные условия эксплуатации, интеграцию с BIM-системами и расширение применения на новые материалы, чтобы максимально реализовать потенциал этих технологий в инженерной практике.

Список литературы/References

1. Sankarasrinivasan S, Balasubramanian E, Karthik K, Chandrasekar U, Gupta R Health Monitoring of Civil Structures with Integrated UAV and Image Processing System. *Procedia Computer Science*. 2015;54:508–515. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.06.058>
2. Del Savio AA, Luna Torres A, Cárdenas Salas D, Vergara Olivera MA, Urday Ibarra GT Detection and Evaluation of Construction Cracks through Image Analysis Using Computer Vision. *Applied Science*. 2023;13:16. <https://doi.org/10.3390/app13179662>
3. Ribeiro D, Santos R, Shibasaki A, Montenegro P, Carvalho H, Calçada R Remote Inspection of RC Structures Using Unmanned Aerial Vehicles and Heuristic Image Processing. *Engineering Failure Analysis*. 2020;117:104813. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104813>
4. Malesa M, Szczepanek D, Kujawińska M, Świercz A, Kołakowski P Monitoring of Civil Engineering Structures Using Digital Image Correlation Technique. *The European Physical Journal Conferences*. 2010;6. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20100631014>
5. Galantucci RA, Fatiguso F Advanced Damage Detection Techniques in Historical Buildings Using Digital Photogrammetry and 3D Surface Analysis. *Journal of Cultural Heritage*. 2019;36:51–62. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.09.014>
6. Kim M, Cheng CP, Sohn H, Chang CC A Framework for Dimensional and Surface Quality Assessment of Precast Concrete Elements Using BIM and 3D Laser Scanning. *Automation in Construction*. 2015;49(B):225–238. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.07.010>
7. Spencer BF Jr, Vedhus H, Narazaki Y Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring. *Engineering*. 2019;5(2):199–222. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.030>
8. Tworzewski P, Raczkiewicz W, Czapik P, Tworzewska J Diagnostics of Concrete and Steel in Elements of an Historic Reinforced Concrete Structure. *Materials*. 2021;14(2):306. <https://doi.org/10.3390/ma14020306>
9. Nasrollahi M, Bolourian N, Hammad A Concrete Surface Defect Detection Using Deep Neural Network Based on Lidar Scanning. *7th International Construction Conference Jointly With The Construction Research Congress*. Canada; 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/335276365_Concrete_Surface_Defect_Detection_Using_Deep_Neural_Network_Based_on_LiDAR_Scanning (accessed: 29.09.2025).
10. McLaughlin E A Deep Learning Approach for Automating Concrete Bridge Defect Assessment Using Computer Vision. Ontario: University of Waterloo; 2020. 112 p. URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=qX4dW5sAAAAJ&citation_for_view=qX4dW5sAAAAJ:qjMakFHDy7sC (accessed: 29.09.2025).
11. Talab AMA, Huang Z, Xi Fan, HaiMing L Detection Crack in Image Using Otsu Method and Multiple Filtering in Image Processing Techniques. *Optik*. 2016;127(3):1030–1033. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.09.147>
12. Yang J, Park MW, Vela PA, Golparvar-Fard M Construction Performance Monitoring via Still Images, Time-Lapse Photos, and Video Streams: Now, Tomorrow, and the Future. *Advanced Engineering Informatics*. 2015;29(2):211–224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.011>
13. Wijaya U, Yulianto Y, Haryanto E Current Literature Review on Image Processing Analysis for Concrete Damage Assesment. *Jurnal Pensil: Pendidikan Teknik Sipil*. 2024;13(3):255–274. <https://doi.org/10.21009/jpensil.v13i3.45042>
14. Meroño JE, Perea AJ, Aguilera MJ, Laguna AM Recognition of Materials and Damage on Historical Buildings Using Digital Image Classification. *South African Journal of Science*. 2015;111(2):10. <https://doi.org/10.17159/sajs.2015/20140001>
15. Kim C, Kim B, Kim H 4D CAD Model Updating Using Image Processing-Based Construction Progress Monitoring. *Automation in Construction*. 2018;35(2):44–52. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.03.005>
16. Moon KH, Falchetto AC, Wistuba MP, Jeong JH Analyzing Aggregate Size Distribution of Asphalt Mixtures Using Simple 2D Digital Image Processing Techniques. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2015;40:1309–1326. <https://doi.org/10.1007/S13369-015-1594-0>
17. Alvarez AE, Mora JC, Espinosa LV Quantification of Stone-on-Stone Contact in Permeable Friction Course Mixtures Based on Image Analysis. *Construction and Building Materials*. 2018;4:462–471. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.189>
18. Barbosa FS, Beaucour AL, Farage MCR, Ortola S Image Processing Applied to the Analysis of Segregation in Lightweight Aggregate Concretes. *Construction and Building Materials*. 2018;25:3375–3381. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.028>
19. Breul P, Geoffry JM, Haddani Y On-Site Concrete Segregation Estimation Using Image Analysis. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2018;6:171–180. <https://doi.org/10.3151/jact.6.171>

Об авторах:

Сабитов Линар Салихзанович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и организации строительного производства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское шоссе, 26), [ORCID](#), SabitovLS@mgsu.ru

Али Лин, аспирант кафедры технологии и организации строительного производства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское шоссе, 26), [ORCID](#), lin.ali.97@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Л.С. Сабитов: научное руководство, формирование основной концепции, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Л. Али: разработка идеи, цели и задачи исследования, подготовка текста, анализ и формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Linar S. Sabitov, Dr.Sc. (Eng.), Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production at the National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) (26 Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation), [ORCID](#), SabitovLS@mgsu.ru

Lin Ali, PhD student at the Department of Technology and Organization of Construction Production at the National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) (26 Yaroslavskoe Highway Moscow, 129337, Russian Federation), [ORCID](#), lin.ali.97@mail.ru

Claimed contributorship:

LS Sabitov: scientific supervision, formation of the basic concept, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

L Ali: development of the idea, aims of the study, preparation of the manuscript, analysis and formation of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

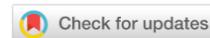
Поступила в редакцию / Received 01.10.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 14.10.2025

Принята к публикации / Accepted 28.10.2025

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 697.34; 004.9

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-37-43>

Повышение эффективности этапа проектирования жизненного цикла системы теплоснабжения строительного объекта

А.Л. Тихомиров Е.П. Лысова

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

a.tikhomirov@yandex.ru



EDN: WYGAXN

Аннотация

Введение. Система теплоснабжения является одним из важнейших инфраструктурных компонентов инженерного обеспечения строительного объекта. Однако процесс моделирования ее жизненного цикла, особенно в части информационного обеспечения, остается недостаточно исследованным в академической среде.

Одним из основных этапов жизненного цикла любой инженерной системы является проектирование. Необходимость повышения энергоэффективности, снижения затрат на проектирование и в последующем строительство систем центрального теплоснабжения, улучшения экологической ситуации подчеркивает особую актуальность внедрения инновационных технологий, в частности, искусственного интеллекта, который может стать эффективным инструментом решения существующих проблем. Цель исследования — повышение эффективности этапа проектирования систем централизованного отопления на основе применения искусственного интеллекта и оценка перспектив такого подхода.

Материалы и методы. Методология исследования включает сравнительный анализ, моделирование, статистическую обработку данных и экспертную оценку. Результаты исследования могут быть использованы при разработке новых подходов к проектированию систем теплоснабжения с применением современных цифровых технологий.

Результаты исследования. Предложенная авторами концепция управления жизненным циклом теплоснабжающих систем, включающая последовательную реализацию пяти ключевых этапов (от предпроектной подготовки до утилизации), позволяет обеспечить комплексный подход к оптимизации всех процессов. При этом критическое значение приобретает стадия проектирования, определяющая базовые параметры энергоэффективности, экономичности и надежности теплоснабжения. В контексте цифровизации теплоэнергетического проектирования особую актуальность приобретает интеграция интеллектуальных автоматизированных систем, реализующих многофакторное алгоритмическое моделирование и оптимизационные расчеты. Современные решения на базе искусственного интеллекта обеспечивают комплексную автоматизацию проектно-конструкторских работ, включая создание детализированных информационных моделей объектов, высокоточное прогнозирование теплопотребления, управление гидравлическими режимами и оптимизацию энергобаланса системы. Внедрение таких технологий не только компенсирует дефицит квалифицированных специалистов и повышает качество проектной документации, но и способствует существенной оптимизации эксплуатационных показателей: снижению топливных затрат и минимизации углеродного следа за счет рационального распределения энергетических ресурсов и сокращения выбросов парниковых газов.

Обсуждение и заключение. Рассмотрены современные подходы к автоматизированному проектированию систем централизованного теплоснабжения с использованием технологий искусственного интеллекта. Предложена методика, основанная на применении машинного обучения, нейронных сетей и оптимизационных алгоритмов для повышения эффективности проектирования, минимизации энергопотерь и снижения эксплуатационных затрат.

Ключевые слова: жизненный цикл, управление жизненным циклом, система теплоснабжения, централизованное теплоснабжение, строительный объект, искусственный интеллект, автоматизированное проектирование, машинное обучение, оптимизация, энергосбережение

Для цитирования. Тихомиров А.Л., Лысова Е.П. Повышение эффективности этапа проектирования жизненного цикла системы теплоснабжения строительного объекта. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):37–43. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-37-43>

Improving the Efficiency of the Design Stage of the Life Cycle of the Heat Supply System of a Construction Facility

Alexey L. Tikhomirov , Ekaterina P. Lysova 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 a.l.tikhomirov@yandex.ru

Abstract

Introduction. The heat supply system is one of the most important infrastructural components of the engineering support of the construction site. However, the process of modeling its life cycle, particularly in terms of information support, has not been sufficiently researched in the academia.

One of the main stages of the life cycle of any engineering system is design. The need to increase energy efficiency, reduce the cost of designing and, thereby, building central heating systems, and improve the environmental situation highlights the special urgency of introducing innovative technologies, in particular, artificial intelligence that can become an effective tool for solving the existing problems. The aim of the study is to increase the efficiency of the design stage of district heating systems based on the use of artificial intelligence and to assess the prospects for such an approach.

Materials and Methods. The research methodology includes comparative analysis, modeling, statistical data processing and expert assessment. The research results can be used in the development of new approaches to the design of heat supply systems using modern digital technologies.

Research Results. The proposed concept of life cycle management of heat supply systems, which includes the sequential implementation of five key stages (from pre-design preparation to disposal) allows for an integrated approach to optimizing all of the processes. At the same time, the design stage, which determines the basic parameters of energy efficiency, efficiency and reliability of heat supply, is of critical importance. In the context of digitalization of thermal power engineering, the integration of intelligent automated systems implementing multifactorial algorithmic modeling and optimization calculations is becoming particularly relevant. Modern artificial intelligence-based solutions provide comprehensive automation of design and engineering work, including creating detailed information models of facilities, high-precision forecasting of heat consumption, hydraulic control and optimization of the energy balance of the system. The introduction of such technologies not only compensates for the lack of qualified specialists and improves the quality of project documentation, but also contributes to significant optimization of operational performance: reducing fuel costs and minimizing the carbon footprint through rational allocation of energy resources and reduction in greenhouse gas emissions.

Discussion and Conclusion. The article discusses modern approaches to automated design of district heating systems using artificial intelligence technologies. A technique based on the use of machine learning, neural networks, and optimization algorithms is proposed to improve design efficiency, minimize energy loss, and reduce operating costs.

Keywords: life cycle, life cycle management, heat supply system, district heating, construction site, artificial intelligence, computer-aided design, machine learning, optimization, energy saving

For citation. Tikhomirov AL, Lysova EP. Improving the Efficiency of the Design Stage of the Life Cycle of the Heat Supply System of a Construction Facility. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):37–43. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-37-43>

Введение. Концепция комплексного управления жизненным циклом прочно входит в арсенал современных инструментов хозяйствования, выступая ключевым фактором оптимизации функционирования различных объектов — от отдельных изделий до масштабных проектов и сложных систем [1, 2]. Особенную значимую роль эта концепция играет в строительной индустрии, где она служит фундаментальной основой для организации эффективной эксплуатации и управления объектами недвижимости, прежде всего капитальными сооружениями различного назначения [3, 4].

Внедрение системного подхода в управлении жизненным циклом позволяет создать целостную систему регулирования и контроля на всех этапах существования объекта, начиная с проектной стадии и заканчивая этапом вывода из эксплуатации. Такой подход обеспечивает не только рациональное использование ресурсов на каждом этапе, но и способствует достижению оптимального баланса между эксплуатационными характеристиками, экономической эффективностью и технологическими параметрами объекта [1–3].

В контексте строительной отрасли данная концепция приобретает особую актуальность, поскольку позволяет учитывать специфику капитальных объектов, их долгосрочный характер использования и необходимость посто-

янного мониторинга технического состояния. При этом системный подход создает прочную основу для внедрения инновационных технологий, оптимизации затрат и повышения качества строительной продукции на всех этапах ее жизненного цикла [4].

В строительной индустрии инженерные системы выступают важнейшим компонентом инфраструктурного обеспечения зданий и сооружений, создавая оптимальные или допустимые параметры микроклимата и обеспечивая комфортность пребывания человека. Несмотря на критическую важность этих систем для эффективной эксплуатации строительных объектов, область моделирования их жизненного цикла, в том числе информационного, остается недостаточно исследованной в академической среде и в настоящее время представлена в научной литературе фрагментарно [5–7]. Это создает существенный пробел в развитии теоретических основ управления инженерными системами на протяжении всех этапов их функционирования.

Современные системы централизованного теплоснабжения должны учитывать множество факторов, таких как рост урбанизации, увеличение спроса на комфорт и возможность индивидуального управления микроклиматом. Традиционные методы проектирования и управления системами теплоснабжения часто не справляются с этими вызовами, что приводит к ошибкам при проектировании, неоправданным материальным затратам при строительстве, перерасходу энергии, увеличению теплопотерь и снижению надежности при эксплуатации.

Организации, осуществляющие проектирование систем теплоснабжения, сталкиваются с рядом трудностей, включая необходимость повышения энергоэффективности, снижения затрат на проектирование и строительство систем, улучшения экологической ситуации. Значительной проблемой последних лет стал дефицит специалистов-проектировщиков в области разработки полнообъемных информационных моделей систем теплоснабжения. Одним из ключевых инструментов для решения этих задач является использование искусственного интеллекта (ИИ).

В статье авторы исследуют возможность повышения эффективности этапа проектирования систем централизованного отопления на основе применения искусственного интеллекта, а также преимущества и перспективы такого подхода.

Материалы и методы. В рамках исследования был осуществлен комплексный анализ жизненного цикла системы теплоснабжения зданий и сооружений с использованием метода аналогий, сравнительного и системного синтеза. Детальное изучение этапов жизненного цикла, включая проектирование, монтаж, эксплуатацию и модернизацию, подтвердило возможность разработки адаптивного механизма управления системой на всех этапах ее существования.

Предметом исследования выступила система централизованного теплоснабжения, а главной целью стало изучение направлений использования искусственного интеллекта для полной автоматизации процесса проектирования — особо значимого этапа жизненного цикла, на котором закладывается энергоэффективность, экономичность, надежность и экологичность будущих систем теплоснабжения.

Применение технологий искусственного интеллекта позволит не только систематизировать накопленные научные и практические данные, но и выявить закономерности функционирования системы теплоснабжения, что откроет новые перспективы для оптимизации ее жизненного цикла и повышения энергоэффективности.

Результаты исследования. В современных условиях развития городской инфраструктуры системы централизованного теплоснабжения характеризуются значительным разнообразием конструктивных и технических решений. Постоянно расширяющаяся номенклатура основного и вспомогательного оборудования создает определенные сложности при выборе системы централизованного теплоснабжения. Это обуславливает необходимость тщательного учета многочисленных параметров и характеристик каждого элемента сложной инженерной структуры системы централизованного теплоснабжения. Особую актуальность приобретает задача разработки методологии выбора оптимальной системы централизованного теплоснабжения, способной обеспечить требуемый уровень эффективности, безопасности и экономической целесообразности при минимальных эксплуатационных затратах. Комплексный подход к решению данной задачи требует всестороннего анализа всех аспектов функционирования системы на протяжении всего жизненного цикла.

Методологически обоснованным представляется исследование жизненного цикла системы централизованного теплоснабжения через реализацию пяти последовательных этапов: предпроектной подготовки, проектирования, непосредственной эксплуатации, модернизации и утилизации (рис. 1).

Каждый из указанных этапов характеризуется стадиями реализации, определяющими текущее состояние системы, необходимый комплекс работ и ожидаемые результаты их выполнения. Анализ этапов позволяет сформировать целостное представление о функционировании системы централизованного теплоснабжения и разработать рекомендации по оптимизации ее работы в долгосрочной перспективе.

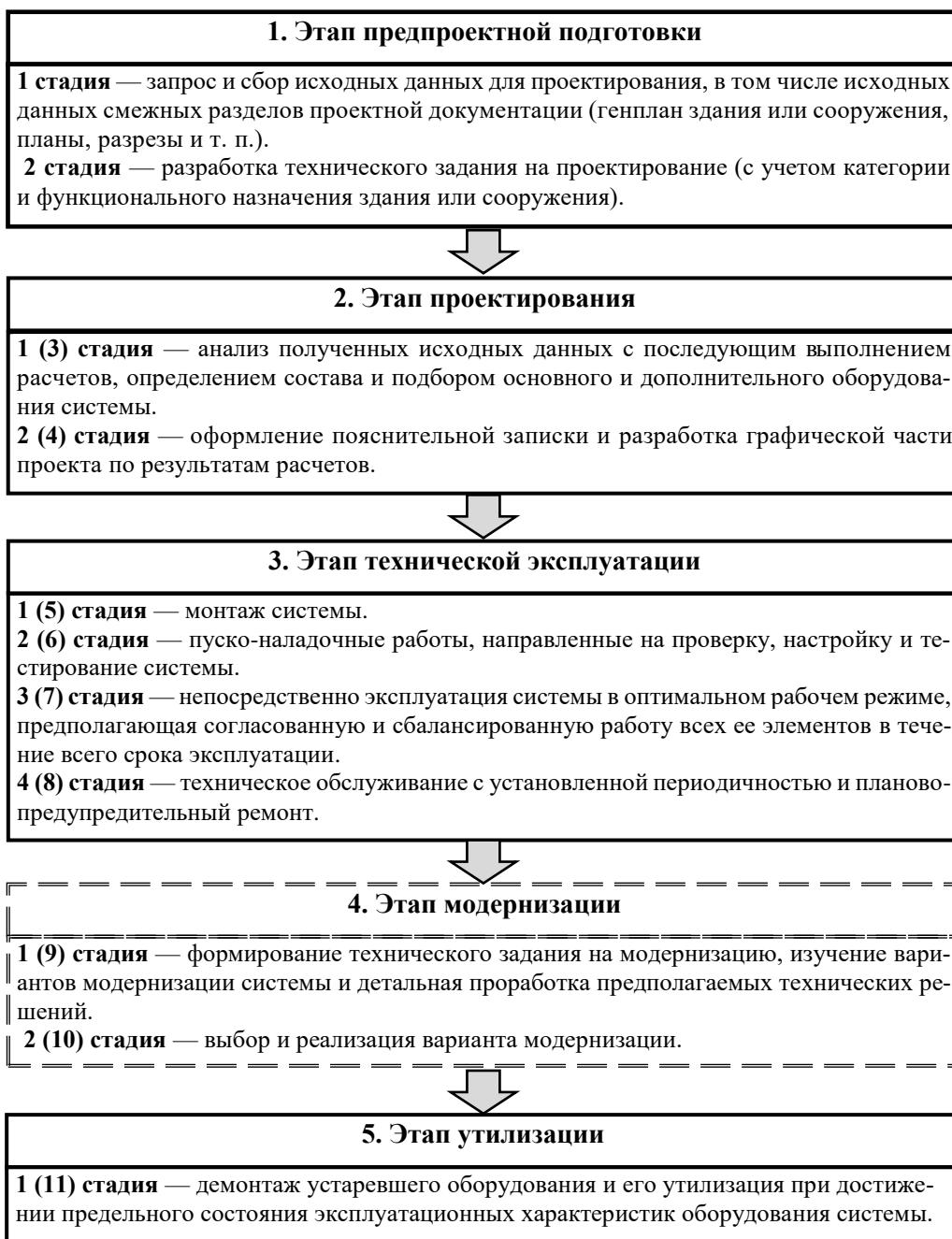


Рис. 1. Структура жизненного цикла системы центрального теплоснабжения строительного объекта

Этап проектирования систем централизованного теплоснабжения приобретает особую значимость, поскольку именно на этом этапе закладывается фундамент энергоэффективности и надежности будущих объектов теплоснабжения. Однако острый дефицит квалифицированных специалистов-проектировщиков, особенно в сфере разработки полнообъемных информационных моделей систем теплоснабжения, создает существенные риски для качества проектной документации и эффективности функционирования будущих систем отопления. Как следствие, происходит увеличение сроков проектирования, рост количества проектных ошибок и удорожание строительства из-за необходимости корректировок [8].

Цифровая трансформация проектирования выступает как стратегический инструмент повышения качества проектной документации и обеспечения надежности функционирования теплоэнергетических объектов [9–11]. Автоматизированные системы проектирования представляют собой комплекс программно-технических средств, реализующих алгоритмическое моделирование и оптимизацию проектных решений. Их внедрение позволяет нивелировать риски, связанные с дефицитом высококвалифицированных специалистов, и обеспечить требуемый уровень качества проектной документации. Основная задача автоматизированного проектирования заключается

в создании системы, способной анализировать входные данные (географические, климатические, технические) и генерировать оптимальные проектные решения с минимальным участием человека [12–14].

Искусственный интеллект предоставляет уникальные возможности для полной автоматизации процесса проектирования (разработки информационной модели) системы теплоснабжения на всех этапах [15–17]. С помощью искусственного интеллекта можно точно прогнозировать потребление теплоты, стабилизировать гидравлические режимы и минимизировать потери энергии. Это позволяет не только снизить затраты на топливо, но и улучшить экологическую ситуацию за счет уменьшения выбросов CO₂.

Автоматизация этапа проектирования в жизненном цикле системы централизованного теплоснабжения позволяет включить стадии, в течение которых осуществляют:

- разработку инженерной цифровой модели местности (инженерные изыскания);
- размещение потребителей теплоты на топоплане;
- нанесение магистральных и внутридворовых тепловых сетей на геодезической подоснове;
- разработку продольного профиля тепловых сетей;
- сбор и анализ данных (сбор данных о потреблении теплоты, колебаниях температуры и т.п.);
- проведение гидравлического расчета и разработку тепловых и гидравлических режимов системы;
- разработку математической модели (на основе собранных данных создают математическую модель, которая позволяет прогнозировать тепловые и гидравлические режимы с высокой степенью точности).

Использование в этапе проектирования систем централизованного теплоснабжения искусственного интеллекта добавляет новый элемент — машинное обучение для прогнозирования тепловых нагрузок.

Обучение искусственного интеллекта осуществляют в первую очередь на нормативных документах для установления технологических ограничений и лучших образцах проектных решений для развития оптимального «мышления» искусственного интеллекта.

Для точного прогнозирования тепловых нагрузок применимы:

- 1) методы регрессионного анализа и нейронные сети (например, LSTM-сети), которые способны учитывать временные ряды данных, такие как температура окружающей среды, историческое потребление тепла и социально-экономические факторы;
- 2) генетические алгоритмы для оптимизации конфигурации сети (позволяют находить оптимальную топологию тепловой сети, минимизируя длину трубопроводов, потери давления и стоимость строительства; при этом каждое решение кодируется в виде хромосомы, а процесс оптимизации включает скрещивание, мутацию и отбор наиболее эффективных вариантов);
- 3) нейросетевые модели для гидравлических расчётов (искусственные нейронные сети используют для моделирования гидравлических режимов в сложных разветвленных сетях; обучение сети проводится на основе данных, полученных из численных имитаций поведения сложных систем или процессов, что позволяет быстро оценивать параметры системы — давление, расход теплоносителя — при изменении условий эксплуатации);
- 4) интеграция с GIS-системами (для учета географических факторов (рельеф, расположение зданий, инфраструктура) предложено интегрировать систему проектирования с геоинформационными системами (GIS); это позволяет автоматически генерировать карты тепловых сетей и анализировать пространственные данные);
- 5) тестирование и оптимизация (разработанная система проходит тестирование на реальных данных, после чего производят ее оптимизацию для достижения максимальной эффективности);
- 6) валидация и верификация цифровой информационной модели системы теплоснабжения;
- 7) передача цифровой информационной модели системы теплоснабжения с применением XML-схем на следующий этап жизненного цикла системы.

Обсуждение и заключение. Внедрение автоматизированных систем проектирования является не просто технологическим трендом, а объективной необходимостью, обусловленной современными требованиями к энергоэффективности и надежности систем централизованного теплоснабжения. Цифровая трансформация проектирования создает предпосылки для формирования нового качества проектных решений, что в конечном итоге приводит к оптимизации капитальных вложений и эксплуатационных затрат на всех этапах жизненного цикла теплоэнергетических объектов.

Применение искусственного интеллекта в проектировании систем теплоснабжения предоставляет ряд значительных преимуществ:

- снижение дефицита квалифицированных инженеров-проектировщиков;
- резкое снижение затрат времени на проектирование с одновременным ростом качества проектов;
- возможность использования разработанной цифровой информационной модели системы теплоснабжения на последующих этапах жизненного цикла системы.

Проектирование системы теплоснабжения с использованием искусственного интеллекта является перспективным направлением, которое позволяет значительно повысить эффективность управления теплоэнергетическими процессами. Внедрение таких систем способствует экономии энергии, улучшению экологической ситуации и созданию комфортной среды для проживания граждан. В будущем ожидается дальнейшее развитие и совершенствование подобных технологий, что сделает их еще более востребованными в сфере теплоэнергетики.

Список литературы/References

1. Жданов В.Ю. Новый взгляд на этапы жизненного цикла организаций. *Московский экономический журнал*. 2021;6:378–388. URL: <https://gclnk.com/W9hQ7Iaa> (дата обращения 12.09.2025).
2. Zhdanov VYu A New Look at the Stages of the Organization's Life Cycle. *Moscow Economic Journal*. 2021;6:378–388. (In Russ.) URL: <https://gclnk.com/W9hQ7Iaa> (accessed: 12.09.2025)
3. Агибалова В.Г., Баша И.В., Суббота А.В., Вассуф Ф.С. Особенности управления организацией с учетом стадий жизненного цикла. *Естественно-гуманитарные исследования*. 2023;5(49):367–370. URL: <https://academyadt.ru/online-zhurnal-estestvenno-gumanitarnye-issledovaniya-egi-49/> (дата обращения 12.09.2025).
Agibalova VG, Basha IV, Subbota AV, Wassuf FS Features of Organization Management Taking into Account the Stages of the Life Cycle. *Natural Sciences and Humanities Research*. 2023;5(49):367-370. (In Russ.) URL: <https://academyadt.ru/online-zhurnal-estestvenno-gumanitarnye-issledovaniya-egi-49/> (accessed: 12.09.2025).
4. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцева И.А., Воронов В.А. Управление жизненным циклом устойчивого состояния объекта строительства. *Эксперт: теория и практика*. 2023;3(22):131–137. http://doi.org/10.51608/26867818_2023_3_131
Fedosov SV, Fedoseev VN, Zayceva IA, Voronov VA Life Cycle Management of the Steady State of the Construction Object. *Expert: Theory and Practice*. 2023;3(22):131–137. (In Russ.) http://doi.org/10.51608/26867818_2023_3_131
5. Топчий Д.В. Организационно-технические решения по обеспечению качества строительно-монтажных работ на различных этапах жизненного цикла объекта строительства. *Вестник МГСУ*. 2023;18(2):283–292. <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.2.283-292>
Topchiy DV Organizational and Technical Solutions to Ensure the Quality of Construction and Installation Works at Various Stages of the Life Cycle of a Construction Project. *Bulletin of MGSU*. 2023;18(2):283–292. (In Russ.) <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.2.283-292>
6. Беспалов В.И., Гурова О.С., Лысова Е.П., Гришин Г.С. Анализ жизненного цикла парогазотурбинных ТЭЦ. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2022;1(4):32–43. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-32-43>
Bespakov VI, Gurova OS, Lysova EP, Grishin GS Life Cycle of Analysis of Steam and Gas Turbine CHP Plants. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;1(4):32–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-32-43>
7. Тихомиров А.Л., Пирожникова А.П. Формирование принципов количественного регулирования параметров системы теплоснабжения на основе анализа ее жизненного цикла. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(2):29–35. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-29-35>
Tikhomirov AL, Pirozhnikova AP Creating Quantitative Regulation Principles of the Heating Networks' Parameters Based on the Life Cycle Analysis. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(2):29–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-29-35>
8. Тихомиров А.Л., Пирожникова А.П. Разработка информационной модели системы теплоснабжения на различных этапах ее жизненного цикла. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2022;1(3):35–42. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-35-42>
Tikhomirov AL, Pirozhnikova AP Development of an Information Model of a Heat Supply System at Various Stages of the Life Cycle. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;1(3):35–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-35-42>
9. Новицкий Н.Н. Методические проблемы интеллектуализации трубопроводных систем и направления развития теории гидравлических цепей для их решения. В: *Труды XIV Всероссийского научного семинара «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем»*. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН; 2014. С. 301–318.
Novitsky NN Methodological Problems of Intellectualization of Pipeline Systems and Directions of Development of the Hydraulic Circuit Theory for their Solution. Proceedings of the 14th All-Russian Scientific Seminar. Melentiev Energy Systems Research Institute SB RAS "Mathematical Models and Methods of Analysis and Optimal Synthesis of Developing Pipeline and Hydraulic Systems". Irkutsk: Publishing House of the Melentiev Energy Systems Research Institute SB RAS; 2014. pp. 301–318. (In Russ.)

10. Stennikov V.A., Baraktenko E.A., Sokolov D.V. Determination of optimal parameters of heating systems based on advanced information technologies. *Energy Systems Research*. 2018;1(1):84–93. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.01.0010>
11. Vesterlund M., Toffolo A., Dahl J. Optimization of multi-source complex district heating network, a case study. *Energy*. 2017;126:53–63. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.018>
12. Guelpa E., Sciacovelli A., Verda V. Thermo-fluid dynamic model of large district heating networks for the analysis of primary energy savings. *Energy*. 2019;184:34–44. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.177>
13. Новицкий Н.Н. Развитие теории гидравлических цепей для решения задач управления функционированием теплоснабжающих систем. *Теплоэнергетика*. 2009;12:38–43.
- Novitsky NN Development of the Hydraulic Circuit Theory for Solving the Problems of Controlling the Functioning of Heat Supply Systems. *Thermal Power Engineering*. 2009;12:38–43. (In Russ.)
14. Vesterlund M., Dahl J. A method for the simulation and optimization of district heating systems with meshed networks. *Energy conversion and management*. 2015;89:555–567. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.002>
15. Jie P., Tian Z., Yuan S., Zhu N. Modeling the dynamic characteristics of a district heating network. *Energy*. 2012;39(1):126–134. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.055>
16. Chertkov M., Novitsky N. N. Thermal transients in district heating systems. *Energy*. 2019;184:22–33. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.049>
17. Lazzaretto A., Toffolo A., Morandin M., von Spakovsky M.R. Criteria for the decomposition of energy systems in local/global optimizations. *Energy*. 2010;35(2):1157–1163. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.009>
18. Nardo A.D., Cavallo A., Natale M.D., Greco R., Santonastaso G.F. Dynamic control of water distribution system based on network partitioning. *Procedia engineering*. 2016;154:1275–1282. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.460>

Об авторах:

Тихомиров Алексей Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, климатехники и альтернативных энергоустановок Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), a.l.tikhomirov@yandex.ru

Лысова Екатерина Петровна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, климатехники и альтернативных энергоустановок Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), katerina.lysova0803@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

А.Л. Тихомиров: формирование основной концепции, анализ результатов исследований, корректировка выводов, графическое оформление, доработка текста.

Е.П. Лысова: цели и задачи исследования, анализ результатов исследований, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Alexey L. Tikhomirov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Climate Engineering and Alternative Energy Installations at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), a.l.tikhomirov@yandex.ru

Ekaterina P. Lysova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Climate Engineering and Alternative Energy Installations at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), katerina.lysova0803@gmail.com

Claimed Contributorship:

AL Tikhomirov: formation of the basic concept, analysis of the research results, correction of the conclusions, graphic design, revision of the manuscript.

EP Lysova: aims of the study, analysis of the research results, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 29.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 12.10.2025

Принята к публикации / Accepted 02.11.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.04

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-44-52>

Оригинальное эмпирическое исследование

Прогнозирование несущей способности трубобетонных колонн квадратного сечения при помощи методов машинного обучения

Т.Н. Кондратьева А.С. Чепурненко

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[✉ ktn618@yandex.ru](mailto:ktn618@yandex.ru)



EDN: BCUPRW

Аннотация

Введение. В данной работе рассматривается задача прогнозирования прочности центрально сжатых коротких трубобетонных колонн квадратного сечения с использованием методов машинного обучения. Традиционные методы, такие как метод конечных элементов и теоретико-экспериментальный подход с подбором эмпирических формул, требуют значительных вычислительных ресурсов и времени. В то же время эти методы не всегда способны учитывать сложные нелинейные зависимости между параметрами. Основная цель — разработка высокоточной модели, способной предсказывать несущую способность колонн на основе ключевых параметров.

Материалы и методы. Для исследования была сгенерирована база данных, состоящая из результатов численных экспериментов по расчету несущей способности трубобетонных колонн квадратного поперечного сечения в физически нелинейной постановке. В рамках проведенного исследования построены модели на основе методов машинного обучения, реализованные с использованием интерактивной вычислительной платформы Jupyter Notebook. Основным методом является механизм CatBoost (Gradient Boosting Regressor). Обучение построенных моделей произведено с использованием методов нелинейной оптимизации.

Результаты исследования. В статье проведена оценка степени влияния каждого входного параметра на итоговые предсказания модели. Получены результаты по величине степени влияния для моделей CatBoost и Random Forrest Regressor (RFR). Оценка качества построенных моделей по величине R^2 составила 98 % для CatBoost и 94 % — для RFR.

Обсуждение и заключение. Разработанный подход демонстрирует высокую эффективность в задаче прогнозирования несущей способности трубобетонных колонн, обеспечивая баланс между точностью результатов и вычислительной сложностью.

Ключевые слова: трубобетонные колонны, методы машинного обучения, прогнозирование, несущая способность, искусственный интеллект, искусственные нейронные сети.

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования: Кондратьева Т.Н., Чепурненко А.С. Прогнозирование несущей способности трубобетонных колонн квадратного сечения при помощи методов машинного обучения. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):44–52. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-44-52>

Predicting the Load-Bearing Capacity of Square-Section Pipe-Concrete Columns Using Machine Learning Methods

Tatiana N. Kondratieva , Anton S. Chepurnenko 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 ktn618@yandex.ru

Abstract

Introduction. In this paper, we consider the problem of predicting the strength of square-section centrally compressed short concrete-filled tubular columns using machine learning methods. Traditional methods, such as the finite element method and the theoretical-experimental approach involving selection of empirical formulas require significant computational resources and time. At the same time, these methods are not always capable of accounting for complex nonlinear dependencies between the parameters. The key objective is to develop a high-precision model capable of predicting the load-bearing capacity of columns using the major parameters.

Materials and Methods. For the current study, a database was generated containing the results of numerical experiments on calculating the load-bearing capacity of square-section concrete-filled tubular columns in a physically nonlinear formulation. As part of the study, models based on machine learning methods were designed and implemented using the Jupyter Notebook interactive computing platform. The main method is the CatBoost mechanism (Gradient Boosting Regressor). The resulting models were trained by means of nonlinear optimization methods.

Results. The article evaluates the degree of impact of each of the input parameters on the final predictions of the model. The results on the degree of impact for the CatBoost and Random Forrest Regressor (RFR) models are obtained. The quality of the resulting models evaluated using the R^2 value was 98% for CatBoost and 94% for RFR.

Discussion and Conclusions. The resulting approach has proved to be highly efficient in predicting the load-bearing capacity of concrete-filled tubular columns, providing a balance between the accuracy of the results and computational complexity.

Keywords: concrete-filled tubular columns, machine learning methods, prediction, load-bearing capacity, artificial intelligence, artificial neural networks

Acknowledgements. The authors appreciate the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions helped to significantly improve the quality of the project.

For citation: Kondratieva TN, Chepurnenko AS. Predicting the Load-Bearing Capacity of Square-Section Pipe-Concrete Columns Using Machine Learning Methods. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):44–52. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-44-52>

Введение. Оценка технического состояния монолитных железобетонных конструкций в настоящее время остается актуальной и востребованной задачей, особенно с учетом необходимости обеспечения их долговечности и безопасности. Решение такого рода задач можно реализовать не только аналитическими и расчетными методами [1–3], но и более современными хорошо зарекомендовавшими себя методами искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) [4–6].

Широко применяемый метод конечных элементов (МКЭ) позволяет учитывать сложные физические процессы, такие как нелинейное поведение материалов, взаимодействие стали и бетона [7], а также влияние различных нагрузок [8]. Однако основным недостатком МКЭ является высокая вычислительная сложность и необходимость в большом количестве параметров для калибровки модели.

Методы МО представляют собой современный инструмент анализа данных, который позволяет выявлять сложные нелинейные зависимости между входными и выходными параметрами [9–11]. В отличие от эмпирических формул машинное обучение позволяет автоматически находить закономерности в больших объемах данных, что делает его более универсальным и эффективным методом прогнозирования.

В работе [12] авторы исследуют образование дефектов в железобетонных конструкциях алгоритмами искусственного интеллекта, такими как случайный лес (RF), метод опорных векторов (SVM), дерево решений (CART) и адаптивное усиление (Gradient Boosting).

В современной практике при прогнозировании прочности железобетонных конструкций все чаще активно используют сверточные нейронные сети (CNN) [13–15]. Например, в работе [13] авторами разработана CNN, способная к двумерному полномасштабному прогнозированию образования трещин на ранних этапах и описа-

нию всего процесса разрушения. Модель, способная предсказывать как инициирование трещин, так и их распространение, предложена в работе [14]. Для мониторинга состояния железобетонных конструкций на сложных объектах строительства авторы статьи [15] используют нейронную сеть полностью сверточного типа (FCN) для сегментации изображений и локализации трещин на бетонных поверхностях с учетом неоднородности свойств бетона. Разработанная FCN-модель минимизирует ложноположительные и ложноотрицательные результаты, обладает высоким качеством, что позволяет сегментировать мелкие и сложные трещины.

В статье [16] разработан автоматизированный классификатор, в функционал которого входит автоматическое определение и классификация трещин в железобетонных колоннах различного уровня сложности методами глубокой CNN (DCNN). Предложенная DCNN-модель анализирует сложные текстуры и шумы, показывает высокую точность при детекции трещин, составляющую 96 %, за счет глубины слоев модели и расширения каждого слоя параллельным образом.

Авторы работы [17] для прогнозирования трещин во времени продвинулись дальше в своих исследованиях и построили гибридную модель объединив DCNN и рекуррентные нейронные сети (RNN).

Таким образом, алгоритмы МО, несомненно, обладают рядом преимуществ, таких как выявление шаблонов в больших объемах данных, обнаружение скрытых закономерностей и зависимостей с учетом многомерности данных, автоматический анализ оценки состояния железобетонных конструкций на основе ключевых параметров, оптимизация алгоритмов МО и параллельные вычисления.

Однако указанные алгоритмы МО все еще имеют недостатки, такие как неточность или слабость, ограниченная способность к обобщению и работа на низкой скорости [18, 19]. Одним из ключевых недостатков является зависимость моделей машинного обучения от качества обучающих данных и их объема.

При обучении большинства моделей искусственного интеллекта для прогнозирования прочности трубобетонных колонн используются данные натурных экспериментов [20–22]. Такие эксперименты, как правило, проводятся на образцах с относительно небольшими по сравнению с реальными конструкциями размерами поперечного сечения. С учетом плохой способности методов машинного обучения к экстраполяции данных при прогнозировании несущей способности реальных конструкций возможны большие погрешности. Выходом из этой ситуации является использование комбинированного подхода, когда данные для обучения формируются путем конечно-элементного расчета конструкций с реальными размерами по методике, прошедшей валидацию на экспериментальных данных.

Целью данного исследования является разработка моделей машинного обучения для прогнозирования прочности центрально сжатых трубобетонных колонн квадратного сечения с использованием данных, полученных описанным выше путем.

Материалы и методы. Для исследования была сгенерирована база данных, представляющая собой результаты численных экспериментов по расчету несущей способности коротких трубобетонных колонн квадратного поперечного сечения по методике, описанной в работе [23]. Эти данные были использованы для разработки и анализа моделей, сочетающих традиционные методы строительной механики и алгоритмы машинного обучения.

Входные параметры, описывающие основные геометрические и физико-механические характеристики колонн, сгенерированы с равномерным шагом в диапазонах, характерных для реальных конструкций, что позволило охватить широкий спектр возможных комбинаций.

Ключевые параметры: a — наружный размер поперечного сечения колонны, мм; t — толщина стенки стальной квадратной трубы, мм; R_y — предел текучести стали, МПа; R_b — прочность бетона при сжатии, МПа.

Выходным параметром является несущая способность трубобетонных колонн N_{ult} , кН. Этот показатель был получен в результате численных экспериментов, выполненных по методике, приведенной в работе [24]. Расчеты учитывали сложное взаимодействие стальной трубы и бетонного сердечника, включая совместную работу материалов и их деформационное поведение.

В таблице 1 частично представлен анализируемый массив данных. Общий объем обучающей выборки составил 22 308 экземпляров.

Для улучшения качества моделей была проведена предобработка данных: нормализация, разделение данных и кросс-валидация. Значения каждого параметра были масштабированы в диапазоне (0–1) для предотвращения доминирования признаков с большими значениями. Сгенерированные данные были разделены на тренировочные (80 %) и тестовые (20 %) массивы для обучения моделей и их оценки.

Для анализа данных и построения моделей прогнозирования прочности центрально сжатых трубобетонных колонн квадратного сечения использовались следующие алгоритмы машинного обучения: Линейная регрессия (Linear Regression), решающее дерево (Decision Tree), градиентный бустинг (Gradient Boosting, XGBoost), регрессор случайного леса (Random Forest Regressor, RFR).

Таблица 1

Таблица сгенерированных данных

№	a , мм	t , мм	R_y , МПа	R_b , МПа	N_{ult} , кН
1	100	3,00	220	10	349,71
2	100	3,45	220	10	385,27
3	100	3,91	220	10	420,72
4	100	4,36	220	10	455,76
5	100	4,82	220	10	490,38
6	100	5,27	220	10	524,59
7	100	5,27	220	10	524,59
8	100	5,73	220	10	558,38
9	100	6,18	220	10	591,76
10	100	6,64	220	10	625,31
11	100	7,09	220	10	657,89
...
22299	500	10,55	840	120	44248,28
22300	500	11,82	840	120	45887,56
22301	500	13,09	840	120	47511,10
22302	500	14,36	840	120	49118,97
22303	500	15,64	840	120	50759,78
22304	500	16,91	840	120	52338,05
22305	500	18,18	840	120	53900,79
22306	500	19,45	840	120	55501,41
22307	500	20,73	840	120	57089,77
22308	500	22,00	840	120	58609,37

При нормализации параметров был применен метод регуляризации, при оптимизации — метод Optuna, при подборе гиперпараметров — GridSearchCV, RandomizedSearchCV. Диапазон значений параметров для модели CatBoost составил: iterations — 1000–1500; depth — 4–8; learning_rate — 0,1–0,6; l2 reg_lambda — 1,9–4,9. Для RFR: n_estimators — 100–250; max_depth — 10–20; min_samples_leaf — 1–4. Поскольку в модели RFR отсутствует опция слежения за итерациями, обучение модели возможно с разным количеством деревьев и анализом среднеквадратичной ошибки (MSE). При малом количестве деревьев модель RFR недообучена и показывает низкую оценку качества, при увеличении количества деревьев оценка MSE стабилизируется, и оценка качества модели становится доверительной.

Для обученных моделей также проводился анализ важности признаков путем оценки степени влияния каждого входного параметра на итоговые предсказания модели. Данный подход позволил определить, насколько сильно изменяются результаты предсказания при изменении значений конкретного признака.

Результаты исследования. Статистические характеристики исходного набора данных приведены в виде таблицы (таблица 2). Основные показатели: размер выборки, среднее выборочное, рассеяние вариант, экстремумы значений переменных. Совокупность данных показателей помогает провести статистический анализ переменных, определить их разброс относительно своего центра, показать асимметричность распределения, вывести законы распределения данных вариационных рядов.

Таблица 2

Таблица статистических характеристик

Параметр	a , мм	t , мм	R_y , МПа	R_b , МПа	N_{ult} , кН
Количество	22308	22308	22308	22308	22308
Среднее	253,85	9,92	530,00	65,0	10564,50
Стандартное отклонение	128,40	5,06	196,07	34,3	10419,09
min	100,00	3,00	220,00	10,0	349,71
max	500,00	22,00	840,00	120,0	58609,37

На рис. 1 показана корреляция между параметрами модели. Наблюдается сильная корреляция ($0,6 \leq |\rho| \leq 0,9$) между параметрами: наружным размером поперечного сечения колонны и толщиной стенки стальной квадратной трубы ($\rho_{a/t} = 0,7$); наружным размером поперечного сечения колонны и несущей способностью трубобетонных колонн ($\rho_{a/N_{ult}} = 0,88$); толщиной стенки стальной квадратной трубы и несущей способностью трубобетонных колонн ($\rho_{t/N_{ult}} = 0,73$).

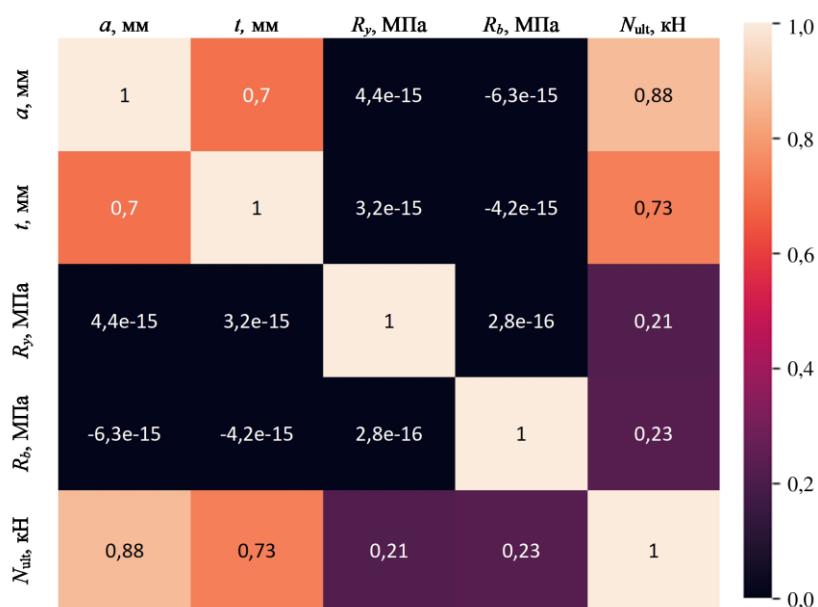


Рис. 1. Корреляционная матрица

В ходе исследования основное внимание было уделено алгоритму градиентного бустинга CatBoost, который показал наилучшие результаты среди протестированных алгоритмов ($R^2 = 0,98$).

Наиболее значимым параметром модели CatBoost является наружный размер поперечного сечения колонны, его значимость составляет — 96 %, доля влияния прочности бетона при сжатии составила — 33 %, предела текучести стали — 28 %, толщины стенки стальной квадратной трубы — 20 %. Наиболее значимые параметры модели RFR и их степени важности распределились следующим образом: наружный размер поперечного сечения колонны — 92 %, прочность бетона при сжатии — 21 %, предел текучести стали — 17 %, толщина стенки стальной квадратной трубы — 14 %. Значимость факторов влияния по обеим моделям совпадает, количественная оценка вклада каждого признака наглядно представлена на рис. 2 и 3 соответственно.

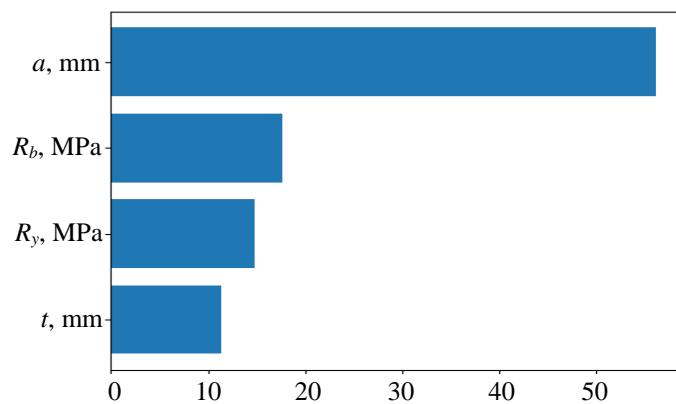


Рис. 2. Оценка важности признаков для CatBoost

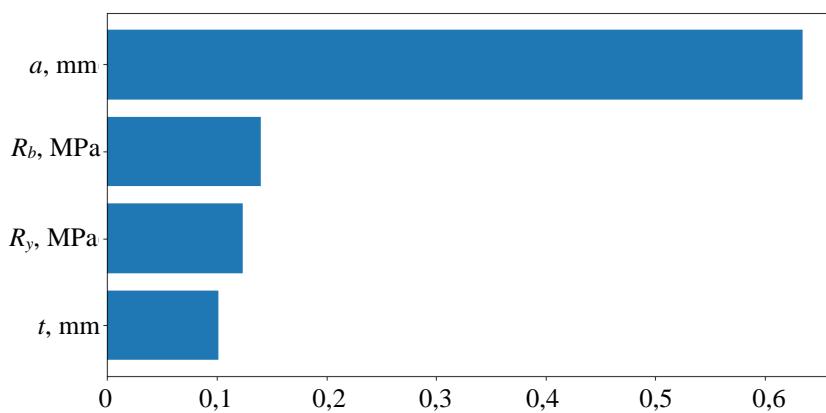


Рис. 3. Оценка важности признаков для RFR

Полученные оптимальные значения параметров в процессе обучения моделей представлены в таблице 3.

Таблица 3

Оптимальные значения параметров моделей

Модель	Параметр	Значение
CatBoost	Iterations (число итераций)	1500
	Depth (глубина обучения)	5
	Learning rate (скорость обучения)	0,4
	L2 leaf reg (L2-регуляризация для предотвращения переобучения)	2,8
RFR	N estimators (количество деревьев в ансамбле)	180
	Max depth (максимальная глубина деревьев)	6
	Min samples leaf (минимальное число образцов в листе дерева)	1

Оценка качества моделей представлена в таблице 4.

Таблица 4

Метрики качества модели

Метрика/Модель	CatBoost	RFR
MAE	3,1	7,8
MSE	5,4	4,5
MAPE, %	0,015	0,007
R^2	0,98	0,94

На рис. 4, 5 представлены гистограммы ошибок: по оси ординат фактические значения, по оси абсцисс — предсказанные.

Обсуждение и заключение. Данная работа представляет разносторонний взгляд на существующие методы прогнозирования прочности трубобетонных колонн и подчеркивает преимущества применения машинного обучения в данной области.

Использование методов машинного обучения, в частности CatBoost, позволило выявить точные зависимости между параметрами, превосходя традиционные эмпирические методы. Достоверность прогнозирования по величине R^2 для модели, основанной на алгоритме CatBoost, составила 0,98. Модель, основанная на методе Random Forest Regressor, показала меньшую точность ($R^2 = 0,94$).

Анализ значимости признаков показал, что наружный размер поперечного сечения трубобетонной колонны является ключевым параметром, оказывающим наибольшее влияние на ее несущую способность.

В дальнейших исследованиях планируется расширить спектр параметров модели, основываясь на текущих результатах с учётом дополнительных факторов. В качестве дополнительных параметров могут выступать эксцентрикситет продольной силы, гибкость элемента, доля длительных нагрузок в суммарной нагрузке и другие.

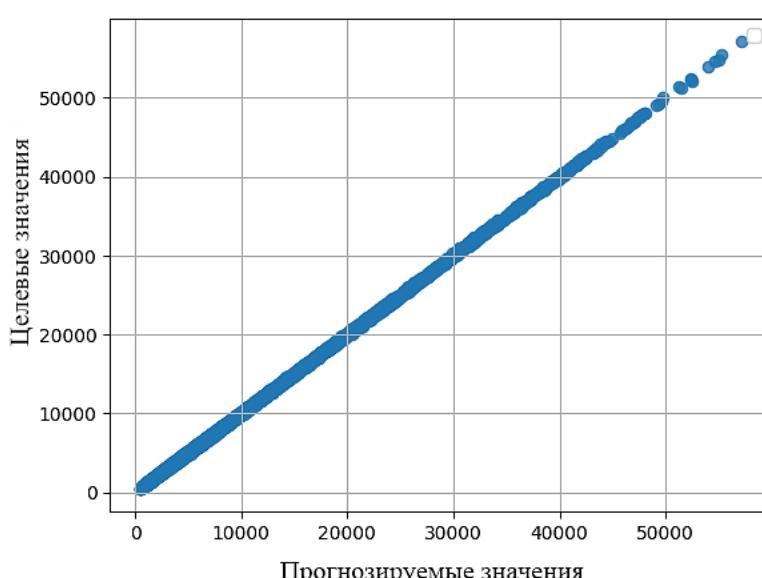


Рис. 4. Гистограмма ошибок для CatBoost

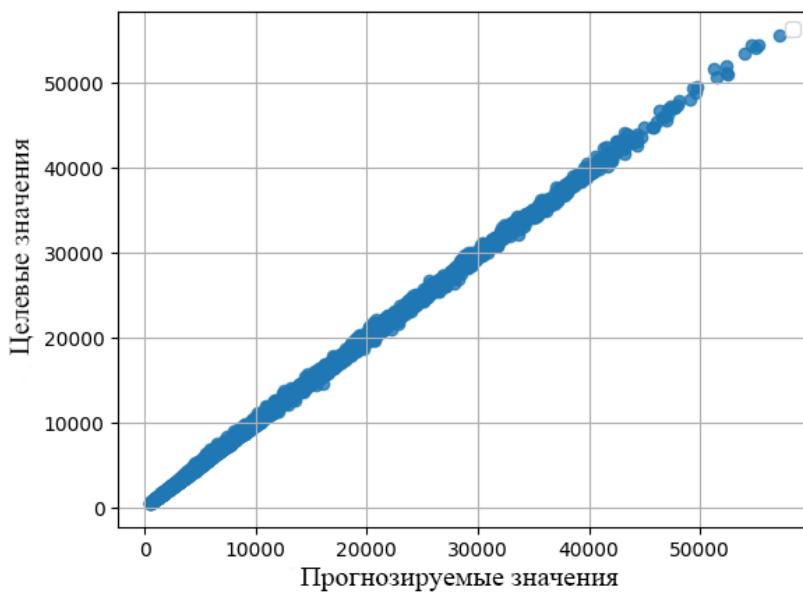


Рис. 5. Гистограмма ошибок для RFR

Список литературы/References

1. Abd-El-Nabi E, El-Helloty A, Summra A. Numerical analysis of reinforced concrete buildings subjected to blast load. *Structural Concrete*. 2023;24(3):3727–3743. <https://doi.org/10.1002/suco.202200726>
2. Jianguo Ning, Fanlin Meng, Tianbao Ma, Xiangzhao Xu. Failure analysis of reinforced concrete slab under impact loading using a novel numerical method. *International Journal of Impact Engineering*. 2020;144:103647. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103647>
3. Kumar V, Kartik KV, Iqbal MA. Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading. *Engineering Structures*. 2020;(206):110125. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110125>
4. Beskopylny AN, Stel'makh SA, Shcherban' EM, Mailyan LR, Meskhi B, Razveeva I. et al. Prediction of the Compressive Strength of Vibrocentrifuged Concrete Using Machine Learning Methods. *Buildings*. 2024;14(377). <https://doi.org/10.3390/buildings14020377>
5. Beskopylny AN, Stel'makh SA, Shcherban' EM, Razveeva I, Kozhakin A, Kondratieva TN et al. Prediction of the Properties of Vibro-Centrifuged Variotropic Concrete in Aggressive Environments Using Machine Learning Methods. *Buildings* 2024;(14):1198. <https://doi.org/10.3390/buildings14051198>
6. Kondratieva TN, Chepurnenko AS. Prediction of Rheological Parameters of Polymers by Machine Learning Methods. *Advanced Engineering Research*. 2024;24(1):36–47. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-36-47>
7. Klemczak B, Źmij A. Insight into thermal stress distribution and required reinforcement reducing early-age cracking in mass foundation slabs. *Materials*. 2021;14(3):477. <https://doi.org/10.3390/ma14030477>
8. Talaat M, Yehia E, Mazek SA, Genidi M, Sherif A. Finite element analysis of RC buildings subjected to blast loading. *Ain Shams engineering journal*. 2022;13(4):101689. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101689>
9. Chepurnenko AS, Kondratieva TN, Deberdeev TR, Akopyan VF, Avakov AA. Prediction of Rheological Parameters of Polymers Using the CatBoost Gradient Boosting Algorithm. *Polymer Science, Series D*. 2024;17(1):121–128. <https://doi.org/10.1134/S199542122370020X>
10. Kondratieva TN, Chepurnenko AS, Poliakova KA, Rodionov KA. CatBoost algorithms to predict the load-bearing capacity of centrally compressed short CFST columns of circular cross-section. *E3S Web Conf*. 2024;583:06009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458306009>
11. Chepurnenko AS, Kondratieva TN, Al-Wali E. Processing of Polymers Stress Relaxation Curves Using Machine Learning Methods. *Baghdad Science Journal*. 2023;20(6):2488–2488. <https://doi.org/10.21123/bsj.2023.8819>
12. Althoey F, Amin MN, Khan K, Usman MM, Khan MA. Machine learning based computational approach for crack width detection of self-healing concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;(17):e01610. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01610>

13. Koopas RN, Rezaei S, Rauter N, Ostwald R, Lammering R. A spatiotemporal deep learning framework for prediction of crack dynamics in heterogeneous solids: Efficient mapping of concrete microstructures to its fracture properties. *Engineering Fracture Mechanics*. 2025;(314):110675. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110675>
14. Ali R, Chuah JH, Talip M, Mokhtar N, Shoaib MA. Structural crack detection using deep convolutional neural networks. *Automation in Construction*. 2022;(133):103989. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103989>
15. Xinyu Ye, Tao Jin, Li ZX, Chen Pengyu, Ma Si Yuan, Yi Ding, Yihong Ou. Structural crack detection from benchmark data sets using pruned fully convolutional networks. *Journal of Structural Engineering*. 2021;147(11):04721008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003140](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003140)
16. Wang Weidong, Hu Wenbo, Wang Wenjuan, Xu Xinyue, Wang Mengdi, Shi Youyin et al. Automated crack severity level detection and classification for ballastless track slab using deep convolutional neural network. *Automation in Construction*. 2021;(124):103484. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103484>
17. Ganesh Kolappan Geetha, Hyun-Jung Yang, Sung-Han Sim. Fast detection of missing thin propagating cracks during deep-learning-based concrete crack/non-crack classification. *Sensors*. 2023;23(3):1419. <https://doi.org/10.3390/s23031419>
18. Qijun Chen, Yuxi Xie, Yu Ao, Tiange Li, Guorong Chen, Shaofei Ren et al. A deep neural network inverse solution to recover pre-crash impact data of car collisions. *Transportation research part C: emerging technologies*. 2021;(126):103009. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103009>
19. Guorong Chen, Tiange Li, Qijun Chen, Shaofei Ren, Chao Wang, Shaofan Li. Application of deep learning neural network to identify collision load conditions based on permanent plastic deformation of shell structures. *Computational Mechanics*. 2019;(64):435–449. <https://doi.org/10.1007/s00466-019-01706-2>
20. Viet-Linh Tran, Duc-Kien Thai, Duy-Duan Nguyen. Practical artificial neural network tool for predicting the axial compression capacity of circular concrete-filled steel tube columns with ultra-high-strength concrete. *Thin-Walled Structures*. 2020;(151):106720. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106720>
21. Cigdem Avci-Karatas. Artificial neural network (ANN) based prediction of ultimate axial load capacity of concrete-filled steel tube columns (CFSTCs). *International Journal of Steel Structures*. 2022;22(5):1341–1358. <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00645-8>
22. Abidhan Bardhan, Rahul Biswas, Navid Kardani, Mudassir Iqbal, Pijush Samui, Singh M.P. et al. A novel integrated approach of augmented grey wolf optimizer and ANN for estimating axial load carrying-capacity of concrete-filled steel tube columns. *Construction and Building Materials*. 2022;(337):127454. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127454>
23. Chepurnenko AS, Yazyev BM, Turina VS, Akopyan VF. Artificial intelligence models for determining the strength of centrally compressed pipe-concrete columns with square cross-section. *Magazine of Civil Engineering*. 2024;17(6):13008. <https://doi.org/10.34910/MCE.130.8>
24. Chepurnenko A, Yazyev B, Meskhi B, Beskopylny A, Khashkhozhev K, Chepurnenko V. Simplified 2D finite element model for calculation of the bearing capacity of eccentrically compressed concrete-filled steel tubular columns. *Applied Sciences*. 2021;11(24):11645. <https://doi.org/10.3390/app112411645>

Об авторах:

Кондратьева Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики и информатики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), ktn618@yandex.ru

Чепурненко Антон Сергеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительной механики и теории сооружений Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), anton_chepurnenk@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Т.Н. Кондратьева: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, анализ результатов исследований;

А.С. Чепурненко: научное руководство доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Tatiana N. Kondratieva, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mathematics and Computer Science at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), ktn618@yandex.ru

Anton S. Chepurnenko, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Structural Mechanics and Theory of Structures at the Don State Technical University, (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), anton_chepurnenko@mail.ru

Claimed contributorship:

TN Kondratieva: formation of the basic concept, objectives of the study, calculations, analysis of the research results.

AS Chepurnenko: scientific supervision, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

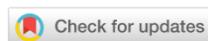
Поступила в редакцию / Received 06.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 01.09.2025

Принята к публикации / Accepted 07.09.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 69.07

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-53-60>

Нейросетевое моделирование прочности нормальных сечений сборных железобетонных ребристых плит

В.И. Римшин^{1,2} , С.В. Усанов³ , А.Н. Выдрин², А.Е. Керн⁴, Е.С. Макарова⁴

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация



EDN: RZMZDC

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Российская Федерация

³ Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация

⁴ Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Российская Федерация

v.rimshin@niis.ru

Аннотация

Введение. Сборные железобетонные ребристые плиты получили широкое применение в качестве перекрытий и покрытий зданий промышленного, жилого и общественного назначения. Их использование в данном качестве обусловлено высокой технологичностью изготовления, эффективным использованием бетона и возможностью автоматизации производства на заводах. Одной из важных задач при проектировании таких конструкций является расчет несущей способности нормальных сечений. Традиционные методы расчёта являются надежными, но морально устарели. Сейчас в инженерной практике всё чаще применяются методы машинного обучения, где исследователи делают выбор в пользу искусственных нейронных сетей (ИНС). Использование традиционных методов при обработке структурированных данных, таких как таблицы и базы данных, имеет свои ограничения. Нейросети способны анализировать неструктурированные данные, такие как текст, изображения и видео, что открывает новые возможности для анализа и понимания информации. В статье предложен подход к нейросетевому моделированию несущей способности нормальных сечений сборных железобетонных ребристых плит.

Материалы и методы. Структурированный и обработанный массив данных (датасет) включает 20 образцов, для которых разработана и верифицирована расчётная модель на основе многослойного персептрона. Входными параметрами служат геометрические и физико-механические характеристики плит и величины приложенных нагрузок, выходной параметр — предельный изгибающий момент, вычисленный по методу предельных состояний.

Результаты исследования. Обучение на ограниченной выборке не привело к переобучению модели благодаря корректному разделению данных на тестовую, обучающую и контрольную партии и использованию квазиньютоновского метода оптимизации. Модель продемонстрировала высокую точность и надёжность. Искусственные нейронные сети успешно выявляют нелинейные зависимости между параметрами без априорных допущений.

Обсуждение и заключение. Предложенная модель не заменяет существующие расчёты, но служит эффективным цифровым инструментом для быстрой проверки проектных решений, оптимизации армирования и повышения надёжности конструкций. Её внедрение в системы BIM и цифровые платформы строительства соответствует требованиям Индустрии 4.0 и создает новые возможности для проектирования сборных железобетонных конструкций.

Ключевые слова: ребристая железобетонная плита перекрытия, изгибающие элементы, искусственные нейронные сети, машинное обучение

Для цитирования. Римшин В.И., Усанов С.В., Выдрин А.Н., Керн А.Е., Макарова Е.С. Нейросетевое моделирование прочности нормальных сечений сборных железобетонных ребристых плит. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):53–60. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-53-60>

Neural Network Modeling of the Strength of Normal Sections of Prefabricated Reinforced Concrete Ribbed Slabs

Vladimir I. Rimshin^{1, 2} , Sergey V. Usanov³ , Aleksey N. Vydrin², Anna E. Kern⁴, Elizaveta S. Makarova⁴

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

² Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russian Federation

³ Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

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

 v.rimhin@niisfr.ru

Abstract

Introduction. Precast reinforced concrete ribbed slabs are broadly used as floors and coverings for industrial, residential and public buildings. Their use in this capacity is due to the high technological efficiency of manufacturing, efficient use of concrete and the possibility of automating factory production. One of the critical tasks in designing such structures is to calculate the bearing capacity of normal cross sections. Traditional calculation methods are reliable, but they are outdated. Machine learning methods are increasingly being employed in engineering, where researchers are opting for artificial neural networks (ANNs). The use of traditional methods in processing structured data such as tables and databases has its limitations. Neural networks are capable of analyzing unstructured data such as text, images, and videos, which opens up new prospects for analyzing and comprehending information. The article sets forth an approach to neural network modeling of the bearing capacity of normal sections of prefabricated reinforced concrete ribbed slabs.

Materials and Methods. A structured and processed data array (dataset) includes 20 samples for which a computational model based on a multilayer perceptron has been developed and verified. The input parameters are the geometric as well as physical and mechanical characteristics of the slabs and the applied load, the output parameter is the limiting bending moment calculated using the limit state method.

Research Results. Training on a limited sample did not lead to retraining of the model due to the correct division of data into test, training and control batches and the use of the quasi-Newton optimization method. The model has displayed a high level accuracy and reliability. Artificial neural networks are capable of identifying nonlinear dependencies between the parameters with no a priori assumptions.

Discussion and Conclusion. The suggested model is not a substitute for the existing calculations, but it serves as an efficient digital tool for quick verification of design solutions, optimization of reinforcement and improvement of structural reliability. Its implementation into BIM systems and digital construction platforms is in compliance with the requirements of Industry 4.0 and creates new opportunities for designing prefabricated reinforced concrete structures.

Keywords: ribbed reinforced concrete floor slab, bendable elements, artificial neural networks, machine learning

For citation. Rimshin VI, Usanov SV, Vydrin AN, Kern AE, Makarova ES. Neural Network Modeling of the Strength of Normal Sections of Prefabricated Reinforced Concrete Ribbed Slabs. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):53–60. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-53-60>

Введение. В современном промышленном и гражданском строительстве сборные железобетонные ребристые плиты остаются одним из востребованных решений для устройства перекрытий и покрытий зданий благодаря сочетанию экономичности, надёжности и технологичности. Их применение оправдано высокой степенью заводской готовности, налаженностью массового серийного производства, оптимальной формой поперечного сечения, минимизирующей расход бетона при обеспечении необходимой несущей способности и деформативности.

Расчёт прочности нормальных сечений ребристых плит является неотъемлемой частью расчетов по I группе предельных состояний. Традиционные методы расчёта, приведенные в СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», являются надежными и хорошо зарекомендовали себя, но в последние два десятилетия в инженерной практике всё чаще применяются методы машинного обучения. Чаще всего исследователи делают выбор в пользу искусственных нейронных сетей (ИНС). Преимущество ИНС заключается в способности выявлять скрытые нелинейные зависимости между множеством входных параметров и целевой переменной. В отличие от аналитических моделей, ИНС не требуют априорного задания функциональных зависимостей, что делает их особенно ценными, в частности, для определения несущей способности строительных конструкций. Вопросы информационного моделирования в расчете строительных конструкций и применения искусственного интеллекта в данной области были рассмотрены в российской [1–8] и зарубежной [9–16] технической литературе.

Целью настоящей статьи является разработка и верификация нейросетевой модели для прогнозирования несущей способности нормальных сечений сборных железобетонных ребристых плит.

Материалы и методы. Объектами исследования служили 20 ребристых плит шириной приведенного сечения от 1460 до 1150 мм, рабочей высотой от 370 до 240 мм и пролетом от 4550 до 8100 мм. Более подробные сведения о датасете приведены в таблице 1.

Таблица 1
Характеристики ребристых железобетонных плит

№ п/п	b_f , мм	h_0 , мм	b , мм	l_0 , мм	q , кН/м	R_b , МПа	R_s , МПа	A_{sp} , см ²	M_{ult} , кНм
1	1460	370	150	6250	16,95	17	695	4,40	124,15
2	1160	370	185	7080	19,60	17	870	6,08	147,39
3	1160	344	185	7900	11,93	22	1215	2,49	111,70
4	1150	270	150	5675	18,15	17	520	5,88	87,70
5	1360	344	185	8100	18,66	22	1300	4,51	214,25
6	1360	344	185	8100	17,40	17	1300	2,27	94,54
7	1450	240	150	5400	16,90	17	1250	2,88	92,40
8	1450	270	150	7050	16,89	17	1390	3,23	157,42
9	1450	270	150	4700	11,31	17	1390	1,15	46,84
10	1360	260	185	4690	17,54	22	1130	2,12	67,52
11	1460	370	150	6200	17,05	17	690	4,50	128,20
12	1160	370	185	7050	19,30	17	880	5,98	145,10
13	1160	344	185	7850	11,53	22	1190	2,53	115,10
14	1150	270	150	5700	18,25	17	530	6,05	90,30
15	1360	344	185	8000	18,82	22	1300	4,61	220,10
16	1360	350	185	8050	17,00	17	1250	2,05	93,38
17	1450	240	150	5350	16,50	17	1250	2,72	90,50
18	1450	270	150	7000	16,68	17	1390	3,18	156,10
19	1450	270	150	4750	11,33	17	1390	1,19	49,92
20	1360	260	185	4550	17,24	22	1130	1,95	65,23

Для каждой плиты приведены следующие параметры: приведенная ширина полки b_f (x_1), рабочая высота h_0 (x_2), приведенная ширина ребра b (x_3), расчетный пролет l_0 (x_4), величина приложенной равномерно распределенной нагрузки q (x_5), приизменная прочность бетона R_b (x_6), предел текучести стальной арматуры R_s (x_7), площадь сечения преднапряжённой арматуры A_{sp} (x_8) и значение предельного изгибающего момента M_{ult} (y). Последняя величина в дальнейшем будет являться результатом прогноза нейросетевой модели. Предельные изгибающие моменты вычислены по методу предельных состояний.

Для построения нейросетевой модели использовался программный комплекс STATISTICA 14.0 с модулем Neural Networks, обеспечивающим реализацию архитектуры в виде многослойного персептрона с обратным распространением ошибки. Создание нейронной сети в виде многослойного персептрона обусловлено спецификой поставленной задачи. Искусственная нейронная сеть включает в себя три слоя. Входной слой состоял из 8 приведенных выше независимых переменных. Число нейронов в скрытом слое изменялось от 1 до 20. После прохождения скрытого слоя сигнал, преобразовываясь на каждом этапе с помощью соответствующих функций активации, поступал в выходной слой, содержащий единственную зависимую переменную — M_{ult} (y). Каждый из нейронов скрытого и выходного слоя соединен со всеми нейронами предыдущего слоя.

Размер датасета позволил получить оптимальное соотношение обучающей, тестовой и контрольной выборки в процентном выражении 70, 15 и 15 соответственно. Количество эпох (циклов обучения) равно 1000 (рис. 1). Для обработки поступающих сигналов на каждом этапе были испробованы все функции активации (рис. 2).

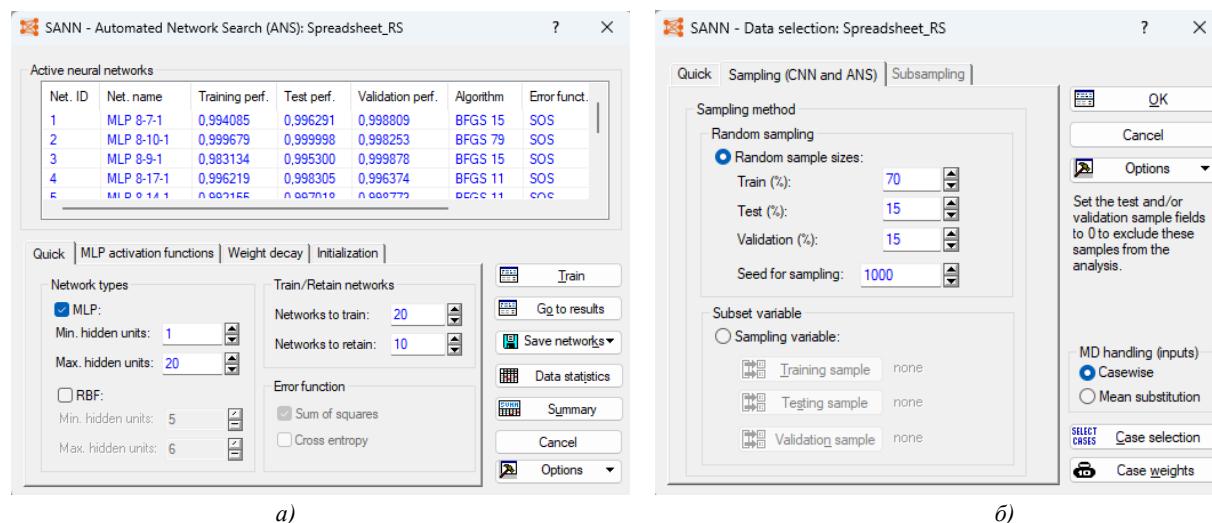
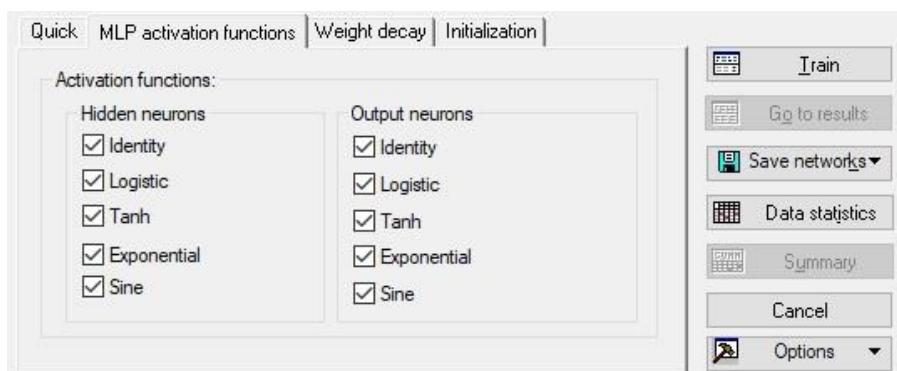
Рис. 1. Характеристики нейросетевой модели: *а* — для случайной выборки; *б* — для скрытого слоя и обучения ИНС

Рис. 2. Выбранные функции активации скрытого и выходного слоя нейронов

Алгоритм Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (BFGS) представляет собой один из наиболее эффективных методов квазиньютоновской оптимизации, применяемый для обучения искусственных нейронных сетей. Функция потерь с весовыми коэффициентами минимизируется итеративно. В рамках настоящего исследования данный алгоритм использовался для адаптивного обновления параметров сети на основе аппроксимации обратной матрицы Гессе, что позволяет учитывать вторые производные функции ошибки без явного их вычисления. В качестве целевой функции была принята сумма квадратов отклонений (Sum of Squares, SOS), определяемая по формуле (1):

$$E(w_{ij}) = \sum_{i=1}^m (y_i - y'_i)^2, \quad (1)$$

где y_i — выходное значение i -го нейрона выходного слоя; y'_i — требуемое значение i -го нейрона выходного слоя.

Обучение проводилось итеративно, то есть на каждом этапе (эпохе) на вход последовательно подавались все наблюдения, а результирующие значения сопоставлялись с целевыми и рассчитывалась соответствующая величина ошибки. В программе STATISTICA итоги расчета представляются в табличной форме. Точность результатов нейросетевого прогнозирования оценивалась сопоставлением результатов созданной модели с опытными величинами и вычислялась по формуле (2):

$$\delta = \frac{y_{i\text{инс}} - y_i}{y_i} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $y_{i\text{инс}}$ — значение разрушающего изгибающего момента, полученное при прогнозировании с помощью ИНС в i -ом испытании; y_i — фактическое значение разрушающего изгибающего момента в i -ом испытании.

Были протестированы 10 архитектур MLP с количеством скрытых слоев от 2 до 19 (рис. 3 и 4). Наилучшие результаты продемонстрировала нейронная сеть с архитектурой MLP 8-9-1, выделенная зеленой рамкой.

Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
MLP 8-7-1	0,994085	0,996291	0,998809	10,62153	16,48046	9,93623	BFGS 15	SOS	Logistic	Identity
MLP 8-10-1	0,999679	0,999998	0,998253	0,69092	0,0/326	15,304/8	BFGS 19	SOS	Tanh	Tanh
MLP 8-9-1	0,983134	0,995300	0,999878	31,72447	12,67781	58,40971	BFGS 15	SOS	Identity	Tanh
MLP 8-17-1	0,996219	0,998305	0,996374	6,83131	18,37588	20,66575	BFGS 11	SOS	Tanh	Identity
MLP 8-14-1	0,992155	0,997018	0,998773	13,76911	21,46851	20,28928	BFGS 11	SOS	Identity	Identity
MLP 8-13-1	0,984357	0,998660	0,999682	28,98711	6,83088	53,70908	BFGS 21	SOS	Tanh	Tanh
MLP 8-11-1	0,992339	0,997115	0,999887	13,50086	16,44569	11,82677	BFGS 11	SOS	Tanh	Identity
MLP 8-19-1	0,995462	0,996490	0,998304	8,10334	15,24956	9,80945	BFGS 11	SOS	Logistic	Identity
MLP 8-9-1	0,998522	0,997551	0,998666	2,71952	7,02600	9,66670	BFGS 34	SOS	Tanh	Exponential
MLP 8-2-1	0,999066	0,998745	0,998871	1,76863	4,50505	4,40192	BFGS 58	SOS	Logistic	Exponential

Рис. 3. Характеристики полученных ИНС

Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
MLP 8-9-1	0,983134	0,995300	0,999878	31,72447	12,67781	58,40971	BFGS 15	SOS	Identity	Tanh

Рис. 4. Характеристики наилучшей ИНС

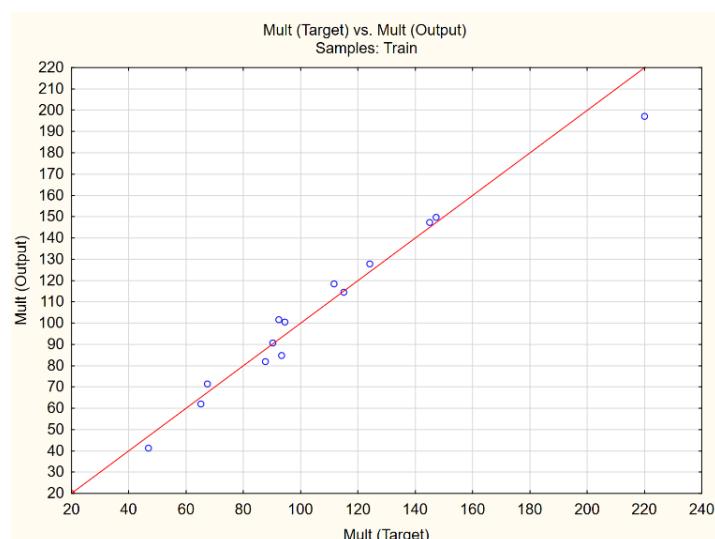
Значения предельного изгибающего момента по данным расчета и прогноза выбранной ИНС иллюстрирует таблица 2. Также в таблице можно видеть принадлежность каждого случая к обучающей либо тестовой партиям.

Таблица 2

Результаты прогнозирования для выбранной ИНС

Case name	M_{ult}	Mult - Output 3. MLP 8-9-1
	Target	
1	124,1500	127,8000
2	147,3900	149,7304
3	111,7000	118,3796
4	87,7000	81,9504
6	94,5400	100,3477
7	92,4000	101,5405
9	46,8400	41,1607
10	67,5200	71,4283
12	145,1000	147,2489
13	115,1000	114,5124
14	90,3000	90,6634
15	220,1000	196,9605
16	93,3800	84,6343
20	65,2300	62,0702

Величина рассчитанной по формуле (2) усредненной относительной погрешности MLP 8-10-1 равна 5,6 %. По графику (рис. 6) видно, что точность работы полученной модели высокая, модель успешно справляется с поставленной задачей. Легко заметить, что только один случай несколько удален от диагонали, представляющей собой идеальное место расположения точек прогноза. Остальные значения, предсказанные моделью, лишь незначительно отклоняются от диагонали.

Рис. 6. Зависимость между фактическим и прогнозными значениями M_{ult}

Выбранная ИНС «научилась» учитывать имеющиеся неявные зависимости между всеми параметрами. Она не просто «запоминает» данные, а обнаруживает физически обоснованные закономерности. Нейросетевая модель

не использует никаких предположений и допущений (о форме эпюры напряжений и пр.), только обучаются на реальных данных. При этом с увеличением размеров датасета следует ожидать существенного повышения точности работы предлагаемой модели.

Отдельно отметим, что не только точность модели является ее преимуществом, но и время расчета всеми известными методами, включая численное моделирование, уступает нейронным сетям. Это дает дополнительные аргументы в пользу дальнейшего внедрения ИНС в состав проектных работ.

Результаты исследования. Полученные результаты подтверждают, что искусственные нейронные сети являются новым обоснованным подходом к определению несущей способности изгибаемых элементов, являются эффективным методом решения задачи. Усредненные значения отношений фактических и расчетных разрушающих изгибающих моментов и коэффициентов их вариации получилось равным 0,993 и 0,069 соответственно. Несмотря на высокую точность, на сегодняшний день ИНС не заменяет другие методы расчета конструкций, но может быть рекомендована как дополнительный цифровой инструмент для проверки проектных решений, оптимизации армирования железобетонных элементов и повышения надежности конструкций.

Обсуждение и заключение. Разработанная модель может быть интегрирована в системы BIM, что соответствует стратегии Индустрии 4.0. Успешное применение ИНС в строительной отрасли — это естественный этап эволюции инженерной науки. Дальнейшим шагом может быть разработка открытого API для доступа к модели в рамках цифровой платформы.

Список литературы/References

1. Римшин В.И., Анпилов С.М., Усанов С.В. Применение когнитивных технологий для прогнозирования прочности тонких стенок двутавровых балок. *Эксперт: теория и практика*. 2024;1(24):42–52. https://doi.org/10.51608/26867818_2024_1_42
2. Rimshin VI, Anpilov SM, Usanov SV Application of Cognitive Technologies to Predict the Strength of Thin Walls of I-Beams. *Expert: Theory and Practice*. 2024;1(24):42–52. (In Russ.) https://doi.org/10.51608/26867818_2024_1_42
2. Римшин В.И., Соловьев А.К., Сулейманова Л.А., Амелин П.А. Нейросетевое прогнозирование физико-механических характеристик композитных материалов используемых для усиления строительных конструкций. *Эксперт: теория и практика*. 2023;4(23):101–107. https://doi.org/10.51608/26867818_2023_4_101
2. Rimshin VI, Solovyov AK, Suleymanova LA, Amelin PA Neural Network Forecasting of Physical and Mechanical Characteristics of Composite Materials Used to Strengthen Building Structures. *Expert: Theory and Practice*. 2023;4(23):101–107. (In Russ.) https://doi.org/10.51608/26867818_2023_4_101
3. Тарасов И.В. Индустрія 4.0: понятіє, концепції, тенденції розвитку. *Стратегії бізнеса*. 2018;6(50):43–49. <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2018-5-43-49>
4. Tarasov IV. INDUSTRY 4.0: Concept & Development. *Business Strategies*. 2018;6(50):43–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2018-5-43-49>
4. Римшин В.И., Усанов С.В. Нейросетевое моделирование прочности нормальных сечений балок с жесткой композитной арматурой. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2025;7(799):5–15. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-799-7-5-15>
4. Rimshin VI, Usanov SV Neural Network Modeling of the Strength of Normal Cross-Sections of Beams with Rigid Composite Reinforcement. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2025;7(799):5–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-799-7-5-15>
5. Римшин В.И., Усанов С.В., Воробьев А.Е., Савельев Е.С. Восстановление несущей способности железобетонных плит перекрытия на примере многоэтажного гражданского здания. *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2025;6(1090):46–48. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82379614> (дата обращения: 21.10.2025).
5. Rimshin VI, Usanov SV, Vorobev AE, Savelyev ES Restoration of the Bearing Capacity of Reinforced Concrete Floor Slabs on the Example of a Multi-Storey Civil Building. *BST: Bulletin of the Construction Equipment*. 2025;6(1090):46–48. (In Russ.) <https://elibrary.ru/item.asp?id=82379614> (accessed: 21.10.2025)
6. Римшин В.И., Усанов С.В., Воробьев А.Е., Савельев Е.С. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния балок с жесткой композитной арматурой. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2025;1(33):63–73. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.4.63>
6. Rimshin VI, Usanov SV, Vorobev AE, Savelev ES Numerical Simulation of the Stress-Strain State of Beams with Rigid Composite Reinforcement. *Vestnik of Volga Tech. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2025;1(33):63–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.4.63>

7. Римшин В.И., Анпилов С.М., Рошина С.И., Усанов С.В. Практические подходы к устранению коллизий в информационных моделях зданий. *Эксперт: теория и практика*. 2024;3(26):87–94. https://doi.org/10.51608/26867818_2024_3_87

Rimshin VI, Anpilov SM, Usanov SV Practical Approaches to Eliminating Collisions in Information Models of Buildings. *Expert: Theory and Practice*. 2024;1(24):42–52. (In Russ.) https://doi.org/10.51608/26867818_2024_3_87

8. Курбатов В.Л., Римшин В.И., Шубин И.Л., Волкова С.В. *Информационное моделирование и искусственный интеллект в современном строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве*, 2-е издание, переработанное. Москва: Издательский дом АСВ; 2025. <https://elibrary.ru/item.asp?id=82433619> (дата обращения: 21.10.2025).

Kurbatov VL, Rimshin VI, Shubin IL, Volkova SV *Information Modeling and Artificial Intelligence in Modern Construction and Housing and Communal Services* (2nd edition, revised) Moscow: Publishing House ASV; 2025. (In Russ.) <https://elibrary.ru/item.asp?id=82433619>. (accessed: 21.08.2025)

9. Perera R., Barchin M., Arteaga A., Diego A. Prediction of the ultimate strength of reinforced concrete beams FRP-strengthened in shear using neural networks. *Composites. Part B: Engineering*. 2010;41:287–298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.03.003>

10. Peng F., Wenyuan X., Weichen X. Database Evaluation of Shear Strength of Slender Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Concrete Members. *ACI Structural Journal*. 2020;117(3):273–282. <http://dx.doi.org/10.14359/51723504>

11. Estep D.D. *Bending and Shear Behavior of Pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Beams with Closed and Open Sections*. West Virginia University; 2014. 545 p. <https://doi.org/10.33915/etd.545>

12. Lagaros N.D. Artificial Neural Networks Applied in Civil Engineering. *Applied Sciences*. 2023;13(2):1131. <https://doi.org/10.3390/app13021131>

13. Afrifa R.O., Adom-Asamoah M., Owusu-Ansah E. Artificial neural network model for low strength RC beam shear capacity. *Journal of Science and Technology*. 2012;32(2):119–132. <http://dx.doi.org/10.4314/just.v32i2.13>

14. Ahmad A., Cotsovos D.M., Lagaros N.D. Framework for the development of artificial neural networks for predicting the load carrying capacity of RC members. *SN Applied Sciences*. 2020;2:545. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2353-8>

15. Mansour M.Y., Dicleli M., Lee J.Y., Zhang J. Predicting the shear strength of reinforced concrete beams using artificial neural networks. *Engineering Structures*. 2004;426:781–799. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.01.011>

16. Imam A., Anifowose F., Azad A.K. Residual Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams Using an Adaptive Model Based on ANN. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2015;9(2):159–172. <http://dx.doi.org/10.1007/s40069-015-0097-4>

Об авторах:

Римшин Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры жилищно-коммунального комплекса Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское шоссе, 26), заведующий лабораторией мониторинга жилищно-коммунального хозяйства и радиационной безопасности в строительстве Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, Российская Федерация, г. Москва, Локомотивный проезд, 21), [ResearchID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), v.rimshin@niisf.ru

Усанов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Кубанского государственного технологического университета (350042, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), [ResearchID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), svusanov@gmail.com

Выдрин Алексей Николаевич, аспирант лаборатории мониторинга жилищно-коммунального хозяйства и радиационной безопасности в строительстве Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, Российская Федерация, г. Москва, Локомотивный проезд, 21), [AuthorID](#), aleksey-vydrin@yandex.ru

Керн Анна Евгеньевна, студент Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) (630008, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113), [AuthorID](#), a.kern@sibstrin.ru

Макарова Елизавета Сергеевна, студент Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) (630008, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113), makarova_elizaveta_s@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В.И. Римшин: научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, итоговые выводы.

С.В. Усанов: написание исходного текста, построение и анализ моделей, редактирование статьи.

А.Н. Выдрин: подготовка текста, сбор и обработка данных.

А.Е. Керн: сбор и обработка данных.

Е.С. Макарова: сбор и обработка данных.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Vladimir I. Rimshin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Housing and Utilities Sector at the National Research Moscow State University of Civil Engineering (26 Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation), Head of the Laboratory for Monitoring Housing and Utilities Sector and Radiation Safety in Construction at the Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21 Lokomotivniy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation), [ResearchID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), v.rimshin@niisf.ru

Sergey V. Usanov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor at the Department of Building Structures, Kuban State Technological University (2 Moskovskaya Str., Krasnodar, 350042, Russian Federation), [ResearchID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), svusanov@gmail.com

Aleksey N. Vydrin, PhD student at the Laboratory for Monitoring Housing and Utilities Sector and Radiation Safety in Construction at the Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21 Lokomotivniy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation), [AuthorID](#), aleksey-vydrin@yandex.ru

Anna E. Kern, student of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (113 Leningradskaya Str., Novosibirsk, 630008, Russian Federation), [AuthorID](#), a.kern@sibstrin.ru

Elizaveta S. Makarova, student of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (113 Leningradskaya Str., Novosibirsk, 630008, Russian Federation), makarova_elizaveta_s@mail.ru

Claimed Contributorship:

VI Rimshin: scientific supervision, research concept, development of the methodology, final conclusions.

SV Usanov: writing the original manuscript, designing and analyzing the models, editing the manuscript.

AN Vydrin: preparation of the manuscript, collection and processing of the data.

AE Kern: collection and processing of the data.

ES Makarova: collection and processing of the data.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 07.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 19.09.2025

Принята к публикации / Accepted 08.10.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 694.02

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-61-68>

Адгезивная прочность kleевого соединения древесины с арматурой из отработанных полотен ленточных пил

Д.О. Мясников , В.А. Репин , С.И. Рошина

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация

daniil.miasnikov.96@mail.ru



EDN: UBYKLB

Аннотация

Введение. В связи с высокими объемами производства пиломатериалов в Российской Федерации возникает проблема по утилизации отработанных полотен ленточных пил (ОПЛП), срок службы которых составляет 20–500 часов. Одним из способов её решения является использование ОПЛП в качестве материала для армирования элементов из древесины. Такое решение способствует снижению стоимости «в деле» таких конструкций за счёт удешевления армирующего материала. Настоящая работа посвящена исследованию адгезионной прочности kleевого соединения ОПЛП с древесиной.

Материалы и методы. Исследования адгезионной прочности kleевого соединения «древесина–арматура» представляли собой сравнительный анализ результатов испытания образцов с включением ОПЛП, а также стержней стальной и композитной арматуры. Армирующие элементы были вклеены в заготовки из древесины сосны с применением kleевой композиции на основе эпоксидной смолы ЭД-20 (отвердитель — полиэтиленполиамин, наполнитель — кварцевый песок, пластификатор — дибутилфталат). Испытания выполнялись на выдергивание с помощью машины РЭМ-100 при скорости 5 мм/мин. Статистическая обработка результатов эксперимента включала расчет среднего значения разрушающей нагрузки для каждой группы образцов, а также дисперсии, стандартного отклонения и коэффициента вариации.

Результаты исследования. Деревянные образцы с вклесенными ОПЛП показали высокую прочность соединения «древесина–арматура», близкую к образцам со стальной арматурой с разницей значений около 4 % и значительно превышающую прочность образцов с композитной арматурой — до 20%.

Обсуждение и заключение. Клеевое соединение древесины с армирующими элементами из ОПЛП обладает достаточно высокой адгезионной прочностью, близкой к прочности образцов со стальной арматурой. Таким образом, использование ОПЛП в качестве материала для армирования деревянных элементов и конструкций является целесообразным и эффективным способом повышения эксплуатационных качеств несущих конструкций из древесины. Кроме того, такое решение позволит решить проблему по утилизации ОПЛП, а также несколько снизить стоимость армированных деревянных конструкций (АДК) «в деле» за счёт низкой стоимости армирующего материала.

Ключевые слова: отработанные ленточные пилы, армирование древесины, адгезивная прочность, эпоксидный клей, деревянные конструкции, утилизация отходов

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи. Авторы благодарят руководство лаборатории за предоставленное оборудование для испытаний.

Для цитирования: Мясников Д.О., Репин В.А., Рошина С.И. Адгезивная прочность kleевого соединения древесины с арматурой из отработанных полотен ленточных пил. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):61–68. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-61-68>

Adhesive Strength of Wood Glue Joints with a Reinforcement Made from Used Band Saw Blades

Daniil O. Myasnikov , Vladimir A. Repin , Svetlana I. Roshchina 

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation

 daniil.miasnikov.96@mail.ru

Abstract

Introduction. Due to the high volumes of lumber production in the Russian Federation, there is an issue of recycling used band saw blades (UBSB) with a service life of 20–500 hours. A way to tackle the problem at hand is to make use of UBSB as a reinforcement material for wood elements. This solution also contributes to a reduction in the cost of such structures by making a reinforcement material more affordable to purchase. This study focuses on investigating the adhesive strength of a UBSB-wood bond.

Materials and Methods. Studies of the adhesive strength of a “wood-reinforcement” adhesive joint have been a comparative analysis of the test results of samples with the inclusion of UBSB, as well as rods of a steel and composite reinforcement. Reinforcement elements were glued into pine wood blanks with an adhesive composition based on epoxy resin ED-20 (a hardener is polyethylene polyamine, a filler is quartz sand, a plasticizer is dibutyl phthalate). The tests were conducted by means of pulling out using the REM-100 machine at a speed of 5 mm/min. Statistical processing of the experimental results included the calculation of the average value of the destructive load for each group of the samples, as well as the variance, standard deviation, and coefficient of variation.

Research Results. The wooden samples with glued reinforcement bars showed a high strength of the wood–reinforcement joint which was close to the samples with a steel reinforcement with a difference of about 4% and was considerably beyond the strength of the samples with a composite reinforcement — up to 20%.

Discussion and Conclusion. The adhesive joint of wood with reinforcing elements made of reinforced concrete has a sufficiently high adhesive strength which was close to that of the samples with a steel reinforcement. Hence the use of UBSB as a material for reinforcing wooden elements and structures is an appropriate and efficient way of enhancing the performance of load-bearing structures made of wood. On top of that, such a solution would tackle the problem of the disposal of reinforced concrete, as well as to a degree reduce the cost of reinforced wooden structures (RWSs) "in action" due to the low cost of a reinforcing material.

Keywords: used band saws, wood reinforcement, adhesive strength, epoxy glue, wooden structures, waste disposal

Acknowledgment. The authors would like to thank the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions for their improvement contributed to a significant improvement in the quality of this article. The authors would like to thank the laboratory management for the testing equipment provided.

For citation: Myasnikov DO, Repin VA, Roshchina SI. Adhesive Strength of Wood Glue Joints with a Reinforcement Made from Used Band Saw Blades. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):61–68. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-61-68>

Введение. Применение отходов производства для изготовления надёжных строительных конструкций является направлением развития строительной индустрии с точки зрения способствования охране окружающей среды и сохранения экологии [1]. В Российской Федерации производство пиломатериалов сопровождается накоплением отходов производства, в том числе и отработанных полотен ленточных пил (ОПЛП), срок службы которых ограничен 20–500 часами при отсутствии технологий их рециклирования [2]. Использование ОПЛП в качестве материала для армирования элементов из древесины позволит решить проблему утилизации ОПЛП, к тому же стоимость «в деле» таких конструкций будет более низкой за счёт удешевления армирующего материала. В работах [3, 4] отмечалось, что армирование деревянных конструкций способствует повышению их прочности и жёсткости, позволяет до 30 % снизить расход древесины и монтажную массу, применять древесину более низких сортов и т. д., что обеспечит значительное снижение стоимости строительных конструкций из древесины «в деле» [5].

Данная работа посвящена разработке способа армирования деревянных конструкций (АДК) с использованием ОПЛП путём исследования адгезионной прочности kleевого соединения таких арматурных элементов с древесиной [6].

Научная новизна работы заключается в новом способе армирования элементов из древесины, результатах экспериментальных исследований адгезионной прочности соединения «древесина–арматура» с применением ОПЛП по сравнению с армирующими материалами из стержней стальной и композитной арматуры [7]. Цель работы —

оценить адгезионную прочность kleевого соединения «древесина–ОПЛП» в сравнении с другими видами арматуры, такими как стальная и композитная, а также определить степень пригодности использования ОПЛП для изготовления АДК [8].

Материалы и методы. В рамках настоящего исследования проводился анализ адгезионной прочности соединения «древесина–арматура» для трех типов армирующих материалов:

- полотно ленточной пилы (ОПЛП) с поперечным сечением $1,2 \times 25,6$ мм и переменным шагом зубьев 10/14;
- стальная арматура периодического профиля с номинальным диаметром 8 мм;
- композитная арматура периодического профиля с номинальным диаметром 8 мм.

Испытания на выдергивание выполнялись на деревянных заготовках из древесины сосны обыкновенной с поперечным сечением 50×50 мм [9].

Подготовка образцов. Было изготовлено три группы образцов (по пять моделей в каждой группе) со следующими видами вклеенных арматурных элементов (рис. 1) [10]:

1. Биметаллические полотна (ОПЛП) сечением $1,2 \times 25,6$ мм, длиной 200 мм (марка образцов: БАП-1–БАП-5);
2. Стержни стальной арматуры периодического профиля по ГОСТ 34028-2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций» диаметром 8 мм, длиной 200 мм (марка образцов: БАД-01–БАД-05);
3. Стержни композитной арматуры по ГОСТ 31938-2022 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций» диаметром 8 мм, длиной 200 мм (марка образцов: БАД-31–БАД-35).

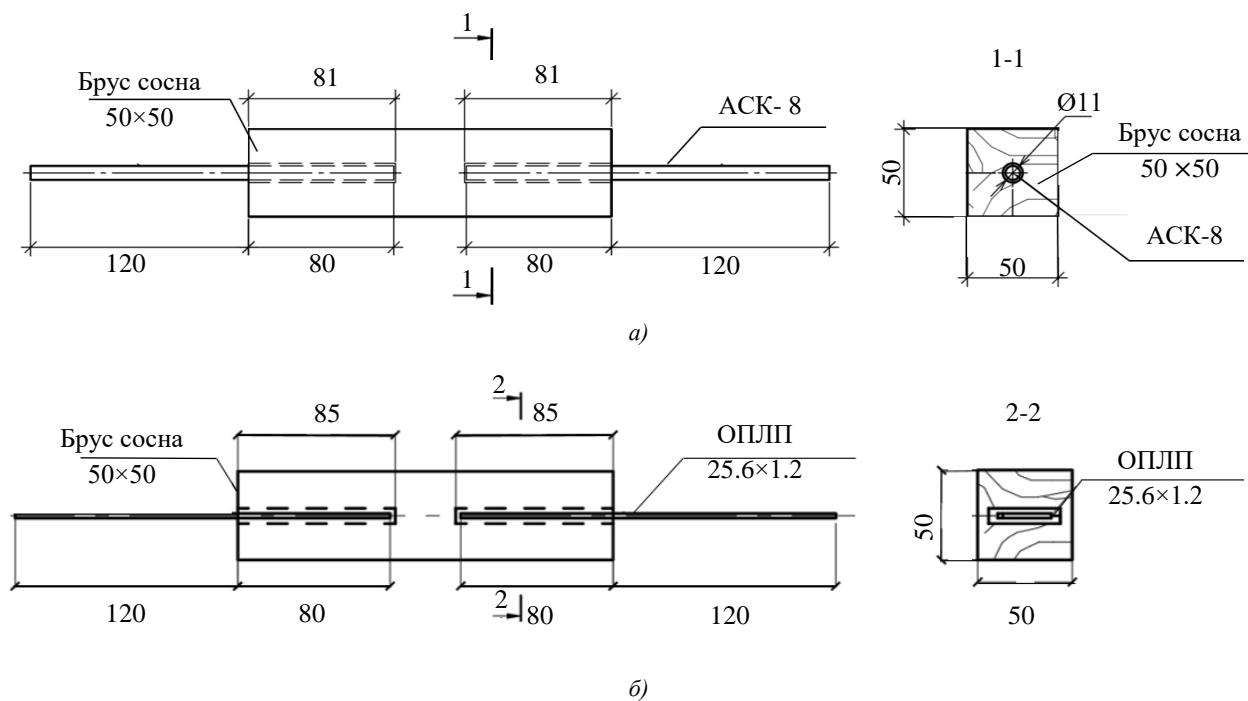


Рис. 1. Схема образцов с вклеенными армирующими элементами:
а — композитная, стальная арматура; б — отработанные полотна ленточных пил

Пазы в деревянных частях образцов для вклейивания ОПЛП выполнялись прямоугольной формы глубиной 3,7 мм и шириной 30,6 мм с помощью пазовой фрезы диаметром 10 мм на фрезере Makita 3612C при 30 000 об/мин [11]. Для вклейивания стержней стальной и композитной арматуры в деревянных заготовках устраивались глухие отверстия диаметром 13 мм и глубиной 80 мм [12].

Полотна ОПЛП подвергались механической обработке для удаления гальванического слоя и придания шероховатости их поверхности с целью улучшения сцепления с kleевым швом [13].

Клеевая композиция имела следующий состав [14]: эпоксидная смола ЭД-20 (100 массовых частей), полиэтиленполиамин (12 массовых частей), кварцевый песок (300 массовых частей) и дибутилфталат (20 массовых частей) [15]. Замешивание kleевой массы выполнялось в блендере «Overhead stirrer PE-8300» при 300 об/мин в течение 5 минут [16]; нанесение на деревянные заготовки шприцем (150 мм^3) или шпателем с расходом 0,2 кг/м; отверждение обеспечивалось при 24 °C в течение 12 часов (рис. 2).

Методика испытаний. Испытания на выдергивание проводились на машине РЭМ-100 при скорости нагружения 5 $\text{мм}/\text{мин}$ [17]. Фактом разрушения образца принималось событие, при котором арматурный элемент полностью или частично выдергивался из деревянной части образца (рис. 3). Фиксация величины разрушающей нагрузки осуществлялась разрывным оборудованием автоматически [18].

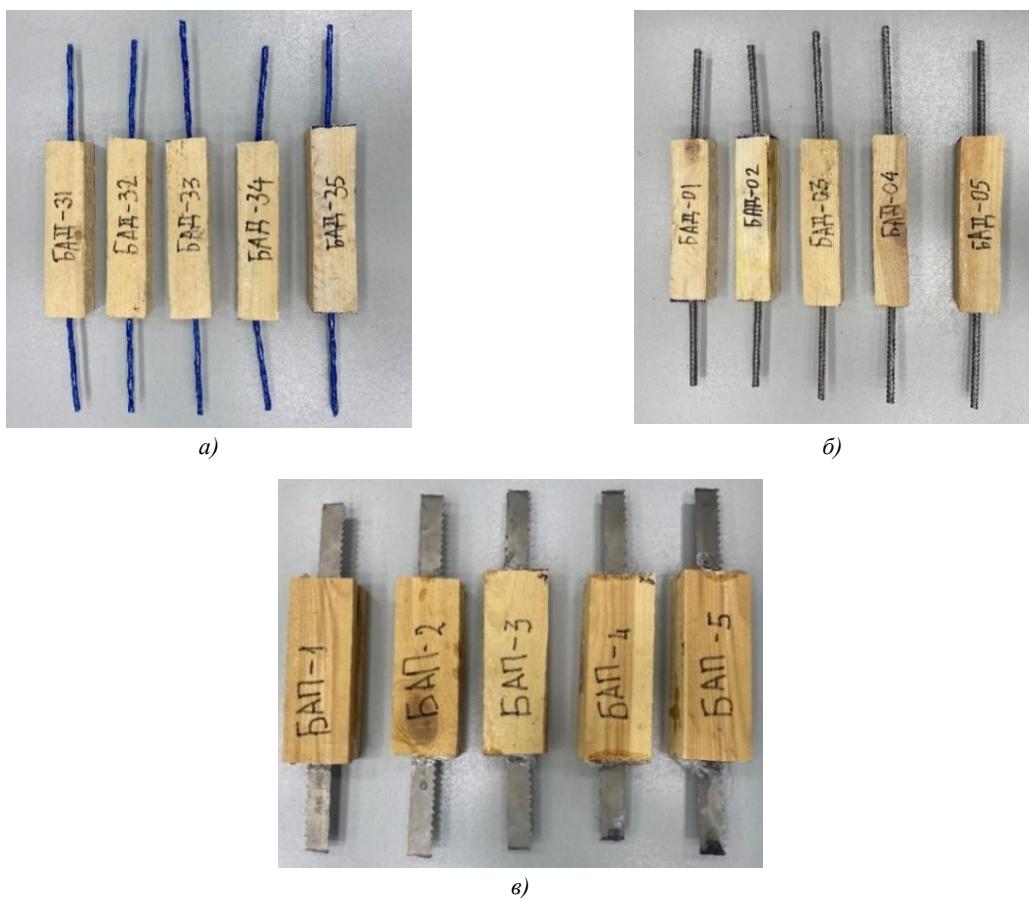


Рис. 2. Готовые образцы с вклешенными армирующими элементами:

а — композитная арматура; б — стальная арматура; в — отработанные полотна ленточных пил

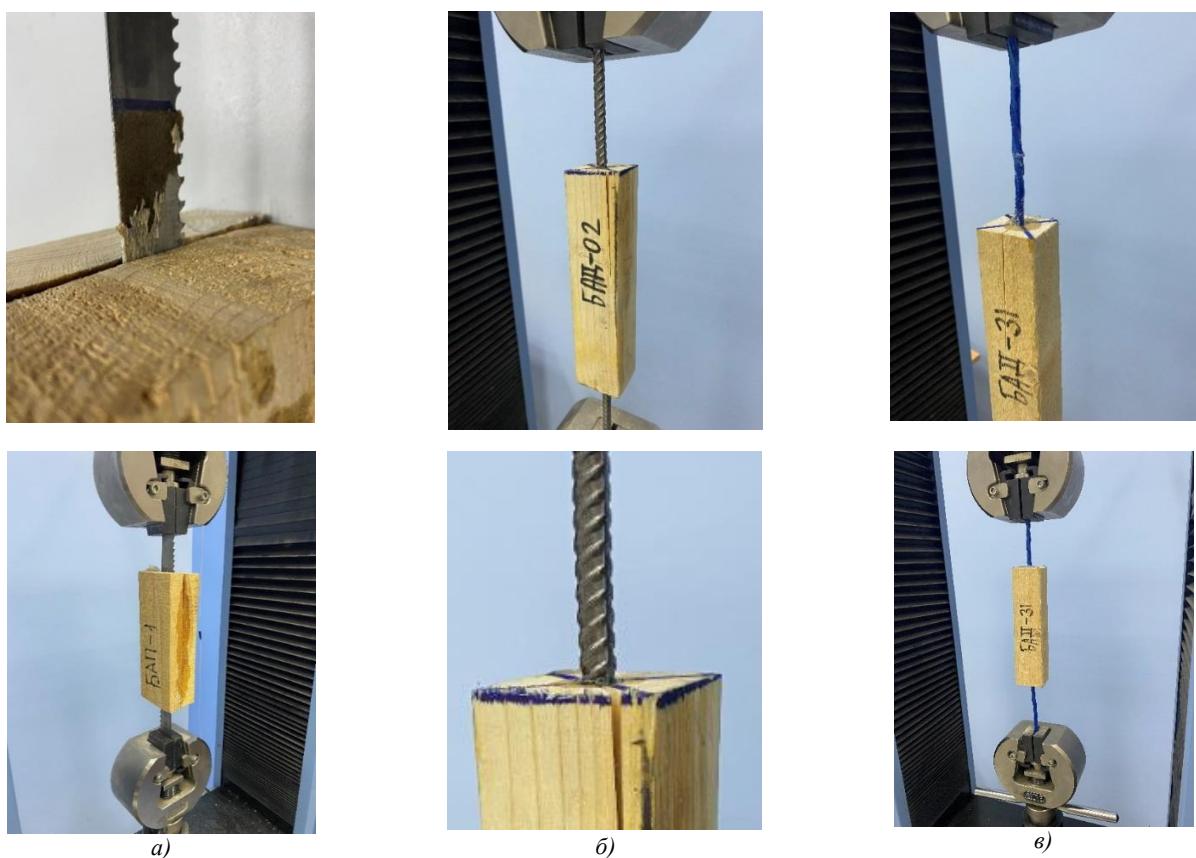


Рис. 3. Схема испытаний на выдергивание на машине РЭМ-100 с образцами:

а — отработанные полотна ленточных пил; б — стальная арматура; в — композитная арматура

Результаты исследования. Основными результатами экспериментальных исследований являлись значения разрушающих нагрузок образцов. Обработка результатов эксперимента выполнялась с применением элементов математической статистики [19]. В пределах каждой группы образцов вычислялись следующие статистические характеристики: среднее значение (\bar{x}), дисперсия (σ^2), стандартное отклонение (σ), коэффициент вариации (CV) и минимальная прочность (M), которые представлены в таблице 1.

Таблица 1
Характеристики статистической обработки данных испытаний

Материал	Нагрузки, кН	\bar{x} , кН	σ^2 , кН ²	σ , кН	CV , %	M , кН
Полотна ленточных пил	11,0; 12,2; 10,8; 10,5; 11,4	11,18	0,4319	0,657	5,88	10,52
Композитная арматура ($d = 8$ мм)	9,5; 8,7; 9,0; 8,2; 9,4	8,96	0,2830	0,532	5,94	8,43
Стальная арматура ($d = 8$ мм)	12,3; 10,2; 10,8; 12,4; 12,5	11,64	1,1265	1,061	9,12	10,58

На рис. 4 представлена диаграмма значений разрушающих нагрузок для образцов. Полученные результаты свидетельствуют о высокой достоверности данных, позволяя количественно оценить механические характеристики испытуемых образцов [20].

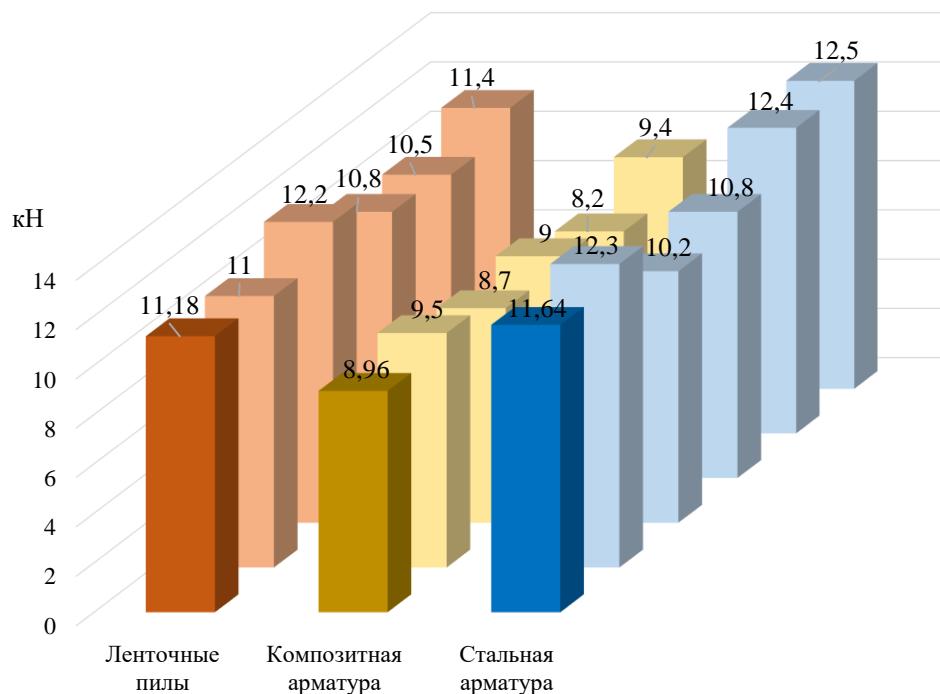


Рис. 4. Результаты испытаний
(результаты средних значений разрушающей нагрузки отображены более ярким цветом)

Соединения ОПЛП с древесиной показывают высокую адгезивную прочность (11,18 кН, $CV = 5,88\%$), сопоставимую со стальной арматурой (11,64 кН, $CV = 9,12\%$) и превосходящую композитную (8,96 кН, $CV = 5,94\%$) [21]. Стабильность соединений обусловлена механической обработкой поверхности полотен, повышающей сцепление с kleem [22]. Разрушение происходило по древесине, что подтверждает надёжность клеевого соединения [23].

Таблица 2
Сравнительные результаты средних значений разрушающей нагрузки

	Полотна ленточных пил	Композитная арматура ($d = 8$ мм)	Стальная арматура ($d = 8$ мм)
Средняя нагрузка \bar{x} , кН	11,18	8,960	11,640
Соотношение значений волях	1,00	0,801	1,041

Обсуждение и заключение. Деревянные образцы с вклеенными ОПЛП показали высокую прочность соединения «древесина–арматура», близкую к образцам со стальной арматурой с разницей значений около 4 % и значительно превышающую прочность образцов с композитной арматурой – до 20%.

Несмотря на то, что образцы со стальной арматурой показали наивысшую прочность, её вариабельность ($CV = 9,12\%$) требует контроля качества древесины и kleевого шва [25]. В свою очередь, образцы с композитной арматурой уступают по прочности образцам с ОПЛП вследствие меньшей шероховатости её поверхности [25].

Достоверность данных обеспечивалась за счёт четкого соблюдения правил и технологии проведения испытаний и качественной работы используемого оборудования.

Следует отметить, что для надёжного сцепления поверхности ОПЛП с kleевым слоем была выполнена предварительная подготовка в виде механической её обработки для удаления гальванического слоя и одновременно для придания ей шероховатости.

Использование ОПЛП для армирования деревянных элементов несущих конструкций позволяет сократить затраты на утилизацию ОПЛП, а также снизить стоимость АДК «в деле». Предлагаемый способ армирования деревянных конструкций с применением ОПЛП имеет перспективы для внедрения в производство по изготовлению лёгких строительных конструкций на основе древесины.

Вышеприведённые факты говорят о том, что ОПЛП вполне пригодны для армирования несущих элементов из древесины, но для полноты оценки эффективности такого решения необходимо исследовать напряжённо-деформированное состояние деревянных конструкций, армированных ОПЛП.

Список литературы/References

1. Рошина С.И. Армирование — эффективное средство повышения надежности и долговечности деревянных конструкций. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал.* 2008;2:71–74. URL: https://lesnoizhurnal.ru/issuesarchive/?ELEMENT_ID=694 (дата обращения: 22.10.2025).

Roshchina SI Reinforcement – Efficient Means of Increasing Reliability and Durability of Wooden Structures. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal.* 2008;2:71–74. (In Russ.) URL: https://lesnoizhurnal.ru/issuesarchive/?ELEMENT_ID=694 (accessed: 22.10.2025)

2. Мартынов В.А., Мясников Д.О., Рошина С.И. Исследование прочности и деформативности kleеных деревянных балок с ламелями из термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) на основе планирования эксперимента. *Лесотехнический журнал.* 2024;14(1):170–189. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/10>

Martinov VA, Myasnikov DO, Roshchina SI Investigation of the Strength and Deformability of Glued Wooden Beams with Lamellae Made of Thermally Damaged (*Pinus Sylvestris L.*) Wood Based on Experimental Planning. *Forestry Engineering Journal.* 2024;14(1):170–189. (In Russ.) <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/10>

3. Gribanov AS, Rimshin VI, Roshchina SI Experimental Investigations of Composite Wooden Beams with Local Wood Modification. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019;687:033039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/3/033039>

4. Kula K, Socha T Renovation and Strengthening of Wooden Beams with CFRP Bands Including the Rheological Effects. *Civil and Environmental Engineering Reports.* 2016;22(3):93–102. <https://doi.org/10.1515/ceer-2016-0038>

5. Corradi M, Speranzini E, Borri A, Vignoli A In-Plane Shear Reinforcement of Wood Beam Floors with FRP. *Composites Part B: Engineering.* 2006;37(4–5):310–319. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.11.003>

6. Rescalvo FJ, Valverde-Palacios I, Suarez E, Gallego A Experimental Comparison of Different Carbon Fiber Composites in Reinforcement Layouts for Wooden Beams of Historical Buildings. *Materials.* 2017;10(10):1113. <https://doi.org/10.3390/ma10101113>

7. Попова, М. В., Тужилова М.В., Репин В.А. Напряженное состояние балок с раскосной перфорацией. *Международная конференция по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии.* 2024;141–147. <https://mcp.vlsu.ru/index.php?id=archive>

8. Крицин А.В., Лихачева С.Ю., Любов Д.М., Тихонов А.В. Анализ методов расчета деревянных изгибаемых элементов, усиленных углеродным волокном. *Региональная архитектура и строительство.* 2014;4:97–104. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22831599> (дата обращения: 22.10.2025).

9. Rahimi M, Davoodi MR, Nematzadeh M. A Comparative Study between Beam and Pull-Out Tests on Bond Behavior of Ribbed GFRP Bar in Concrete Conforming to RILEM Standards. *Archives of Civil and Mechanical Engineering.* 2025;(25)37. <https://doi.org/10.1007/s43452-024-01095-1>

10. Карельский А.В., Журавлева Т.П., Лабудин Б.В. Испытание на изгиб деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинаами, разрушающей нагрузкой. *Инженерно-строительный журнал.* 2015;2(54):77–85. <https://doi.org/10.5862/MCE.54.9>

Karelskiy AV, Zhuravleva TP, Labudin BV Load-to-Failure Bending Test of Wood Composite Beams Connected by Gang Nail. *Building Materials and Units: Technology and Organization of Construction*. 2015;2(54):77–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.5862/MCE.54.9>

11. Klyuev SV, Lobov DM Deformativity of Wooden Beam Structures Strengthened of External Reinforcement of Composite Materials Based on Carbon Fiber. *Industrial and Civil Construction 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;436. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44432-6_25

12. Кавелин А.С., Тютина А.Д., Нуриев В.Э., Колтакова В.А. Армирование деревянных конструкций. *Инженерный вестник Дона*. 2019;8(59):44. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6156> (дата обращения: 22.10.2025).

Kavelin AS, Tyutina AD, Nuriev VE, Koltakova VA Reinforcement of Wooden Structres. *Engineering Journal of Don*. 2019;8(59):44. (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6156> (accessed: 22.10.2025)

13. Пятницкий А.А., Крутик С.А., Журенкова М.А. Возможности использования композиционных материалов на основе углепластика в деревянных конструкциях. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2013;3:241–245. URL: <https://www.ntvprt.ru/ru/archive-vypuskov> (дата обращения: 22.10.2025).

Pyatnitskiy AA, Krutik SA, Zhurenkova MA Possibilities of Using Carbon Fiber Composite Materials in Wooden Structures. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2013;3:241–245. (In Russ.) URL: <https://www.ntvprt.ru/ru/archive-vypuskov> (accessed: 22.10.2025)

14. Cagnoni A, D'Antino T, Pisani MA Adhesive Choice for Near-Surface-Mounted Reinforcement of Wooden Beams in Historical Buildings. *Materials and Structures*. 2025;(58)176. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02700-2>

15. Aniza R, Petrissans A, Petrissans M Multifunctional Nanotechnology Application for Wood Properties Enhancement: Adhesive and Coating. *Nanomaterials Additives in Bioadhesives for Wood Composites*. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3400-2_6

16. Орлов А.О., Лабудин Б.В., Морозов В.С. Исследование прочности и жесткости коннектора с клеем и нагелем. *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. 2019;4(12):95–101. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2019.4.95>

17. Sundukov SK Preparation of an Epoxy Glue by Ultrasonic Treatment. *Polymer Science, Series D* 2024;(17):252–258. <https://doi.org/10.1134/S1995421224700424>

18. Георгиев С.В., Майлян Д.Р., Соловьева А.И. Новый метод усиления железобетонных сжатых колонн, основанный на использовании бетона и композита. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территории*. 2022;1(2):4–12. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-2-4-12>

Georgiev SV, Mailyan DR, Solovyeva AI A New Method of Strengthening the Compressed Reinforced Concrete Columns Based on the Use of Concrete and Composite Materials. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;1(2):4–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-2-4-12>

19. Георгиев С.В., Соловьева А.И., Майлян Д.Р. Изменение относительных деформаций в композитных материалах центрально сжатых железобетонных стоек. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территории*. 2022;1(3):24–34. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-24-34>

Georgiev SV, Solovyeva AI, Mailyan DR Change in Relative Deformations in Composite Materials of Centrally Compressed Reinforced Concrete Struts. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;1(3):24–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-24-34>

20. Фадеев Р.Н., Лисяников М.С. Развитие области применения модифицированной древесины в комбинированных kleenых деревянных конструкциях. В: *Сборник трудов V Международной научно-технической конференции по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии* (МРСПЕ-2024). Владимир: АРКАИМ; 2024:230–236. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=69150633> (дата обращения: 22.10.2025).

Fadeev RN, Lisyatnikov MS Development of the Field of Application of Modified Wood in Combined Glued Wooden Structures. *Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Conference on Physics of Materials, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Manufacturing Engineering* (MPCPE-2024). Vladimir: ARKAIM; 2024:230–236. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=69150633> (accessed: 22.10.2025)

21. Khitrov EG, Birman AR, Ugryumov SA. Calculating the Load-Bearing Capacity of Prestressed Wooden Beams. *Polymer Science, Series D*. 2023;(16):836–839. <https://doi.org/10.1134/S1995421223040147>

22. Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Калиева М.Х., Манапов Р.М. Исследования kleenых армированных деревянных конструкций. *Наука в цифрах*. 2016;1:10–13. <https://doi.org/10.21661/r-114936>

Muselemov KhM, Ustrakhanov OM, Kalieva MKh, Manapov RM The Research of Glued Frame-Mounted Wooden Constructions. *Science in Figures*. 2016;1:10–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.21661/r-114936>

23. Блохина Н.С., Галкин А.Г. Компьютерный анализ пространственной работы балок из древесины, армированных поперечной арматурой. *Инновации и инвестиции*. 2016;10:216–218.

Blokhina NS, Nazarenko SN Computer analysis of spatial operation of beams made of wood reinforced with transverse reinforcement. *Innovations and Investments*. 2016;10:216–218. (In Russ.)

24. Padilha TM, Meneghetti EM, Reis ED. Assessment of Glued Laminated Timber Beams Reinforced with Steel Bars under Bending at High Temperatures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2025;(47)611. <https://doi.org/10.1007/s40430-025-05901-6>

25. Guardigli L Comparing the Environmental Impact of Reinforced Concrete and Wooden Structures. *Eco-efficient Construction and Building Materials*. 2014;407–433. <https://doi.org/10.1533/9780857097729.3.407>

Об авторах:

Мясников Даниил Олегович, аспирант кафедры строительных конструкций Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, 87). [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), daniil.miasnikov.96@mail.ru

Репин Владимир Анатольевич, доцент кафедры строительных конструкций Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, 87). [ScopusID](#), [ORCID](#), skia2000@mail.ru

Рощина Светлана Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (600000, РФ, г. Владимир, ул. Горького, 87). [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), rsi3@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Д.О. Мясников: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение экспериментов, статистическая обработка данных, подготовка текста, формирование выводов.

В.А. Репин: анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

С.И. Рощина: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Daniil O. Myasnikov, PhD student of the Department of Building Structures of Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (87 Gorky Str., Vladimir, 600000, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), daniil.miasnikov.96@mail.ru

Vladimir A. Repin, Associate Professor of the Department of Building Structures of Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (87 Gorky Str., Vladimir, 600000, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), skia2000@mail.ru

Svetlana I. Roshchina, Dr.Sc. (Eng.), Professor, Department of Building Structures of Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (87 Gorky Str., Vladimir, 600000, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), rsi3@mail.ru

Claimed contributorship:

DO Myasnikov: formation of the basic concept, aims of the study, conducting the experiments, statistical data processing, manuscript preparation, drawing the conclusions.

VA Repin: analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

SI Roshchina: scientific supervision, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

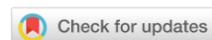
Поступила в редакцию / Received 22.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 07.11.2025

Принята к публикации / Accepted 22.11.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.012.41

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-69-77>

Методы усиления железобетонных колонн с помощью углеродного волокна в Китае

Чэ Сяньюй

Шаньдунский транспортный университет, Китайская народная республика, провинция Шаньдун, г. Цзинань

✉ chexiangyu003@163.com



EDN: UGUUOC

Аннотация

Введение. Строительная отрасль Китая в настоящее время стремительно развивается. Первый пик пришёлся на 1950-е годы, а второй — на 1980-е и 1990-е годы. В целом, здания, построенные в период строительного бума, характеризовались относительно низкими стандартами проектирования и строительства, что приводило к низкому качеству. В настоящее время здания, построенные в течение первого и второго этапов, вступают в фазу «старения» из-за таких факторов, как низкие стандарты строительства и устаревшие методы строительства. Как сами здания, так и их конструкции являются несовершенными. Со временем большинство зданий демонстрируют различную степень старения и серьёзные повреждения, требующие срочной диагностики, ремонта и укрепления. Для удовлетворения потребностей социального развития необходимо проводить надлежащий ремонт, укрепление и реконструкцию существующих зданий. Цель настоящего исследования: выявление возможностей усиления дефектных строительных конструкций современными композитными материалами, производимыми в Китае.

Материалы и методы. Объектом исследования являются методы усиления железобетонных столбов. Автор предлагает использовать системный подход, учитывающий прилегающие функциональные зоны, их взаимовлияние и экспертную оценку значимости.

Результаты исследования. Анализ показал, что механизм армирования железобетонных колонн, подвергающихся осевому сжатию и армируемых листами из углеродного волокна, представляет собой комбинацию листов из углеродного волокна и бетона, на которую влияют множество факторов. Метод армирования строго регламентирован, а боковое ограничение, обеспечиваемое листами из углеродного волокна при нагружении, может повысить прочность на сжатие, структурную устойчивость и долговечность колонн.

Обсуждение и заключение. Методы укрепления существующих зданий разнообразны, с уникальными преимуществами и ограничениями, например: метод приклеивания стали быстр в строительстве, но требует высокого качества; метод увеличения сечения экономичен, но сокращает пространство; метод укрепления углеродным волокном обладает множеством преимуществ, но имеет недостатки в исследовании узлов и расчете несущей способности, хотя исследование укрепления арматурно-бетонных осевых сжатых столбов достаточно глубокое и эффект зависит от многих факторов. Обсуждение показывает: выбор метода укрепления должен учитывать реальные условия; метод укрепления углеродным волокном требует дальнейших исследований, а укрепление осевых сжатых столбов — оптимизации технологии, при этом существующие стандарты и нормативы нужно пересмотреть с учетом новых достижений и практики.

Ключевые слова: строительные конструкции, метод усиления углеродной тканью, армирование железобетонных конструкций

Для цитирования: Чэ Сяньюй. Методы усиления железобетонных колонн с помощью углеродного волокна в Китае. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):69–77. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-69-77>

Methods for Strengthening Reinforced Concrete Columns Using Carbon Fiber in China

Che XiangYu 

Shandong Jiaotong University, Jinan, Shandong Province, China

 chexiangyu003@163.com

Abstract

Introduction. China's construction industry developed in three phases: the first peak occurred in the 1950s, and the second one in the 1980s and 1990s. Generally, buildings constructed during the construction boom were characterized by relatively low design and construction standards resulting in poor quality. Currently, buildings constructed during the first and second phases are entering a phase of "aging" due to some factors such as low construction standards and outdated construction methods. Both the buildings themselves and their structures are flawed. Over time, most buildings exhibit varying degrees of deterioration and serious damage requiring urgent inspection, repair, and reinforcement. To meet the needs of social development, proper repair, reinforcement, and reconstruction of existing buildings is essential. The aim of this study is to identify the possibilities of reinforcing defective building structures with modern composite materials manufactured in China.

Materials and Methods. The object of the research are methods of strengthening reinforced concrete pillars. The author suggests using a systematic approach that accounts for the adjacent functional areas, their mutual influence and an expert assessment of their significance.

Research Results. The analysis showed that the strengthening mechanism for reinforced concrete columns subjected to axial compression and strengthened with carbon fiber sheets is a combination of carbon fiber sheets and concrete influenced by a host of factors. The strengthening method is strictly regulated, and the lateral restraint provided by the carbon fiber sheets under loading is capable of improving the compressive strength, structural stability, and durability of the columns.

Discussion and Conclusion. The strengthening methods for existing buildings vary widely, each with its own unique advantages and limitations. For example, bonded steel is fast to construct but requires a high quality; section enlargement is cost-effective but reduces space; carbon fiber strengthening offers numerous advantages but has limitations in investigating nodes and calculating load-bearing capacity. Although extensive research has been conducted on strengthening reinforced concrete axial compressed columns, the effectiveness depends on a host of factors. The discussion demonstrates that the choice of a strengthening method should be tailored to actual conditions. Carbon fiber strengthening requires further research, while strengthening axial compressed columns requires technological optimization. Furthermore, existing standards and regulations should be revised to reflect new advances and best practices.

Keywords: building structures, carbon fiber strengthening method, strengthening of reinforced concrete structures

For citation: Che XiangYu Methods for Strengthening Reinforced Concrete Columns Using Carbon Fiber in China. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):69–77. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-69-77>

Введение. Укрепление зданий подразумевает усиление изношенных и поврежденных конструкционных материалов и строительных конструкций для восстановления их функциональности. По сравнению с новым строительством, проекты по ремонту и усилению существующих строительных конструкций обладают преимуществами более коротких сроков строительства, меньших инвестиционных затрат и более высокой окупаемости. Ожидается, что сектор укрепления и реконструкции зданий в Китае будет переживать значительный рост в будущем [1–2]. Поэтому исследования и практическое использование теории и технологий укрепления и реконструкции зданий представляют значительную теоретическую и инженерную ценность.

Материалы и методы. В последние годы Китай добился значительного прогресса как в теоретических исследованиях, так и в инженерных разработках в области реконструкции и усиления существующих зданий. Появляется всё больше методов усиления существующих зданий и сооружений, особенно в широко используемых бетонных конструкциях. Появилось множество основных методов усиления. Рассмотрим некоторые из них.

1. Прикрепление стальных элементов. Этот метод заключается в креплении стальных пластин к внешней поверхности бетонных элементов для повышения их прочности на изгиб и сдвиг, тем самым повышая их безопасность. Он обычно подходит для среды с влажностью 20 % и используется для армирования изгибающихся элементов, подверженных воздействию обычных статических сил [3]. По сравнению с крупномасштабным строительством он характеризуется небольшим периодом строительства, минимальным объемом работ на площадке и минимальным воздействием на внешний вид существующих элементов здания и пространства над ним. Однако этот метод требует высокого качества строительства, а выбор клеевого материала и мастерство строителей напрямую

определяют его эффективность. Кроме того, если после склеивания стальных элементов образуются пустоты, их устранение крайне затруднено.

2. Увеличение поперечного сечения. Этот метод заключается в увеличении площади поперечного сечения бетонных элементов для повышения их несущей способности и соответствия эксплуатационным требованиям. Он отличается относительно низкой стоимостью строительства и широким спектром применения, включая армирование и модернизацию различных конструктивных элементов (балки, плиты, колонны и стены) [4]. Однако его основными недостатками являются длительное время строительства на месте, значительное воздействие на окружающую среду и сокращение полезной площади из-за увеличения площади поперечного сечения, что накладывает определенные ограничения.

3. Внешнее стальное армирование. Этот метод заключается в обертывании поверхности бетонного элемента электросварными стальными профилями (доступными как для сухого, так и для мокрого способа) для повышения несущей способности элемента. Этот метод значительно повышает несущую способность и жесткость элемента, относительно прост в изготовлении и требует коротких сроков строительства, что делает его широко используемым для усиления строительных элементов [5]. Однако внешнее стальное армирование имеет и недостатки, такие как большой расход стали, высокая стоимость и сложность обработки стыков элементов.

4. Армирование путем изменения расчетной схемы. Этот метод изменяет передачу усилий в конструкции путем добавления опорных точек, балок (раскосов) или преобразования многопролетных балок с простыми опорами в неразрезные. Это значительно снижает расчетный изгибающий момент, увеличивает несущую способность элемента конструкции и достигает цели усиления исходной конструкции. В зависимости от способа добавления опорных точек соединение может быть классифицировано как «мокрое» или «сухое». При использовании мокрого соединения контактные поверхности между балкой и опорой, а также бетоном, отлитым после заливки, в точках опоры требуют придания шероховатости, удаления окалины и смачивания. Для заливки обычно используется микрорасширяющийся бетон. При использовании сухих соединений стальных хомутов между стальным хомутом и поверхностью балки заливается цементный раствор. После того, как стальной хомут надежно приварен к опоре, все зазоры между контактами герметизируются и заполняются сухим прочным раствором. Метод включает в себя как дополнительное армирование опоры, так и подкрепление, которые используются совместно. Дополнительное армирование опоры усиливает конструкцию за счет добавления несущих опорных элементов. Несмотря на простоту принципа и надежность передачи усилий, он трудоемок и может повлиять на эстетику и функциональность здания, особенно на пространственное смещение. Он больше подходит для усиления конструкций с ограниченными зазорами и большими пролетами. Комплексный метод армирования можно разделить на частичное усиление, полное усиление и усиление фундамента. Усиление достигается за счет изменения пути передачи усилий и повышения несущей способности и деформационной способности конструкции. Метод также включает в себя такие способы, как удаление балочных (ферменных) стен, удаление балочных колонн, замена балочных колонн и модификация несущей системы [6]. Он включает в себя усиление конструкции, подъем домкратами и коррекцию выравнивания надстройки, а также удаление отбракованных компонентов. Этот метод характеризуется коротким сроком строительства, низкой стоимостью и минимальным влиянием на производство и повседневную жизнь. Он подходит для решения таких задач по усилению, как увеличение полезной площади и обеспечение безопасности конструкции как в новых, так и в существующих зданиях.

5. Предварительно напряжённая арматура. Предварительно напряжённую арматуру можно разделить на два типа в зависимости от цели армирования. Один из них — предварительно напряжённая арматура стяжками, которая в основном используется для усиления балочно-плитных конструкций, каркасных конструкций, ферм и элементов, подверженных значительному внецентренному сжатию. В зависимости от назначения армирования и требований к нагрузке усиливаемой конструкции расположение стяжек можно разделить на горизонтальное (или линейное), подкрепляющее (или ломаное) и смешанное. Другой метод — предварительно напряженная арматура, которая в основном используется для колонн каркаса, подверженных осевому сжатию и небольшому внецентренному сжатию. Армирование двойной арматурой подходит для усиления элементов, сжатых в осевом направлении, и колонн, подверженных небольшому внецентренному сжатию, в то время как одинарная арматура подходит для усиления колонн, подверженных большому внецентренному сжатию, с недостаточным количеством сжатой арматуры или низкой прочностью. Этот метод использует предварительно напряженные стальные стержни (горизонтальные стержни, поддерживающие поперечные элементы, подпорные стержни и комбинированные стержни) для усиления несущей способности конструкции. Данный метод позволяет снизить уровень напряжений в армированных элементах, что приводит к значительному повышению эффективности армирования и значительному увеличению общей несущей способности конструкции. Этот метод может так же повлиять на внешний вид армированных элементов. Он больше подходит для армирования средне- и большепролетных конструкций, а также эффективен для усиления высоконапряженных и деформируемых бетонных элементов [7]. Однако

его не следует применять в конструкциях, подверженных повышенной усадке и ползучести бетона, при этом необходимо уделять пристальное внимание коррозии предварительно напряженных арматурных стержней.

6. Метод армирования склеиванием листов из углеродного волокна. Этот метод использует специальный клей для приклеивания листов из углеродного волокна к поверхности компонента, образуя композитный материал. Этот композитный материал взаимодействует с исходной конструкцией или компонентом, усиливая и улучшая его несущую способность. Этот метод обладает такими преимуществами, как малый вес, уменьшенная толщина, доступность материалов по спецификациям и устойчивость к щелочам, коррозии и кислотам. Малый вес и простота технологического процесса позволяют использовать его в ограниченном пространстве. Кроме того, усиление не влияет на нормальное использование здания, что делает его простым, быстрым и широко применимым.

Ещё в конце XIX века технология склеивания армирующей ткани из углеродного волокна получила широкое применение в развитых странах, таких как США и Япония. С момента её появления в Китае в конце 1990-х годов она быстро привлекла внимание инженерной отрасли и стала центром исследований и применения новых материалов для армирования зданий. Сегодня значительное количество ранее построенных зданий не соответствует новым эксплуатационным требованиям, имеет низкие проектные стандарты, низкую функциональность и нуждается в срочном усилении. Приклеивание материалов из углеродного волокна для армирования бетонных конструкций является наиболее удобным и эффективным методом армирования, не требующим остановки производства. Он особенно подходит в ситуациях, когда площадь поперечного сечения существующих конструктивных элементов не может быть увеличена, пространство на строительной площадке ограничено, а сроки строительства сжаты. Кроме того, этот метод подходит для армирования мостов, водопропускных труб и различных других бетонных конструкций. Однако в теоретических исследованиях и инженерном применении современного метода армирования с помощью клеевого углеродного волокна всё ещё существует ряд проблем, требующих решения. Что касается свойств материала, листы из углеродного волокна, используемые для армирования, обычно имеют толщину менее 0,2 мм, но обладают высокой прочностью на разрыв, превышающей 3000–4000 МПа, что примерно в 10 раз превышает прочность конструкционной стали. Поэтому они особенно подходят для армирования железобетонных элементов, подверженных как изгибу, так и растяжению. Однако для армирования широкого спектра сжимающих элементов необходимы дальнейшие исследования механизмов армирования и методов применения листов из углеродного волокна. Таким образом, для удовлетворения требований по армированию и модернизации большого количества существующих зданий исследования напряженно-деформированного состояния и методов армирования сжимающих элементов листами из углеродного волокна имеют важное теоретическое и прикладное значение [8].

В связи с непрерывным развитием технологий армирования углеродным волокном в Китае официально опубликован «Технический кодекс по армированию бетонных конструкций листами из углеродного волокна» CECS 146:2003 (издание 2007 г.), и опубликован соответствующий комплект чертежей для армирования конструкций. Этот кодекс в полной мере учитывает новейшие результаты исследований, проведенных многочисленными отечественными университетами и научно-исследовательскими институтами за последние годы, интегрируя ценный практический опыт, накопленный различными организациями в области использования материалов из углеродного волокна для армирования конструкций при проектировании и строительстве. Он также опирается на обширную международную литературу, предоставляя научное и авторитетное руководство по теоретическим исследованиям и инженерной практике применения армированных углеродным волокном бетонных конструкций.

В целом, использование клееных листов из углеродного волокна для армирования бетонных конструкций привело к многочисленным достижениям как в теоретических исследованиях, так и в инженерном применении. Однако остается еще множество теоретических проблем и технических трудностей, которые необходимо преодолеть. Например, недостаточно изучены механизмы работы и конкретные методы применения клееного армирования углеродным волокном в стыках компонентов, а система анализа и расчета несущей способности нуждается в совершенствовании. В частности, в области армирования сжатых элементов, хотя действующий «Технический кодекс для железобетонных конструкций с листами из углеродного волокна» CECS 146:2003 (издание 2007 г.) четко устанавливает, что использование листов из углеродного волокна для армирования бетонных колонн может ограничить деформацию бетона, тем самым увеличивая прочность на сжатие и снижая коэффициент осевого сжатия, текущие исследования остаются недостаточными и неполными [10]. В нормативных актах подчеркивается, что эффект армирования листами из углеродного волокна может учитываться при проектировании только при наличии надежных доказательств [9]. Поэтому для дальнейшего расширения сферы применения армирования листами из углеродного волокна и повышения эффективности его армирования особенно актуально и необходимо проведение более глубоких и систематических исследований существующих теоретических и технических вопросов.

Проанализируем механизм армирования и методы возведения железобетонных колонн, работающих на осевое сжатие и армированных листом из углеродного волокна.

1. Теоретический анализ элементов, работающих на осевое сжатие.

Элемент, работающий на осевое сжатие, воспринимает осевое усилие вдоль оси своего центра тяжести поперечного сечения, когда точка приложения внешней силы, действующей на элемент, совпадает с центром тяжести поперечного сечения элемента, а распределение напряжений по поперечному сечению элемента равномерно.

При разрушении элемента, работающего на осевое сжатие, направление усилия совпадает с осью элемента. Как правило, когда железобетонная колонна подвергается осевому сжатию, хомуты ограничивают боковое расширение и деформацию бетона внутри неё, оказывая боковое сжатие на бетон ядра. Совместное воздействие различных вертикальных осевых давлений и небольшого начального эксцентричеситета сжимает весь ствол колонны, вызывая сжатие и деформацию стальных стержней, что приводит в предельной стадии к текучести внутренних стальных стержней. Из-за выпячивания стальной арматуры на бетонной поверхности ствола колонны появляются трещины, которые становятся более выраженным по мере увеличения нагрузки. После того как стальная арматура выходит из строя, несущая способность элемента оказывается недостаточной, и трещины на поверхности бетона в конечном итоге приводят к полному разрушению.

2. Анализ напряжений при осевом сжатии элементов, армированных углеродной тканью.

Характеристики элементов при осевом сжатии, армированных углеродной тканью, существенно отличаются от характеристик неармированных элементов.

После армирования осевого сжатого элемента углеродной тканью он становится структурой, подверженной вторичным напряжениям. До нанесения углеродной ткани осевой сжатый элемент находился под напряжением (первичное напряжение), то есть в нем возникали напряжения и деформации. Однако вновь наклеенная углеродная ткань в этот момент не испытывает напряжений. Только при приложении испытательной нагрузки (вторичное напряжение) новая часть углеродной ткани, соединенная с бетоном, начинает подвергаться напряжению. Следовательно, напряжение и деформация вновь добавленной детали из углеродного волокна всегда отстают от накопленных напряжений и деформаций исходного компонента. Когда несущая способность исходного компонента достигает предела, вновь добавленная углеродная ткань еще не достигла предельного состояния несущей способности, и ее прочность на разрыв может продолжать играть свою роль.

Степень разгрузки исходного компонента и обработка новых и старых поверхностей соединения являются двумя важными факторами, влияющими на совместную работу усиленного компонента.

Чтобы уменьшить проблему запаздывания напряжений и деформаций вновь добавленной детали из углеродного волокна, компонент необходимо разгрузить перед усилением. При разрушении усиленного компонента усиленная часть может уменьшить накопленные напряжения и деформации, которые отстают от исходного компонента. На начальном этапе несущей способности разгрузка оказывает большее влияние на эффективность усиления компонента. Существуют два конкретных метода разгрузки: прямая разгрузка и косвенная разгрузка. Прямая разгрузка подразумевает полное или частичное снятие нагрузки с компонента, в то время как косвенная разгрузка подразумевает приложение противодействующей силы к существующей конструкции для снятия накопленных напряжений и деформаций на начальном этапе нагрузки.

3. Обработка границы раздела между новым и старым армированными компонентами.

Обработка границы раздела и качество связи между листом углеродного волокна и исходным компонентом напрямую влияют на конечный эффект армирования. Сжимающие и сдвиговые напряжения между новой и старой конструкциями передаются через границу, поэтому граница раздела должна быть гладкой и ровной. Для изучения прочности связи между листом углеродного волокна и исходной конструкцией лист углеродного волокна сначала приклеивают к образцу бетона, а затем проводят испытание на сдвиг. Это позволяет проанализировать влияние на прочность связи таких факторов, как обработка поверхности, связующий материал и прочность бетона. Углеродная ткань обладает чрезвычайно высокой прочностью на разрыв. Поперечная ткань из углеродного волокна в аксиально сжатых элементах не только координирует деформацию с хомутами в аксиально сжатых элементах, но и работает совместно с продольной тканью из углеродного волокна, выполняя функцию обруча, повышая несущую способность аксиально сжатых элементов.

4. Механизм напряжения в аксиально сжатых элементах, армированных листами из углеродного волокна.

Когда бетон в аксиально сжатой колонне подвергается воздействию сжимающих усилий в нескольких направлениях, его объем изменяется. Это происходит из-за постепенного изменения напряжений и деформаций в бетоне, приводящего к образованию мелких трещин. Приложение бокового давления к поверхности бетона в этот момент может ограничить скорость изменения этих мелких трещин, тем самым увеличивая несущую способность бетона. Если бетонная поверхность обернута стальной трубой или другой оболочкой в форме обруча, расширение объема бетона ограничивается боковой силой, прикладываемой оболочкой, тем самым уменьшая или

замедляя скорость изменения напряжений и деформаций в бетоне, что в конечном итоге позволяет повысить прочность бетона на осевое сжатие и улучшить его пластичность. Этот принцип широко используется в практическом применении в инженерном армировании, например, в трубобетоне. Такой тип материала, который оптимизирует собственные механические свойства бетона и повышает его прочность на осевое сжатие за счет приложения боковых усилий к бетонной поверхности, называется бетоном с ограниченным пространством. Если сборная оболочка, передающая боковые усилия к бетонной поверхности, изготовлена из углеродной ткани, она считается бетоном с ограниченным пространством.

Были проведены исследования методов армирования железобетонных колонн, работающих на осевое сжатие, углеродной тканью. При использовании углеродной ткани для армирования бетонных конструкций существует три распространенных метода армирования: мокрое связывание, непрерывная намотка волокон и сборные оболочки. Конкретный процесс строительства с применением углеродной ткани заключается в следующем:

- 1) подготовка поверхности крепления бетонной колонны для увеличения площади контакта;
- 2) нанесение металлической сетки для повышения прочности бетонной колонны;
- 3) заливка бетона в зазоры между металлической сеткой для усиления конструкции;
- 4) обертывание полиэтиленовой пленкой для сохранения влаги и предотвращения растрескивания;
- 5) разрезание листа углеродного волокна;
- 6) подготовка и нанесение клея, наклейка листа (после завершения крепления необходимо дождаться затвердения клеевого соединения);
- 7) проведение осмотра и дополнительное укрепление всех ослабленных участков kleem;
- 8) техническое обслуживание.

После изучения многочисленных материалов и соответствующей литературы, а также проведения многочисленных теоретических исследований и инженерных разработок, основанных на характеристиках армирования листами углеродного волокна, и для обеспечения эффективного армирования в сочетании с методами армирования колонн, подвергаемых осевому сжатию, листами углеродного волокна и испытаниями на статическую нагрузку необходимо учитывать факторы, влияющие на оптимальный метод строительства.

Исследователи в Китае и за рубежом добились значительных результатов посредством экспериментальных исследований и анализа факторов, влияющих на эффективность армирования бетона листами углеродного волокна. Факторы, влияющие на несущую способность железобетонных колонн, подвергающихся осевому сжатию и армированию углеродной тканью, можно суммировать следующим образом:

– Ровность склеиваемой поверхности.

При использовании углеродной ткани для склеивания и армирования бетонных конструкций поверхность бетонного компонента необходимо предварительно отполировать. Для удаления рыхлых и поврежденных участков бетонной поверхности, а также загрязнений от заполнителя и раствора можно использовать механические методы или ручную полировку, чтобы поверхность бетонного компонента была относительно ровной и гладкой. Это способствует плотному сцеплению углеродной ткани с поверхностью бетонного компонента, тем самым улучшая адгезию склеиваемой поверхности.

– Выбор и резка углеродной ткани.

При выборе углеродной ткани перед испытаниями необходимо подтвердить прочность используемых материалов производителем, чтобы убедиться в их соответствии спецификации и уточнить класс прочности. Выбор класса прочности (1 или 2) необходимо учитывать при проектировании испытываемого бетонного компонента.

Резка ткани из углеродного волокна. Во-первых, сформированная ткань из углеродного волокна должна быть разрезана до указанного размера в соответствии с требованиями конструкции. Неровная или косая резка против волокон строго запрещена, чтобы предотвратить падение волокон. Во-вторых, после резки направление склеивания должно соответствовать направлению расположения волокон углеродного волокна. В-третьих, разрезанная лента из углеродного волокна должна быть сухой, чистой и незагрязненной, чтобы избежать прилипания песка, воска, масла и т. д.

– Выбор клея.

При выборе клея следует учитывать, соответствуют ли требованиям микроструктура склеивания и прочность сцепления. На рынке представлено множество типов интерфейсных агентов с различным составом и связующими свойствами. Выбор необходимо осуществлять в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации ткани из углеродного волокна.

– Метод склеивания ткани из углеродного волокна.

Исследования и анализ ткани из углеродного волокна в стране и за рубежом показывают, что различные схемы склеивания имеют разную степень повышения несущей способности бетонных компонентов. Этим про-

цессом можно управлять, регулируя размер интервала, ширину расположения и форму окружности расположения кольца ткани из углеродного волокна. На сегодняшний день применяют четыре типа методов склеивания:

- однослойная кольцевая бетонная колонна;
- двухслойная кольцевая бетонная колонна;
- вертикальная и горизонтальная обмотка;
- полная обмотка.

Результаты исследования. Проведены всесторонний и углубленный анализ и исследование механизма армирования и методов возведения железобетонных колонн, подвергающихся осевому сжатию, с использованием листов из углеродного волокна. Как с микроскопической, так и с макроскопической точки зрения механизм армирования показывает, что листы из углеродного волокна, благодаря своей высокой прочности и эластичности, прочно связываются с бетоном. При воздействии на колонны, подвергающиеся осевому сжатию, на эти напряжения влияют сложные и разнообразные факторы. Прочность бетона, степень армирования, а также количество и качество слоев листов из углеродного волокна существенно влияют на эффективность армирования.

Что касается методов строительства, каждый этап от подготовки конструкции до непосредственного склеивания строго регламентирован. Безопасность и меры предосторожности имеют первостепенное значение во время строительства. Рабочие должны использовать средства индивидуальной защиты для предотвращения травм от разлетающихся волокон листов из углеродного волокна. Кроме того, условия строительства должны соответствовать требованиям, включая соответствующую температуру и влажность, для обеспечения надежного сцепления листов из углеродного волокна с бетоном. Углубленный анализ механизма напряжений показывает, что ткань из углеродного волокна, наклеенная на бетонную колонну, подвергающуюся осевому сжатию, будет создавать боковые ограничения. Благодаря эффекту кольца, создаваемому тканью из углеродного волокна, эта пассивная система ограничения может эффективно ограничивать боковую деформацию бетона, тем самым повышая прочность на сжатие железобетонной колонны и повышая общую устойчивость и долговечность конструкции.

Обсуждение и заключение. В области строительства укрепление существующих зданий имеет важное значение для обеспечения их структурной безопасности и функциональности. В настоящее время существует множество методов укрепления, каждый из которых имеет свои особенности.

Метод укрепления с применением приклеивания стальных пластин позволяет быстро провести работы и сократить сроки строительства, но предъявляет высокие требования к качеству работ: от выбора материалов до технологии приклеивания каждый этап должен строго соответствовать нормам, иначе это повлияет на эффективность укрепления и безопасность здания. Метод укрепления путем увеличения сечения имеет низкую стоимость, но занимает пространство внутри здания, изменяет внутреннюю планировку и влияет на функциональность здания. Метод укрепления с применением углеродного волокна применяется широко — материалы обладают высокой прочностью, легкостью и коррозионной стойкостью, способны повысить несущую способность и сейсмостойкость, не добавляя при этом значительного веса. Однако имеет ограничения в анализе узлов и расчете несущей способности, требующие дальнейших исследований. Эффективность укрепления центрально-сжатых железобетонных столбов зависит от многих факторов, таких как свойства материалов, качество работ и т.д.

На практике при выборе метода укрепления необходимо провести комплексную оценку состояния здания и гибко корректировать подход. Для метода укрепления с применением углеродного волокна необходимо углубленно изучить и усовершенствовать теоретические основы проектирования; для укрепления центрально-сжатых столбов требуется разработка новых материалов и технологий, а также усиление контроля качества. Кроме того, необходимо своевременно пересматривать устаревшие стандарты и нормативные акты, чтобы обеспечить научное обоснование работ по укреплению.

Список литературы/ References

1. Сюй Цинфу, Тан Сяянтань, Ван Юн. Исследование проектирования и технологии усиления конструкций жилых зданий [J]. *Керамика*. 2025(10):212–214. <https://doi.org/10.19397/j.cnki.ceramics.2025.10.042>
2. Xu Qingfu, Tang Xiangtan, Wang Yun Research of Design and Technology of Reinforcement of Structures of Residential Buildings. *Ceramics*. 2025;10:212–214. <https://doi.org/10.19397/j.cnki.ceramics.2025.10.042>
3. Сян Бинцюань, Ли Жуйлинь, Сюй Дань и др. Исследование быстрой проверки сейсмостойкости и методов усиления кирпично-бетонных зданий в районе Чучжоу. *Сычуаньский цемент*. 2025;(11):73–77. <https://doi.org/10.20198/j.cnki.scsn.2025.11.026>

Xiang Bingquan, Li Ruilin, Xu Dan, et. A Study of Rapid Verification of Earthquake Resistance and Reinforcement Methods of Brick-and-Concrete Buildings in the area of Chuzhou. *Sichuan Cement*. 2025;(11):73–77. <https://doi.org/10.20198/j.cnki.scsn.2025.11.026>.

3. Чжао Вэйцзе, Чэн Янъян, Чжан Чжэнь. Исследование методов обследования, оценки и усиления строительных конструкций. *Металлические конструкции в строительстве Китая*. 2025;24(16):79–81. <https://doi.org/10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.16.027>.

Zhao Weijie, Cheng Yangyang, Zhang Zhen Research of Methods of Inspection, Assessment and Reinforcement of Building Structures. *Metal Structures in Chinese Construction*. 2025;24(16):79–81. <https://doi.org/10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.16.027>

4. Ли Гэнмо, Ло Кайхай, Хуан Шиминь и др. Обзор исследований и практического применения методов сейсмического усиления существующих каменных зданий. *Сейсмостойкость и усиление строительных конструкций*, 2025;47(03):139–147. <https://doi.org/10.16226/j.issn.1002-8412.2025.03.016>

Li Genmo, Luo Kaihai, Huang Shimin, et. Review of Research and Practical Application of Seismic Reinforcement Methods for Existing Stone Buildings. *Earthquake Resistance and Reinforcement of Building Structures*. 2025;47(03):139–147. <https://doi.org/10.16226/j.issn.1002-8412.2025.03.016>

5. Чэн Инкан. *Исследование сейсмостойкости и сейсмоизоляционного усиления исторических зданий с кирпично-деревянной конструкцией в районе Линнань*. Гуанчжоу: Гуанчжоуский университет, 2025. <https://doi.org/10.27040/d.cnki.ggzdu.2025.000677>

Chen Incan *Investigation of Earthquake Resistance and Seismic Insulation Reinforcement of Historical Buildings with Brick and Wooden Structures in Lingnan District*. Guangzhou University, 2025. <https://doi.org/10.27040/d.cnki.ggzdu.2025.000677>

6. Юй Хунцзюнь, Чжан Нань. Исследование методов усиления строительных конструкций на основе оптимального проектирования и примеры применения. *Металлические конструкции в строительстве Китая*, 2025;24(06):130–132. <https://doi.org/10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.06.044>

Yu Hongjun, Zhang Nan Research of Reinforcement Methods of Building Structures Based on Optimal Design and Application Examples. *Metal Structures in Chinese Construction*. 2025;24(06):130–132. <https://doi.org/10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.06.044>

7. Гао Син, Ван Вэйюй. Исследование механизма работы и методов усиления жилых построек типа «сюанъяо» (сводчатые пещерные жилища). *Строительные конструкции*. 2025;55(02):143–150. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.20220914>

Gao Xing, Wang Weiyu Investigation of the Mechanism of Operation and Methods of Reinforcement of Residential Buildings of the "Xuanyao" Type (Vaulted Cave Dwellings). *Building Structures*. 2025;55(02):143–150. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.20220914>

8. Ян Шуайминь. *Исследование технологий усиления конструкций существующих зданий и их экономической эффективности*. Восточно-Китайский технологический университет, 2024. <https://doi.org/10.27145/d.cnki.ghddc.2024.000872>

Yang Shuaimin *Research of Technologies for Reinforcing Structures of Existing Buildings and their Economic Efficiency*. East China University of Technology, 2024. <https://doi.org/10.27145/d.cnki.ghddc.2024.000872>

9. Лю Линин, Оу Чжэньфэн, Ян Чуньшань и др. Численное моделирование и анализ натурных измерений деформаций прибрежных конструкций, вызванных разработкой котлована для опускных секций [Л]. *Предупреждение и ликвидация аварий в тоннелях и подземных сооружениях*. 2024;6(04):12–19. <https://doi.org/10.19952/j.cnki.2096-5052.2024.04.02>

Liu Liying, Ou Zhenfeng, Yang Chunshan, et. Numerical Modeling and Analysis of Full-Scale Measurements of Deformations of Coastal Structures Caused by the Development of a Foundation Pit for Lowering Sections. *Prevention and Elimination of Accidents in Tunnels and Underground Structures*. 2024;6(04):12–19. <https://doi.org/10.19952/j.cnki.2096-5052.2024.04.02>

10. Ван Яохань. Краткий анализ применения технологий усиления строительных конструкций. В: *Металлические конструкции в строительстве Китая. Сборник трудов Форума по интеллектуальному строительству и экономическому развитию с точки зрения новых качественных производительных сил (I)*. ООО «Уханьский институт проектирования муниципального строительства». 2024:156–157. <https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2024.036623>

Wang Yaohan A Brief Analysis of the Application of Reinforcement Technologies for Building Structures. *Metal Structures in Chinese Construction. Proceedings of the Forum on Intellectual Construction and Economic Development from the Perspective of New Qualitative Productive Forces (I)*. Wuhan Institute of Municipal Construction Design, LLC. 2024:156–157. <https://www.chndoi.org/Resolution/Handler?doi=10.26914/c.cnkihy.2024.036623>

Об авторе:

Чэ Сяньюй, аспирант Шаньдунского транспортного университета (Китайская народная республика, провинция Шаньдун г. Цзинань,), [ORCID](#), Chexiangyu003@163.com

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Che Xianyu, PhD student at Shandong Jiaotong University (Jinan, Shandong Province, People's Republic of China), [ORCID](#), Chexiangyu003@163.com

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 01.10.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 14.10.2025

Принята к публикации / Accepted 28.10.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 69.057

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-78-94>

Перспективы применения ЛЕГО-блоков для возведения складских и емкостных сооружений агропромышленного комплекса

Чжан Юань , А.Ю. Прокопов

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

kalashnikov1947a1@gmail.com



EDN: IRYTYS

Аннотация

Введение. Основной задачей при проектировании складских и емкостных сооружений, строительные конструкции которых воспринимают горизонтальные эксплуатационные нагрузки, является не только обеспечение прочности, несущей способности и допустимых вертикальных деформаций (осадок), но и устойчивость и работоспособность при действии горизонтальных эксплуатационных нагрузок, вызванных боковым давлением от веса жидкостей или сыпучих материалов. Традиционные конструкции таких сооружений из монолитного железобетона или металла отличаются высокой материалоемкостью, трудоемкостью и продолжительностью возведения (монтажа). В статье рассмотрены перспективы строительства емкостных и складских сооружений из сборных быстровозводимых блоков различных конструкций.

Материалы и методы. Выполнен анализ применяемых конструкций и технологий возведения емкостных и складских сооружений, выявлены их основные недостатки и проблемы, возникающие на стадиях строительства и эксплуатации. Предложены новые конструкции ЛЕГО-блоков и технология монтажа быстровозводимых зданий и сооружений с использованием метода вертикального армирования кладки для восприятия горизонтальных эксплуатационных нагрузок. Выполнено математическое моделирование и расчет параметров напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) конструкций складских сооружений из ЛЕГО-блоков, возникающего при действии постоянных и временных эксплуатационных нагрузок от веса жидкостей или сыпучих материалов.

Результаты исследования. Разработаны новые конструкции ЛЕГО-блоков, предложена технология сооружения из них быстровозводимых складских и емкостных объектов, определены рациональные параметры вертикального армирования кладки из ЛЕГО-блоков в зависимости от высоты сооружения и уровня заполнения емкостей жидкими и сыпучими материалами.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании и строительстве емкостных и складских сооружений сельскохозяйственного и иного назначения. Внедрение таких конструкций предполагает увеличение темпов строительства, улучшение контроля качества возведения и научное обоснование мониторинга технического состояния в процессе эксплуатации объекта.

Ключевые слова: емкостные сооружения, склады, быстровозводимые конструкции, ЛЕГО-блоки, математическое моделирование

Для цитирования: Чжан Юань, Прокопов А.Ю. Перспективы применения ЛЕГО-блоков для возведения складских и емкостных сооружений агропромышленного комплекса. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):78–94. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-78-94>

Prospects for the Use of LEGO Blocks for the Construction of Warehouse and Storage Facilities of the Agro-Industrial Complex

Zhang Yuan , Albert Yu. Prokopov 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 kalashnikov1947a1@gmail.com

Abstract

Introduction. The major task in designing warehouse and storage facilities whose building structures experience horizontal operational loads is not only ensuring strength, load-bearing capacity and permissible vertical deformations (residue), but also stability and operability under the action of horizontal operational loads caused by lateral pressure from the weight of liquids or bulk materials. Traditional constructions of such structures made of monolithic reinforced concrete or metal are characterized by high material consumption, labor intensity and duration of construction (assembly). The article explores the prospects for constructing warehouse and storage facilities from prefabricated blocks of various structures.

Materials and Methods. Applied structures and technologies for constructing warehouse and storage facilities have been analyzed, their main disadvantages and issues arising at the stages of construction and operation have been identified. New structures of LEGO blocks and technology for the assembly of prefabricated buildings and structures using the method of vertical reinforcement of masonry for perceiving horizontal operational loads are set forth. Mathematical modeling and calculation of the parameters of the stress-strain state (hereinafter referred to as SSS) of warehouse structures made of LEGO blocks under the action of permanent and temporary operational loads from the weight of liquids or bulk materials has been conducted.

Research Results. New designs of LEGO blocks have been developed, a technology of constructing prefabricated warehouse and capacitive objects from them has been set forth, the regional parameters of vertical reinforcement of masonry from LEGO blocks have been identified depending on the height of the structure and the level of filling containers with liquid and bulk materials.

Discussion and Conclusion. The results are recommended for use in the design and construction of warehouse and storage facilities for agricultural and other purposes. The introduction of such structures implies an increase in the pace of construction, enhanced quality control of construction and a scientific justification for monitoring a technical condition during operation of a facility.

Keywords: storage facilities, warehouses, prefabricated structures, LEGO blocks, mathematical modeling

For citation: Yuan Zh, Prokopov AYu. Prospects for the Use of LEGO Blocks for the Construction of Warehouse and Storage Facilities of the Agro-Industrial Complex. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):78–94. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-78-94>

Введение. Проектирование и строительство складских и емкостных сооружений имеет ряд особенностей, которые определяются прежде всего их назначением и технологическими процессами, предусмотренными на таких объектах. В настоящей статье рассмотрим сооружения сельскохозяйственного назначения, предназначенные для длительного хранения сыпучих (зерно, семена, гранулированные удобрения, комбикорма и т.п.) и жидких (вода, меласса, минеральные удобрения типа КАС (карбамидно-аммиачная смесь)) материалов.

Для длительного хранения сыпучих материалов в сельском хозяйстве традиционно используют одноэтажные складские помещения каркасного типа, конструкции и инженерные системы которых рассчитаны на хранение определенного типа продукции, например, зернохранилища, овощекартофелехранилища, кукурузохранилища и др. Проектирование несущих конструкций таких складов зависит от способа хранения продукции и, соответственно, распределения эксплуатационных нагрузок. При хранении продукции (зерна, семян, овощей) насыпью на стены склада могут передаваться значительные горизонтальные нагрузки, которые зависят от высоты насыпи, удельного веса продукции, а также удельного сцепления и трения между частицами по аналогии с песком, щебнем и другими дисперсными грунтами (материалами).

Другим распространенным видом хранилищ сельскохозяйственной продукции являются бункерные (закромные) и силосные (башенные) резервуары. Для их изготовления или монтажа используют как монолитный железобетон или железобетонные блоки, так и стальные конструкции: металлические листы, тонколистовые волнистые стальные секции и др.

Известны научные исследования в области проектирования и строительства складских и емкостных сооружений, в т. ч. сельскохозяйственного назначения, результаты которых изложены в диссертациях. Гольденберга Л.И [1], Сазанбаева С.К. [2], Стрельцова И.В. [3], Карсункина В.В. [4], Ращепкина С.В. [5], Фейденгольда В.Б. [6], Марковича А.С. [7] и др.

В указанных работах выполнены исследования работы конструкций складских и емкостных сооружений при различных видах нагрузок, возникающих как в процессе строительства, так и при эксплуатации объектов, включая процессы загрузки и выгрузки, учет технологических особенностей, климатических факторов и др. При этом использованы методы теоретической и строительной механики. На основании выполненных исследований разработаны рациональные конструкции складов, силосов, бункеров, элеваторов и других объектов сельскохозяйственного назначения, а также правила и рекомендации по безопасной эксплуатации таких объектов с учетом особенностей происходящих в них технологических процессов и требований к обеспечению климатических параметров (температуры, влажности, подвижности воздуха).

На современном этапе к таким объектам предъявляются повышенные технико-экономические и эксплуатационные требования, в т. ч. обеспечение высокой эффективности и надежности на протяжении всего жизненного цикла объекта. Поэтому разработка новых конструктивных и технологических решений в проектировании, строительстве, эксплуатации и демонтаже складских и емкостных сооружений для агропромышленного комплекса (АПК) является актуальной научной и практической задачей.

Целью настоящей статьи является анализ достоинств и недостатков существующих складских и емкостных сооружений, применяемых в агропромышленном комплексе, и разработка новых конструктивных и технологических решений на основе применения быстровозводимых ЛЕГО-блоков, обеспечивающих высокую эффективность строительства и безопасность длительной эксплуатации таких объектов.

Материалы и методы. К основным методам исследований, использованным авторами при подготовке статьи, относятся:

- анализ результатов современных научных исследований и изучение отечественного и зарубежного опыта проектирования, строительства и эксплуатации складских и емкостных сооружений;
- выявление достоинств и недостатков применяемых конструкций, оценка современных требований к таким объектам и определение перспективных направлений их совершенствования, включая изучение возможности использования быстровозводимых ЛЕГО-блоков для возведения несущих конструкций складов и резервуаров;
- конструкторская работа по разработке и обоснованию параметров универсальных ЛЕГО-блоков, позволяющих создавать армированную кладку несущих конструкций складов и резервуаров;
- создание математических моделей складских сооружений, возводимых из ЛЕГО-блоков, и исследование параметров их НДС, возникающего при действии сочетаний постоянных и эксплуатационных нагрузок от бокового давления хрупких и жидкокомпозитных материалов при варьировании высоты сооружения, высоты насыпи (уровня жидкости), физико-механических свойств сыпучих и плотности жидкокомпозитных материалов;
- разработка рекомендаций по конструированию несущих стен складов и резервуаров (высота, толщина, армирование и др.) в зависимости от свойств и высоты засыпки (заливки) хранимой продукции.

Анализ применяемых в настоящее время конструкций складских помещений сельскохозяйственного назначения показывает, что широкое распространение получили каркасные одноэтажные здания с одним, двумя и более (реже) пролетами, состоящие из столбчатых фундаментов, колонн, балок или ферм перекрытия, ригелей, прогонов, наклонных связей и т.д. Такие здания предусматривают, как правило, внешние ограждающие конструкции из сэндвич-панелей, профнастила, других облегченных элементов, которые не являются несущими и не способны воспринимать горизонтальную эксплуатационную нагрузку от бокового давления насыпного материала или продукции. В этом случае внутри таких складов приходится возводить дополнительные несущие вертикальные стены (монолитные или сборные), разделяющие различные материалы или сорта складируемой продукции и воспринимающие боковое давление (рис. 1 *а*). Возможен также комбинированный вариант устройства металлокаркаса и возведения до определенной высоты засыпки сыпучих материалов (продукции) монолитных железобетонных стен (рис. 1 *б*). Это повышает материалоемкость, трудоемкость и стоимость возведения складских сооружений. При небольшой высоте засыпки по краям здания боковую нагрузку могут воспринимать и стенные панели, передающие эксплуатационную нагрузку через несущие металлические колонны с контрфорсами и дополнительные связи (рис. 1 *в*).

Аналогичные конструктивные решения используются и в зарубежной практике строительства и эксплуатации складских помещений агропромышленного комплекса. На рис. 2 приведены типовые здания, возводимые фирмой Accu-Steel, США [8], и предназначенные для хранения сыпучей сельскохозяйственной продукции. Несущие стены, воспринимающие горизонтальное давление от насыпного материала, устраивают небольшой высоты из стенных панелей (рис. 2 *а*), кладки — из железобетонных блоков (рис. 2 *б*) или ЛЕГО-блоков в сочетании с контрфорсами, позволяющими увеличить боковую нагрузку.



Рис. 1. Примеры отечественных металлокаркасных конструкций складских помещений для хранения сельскохозяйственной продукции: *а* — со сборными внутренними стенами, воспринимающими горизонтальную эксплуатационную нагрузку; *б* — с внешними несущими железобетонными стенами на высоту засыпки; *в* — со стеновыми панелями, стержневыми контрфорсами и дополнительными связями



Рис. 2. Примеры типовых зданий для агропромышленного комплекса фирмы Accu-Steel, США: *а* — сводчатой формы из металлокаркаса и тканевого покрытия с невысокими боковыми панелями (серия Advantage); *б* — с двухскатной кровлей из металлокаркаса, внешних и внутренних стен из железобетонных блоков для восприятия эксплуатационной горизонтальной нагрузки (серия Crossover); *в* — параболической формы каркаса из металлических ферм и невысоких несущих стен из железобетонных ЛЕГО-блоков с такими же контрфорсами (серия Integrity) [8]

Решения складских помещений и емкостных сооружений с вертикальными монолитными железобетонными стенами позволяют обеспечить одновременно несущую способность и устойчивость при действии боковых нагрузок и также находят применение в агропромышленном комплексе в виде хранилищ как силосного типа, так и складского типа (с напольным хранением) [9]. Однако они имеют также ряд недостатков, обусловленных конструктивными, технологическими и эксплуатационными факторами. К основным проблемам, возникающим при возведении монолитных железобетонных складских и емкостных сооружений, относятся: плохое или нестабильное качество бетона (ярко выраженная «слоистость» или «щебенистость», множество незаполненных полостей и явно непровибрированные слои), вследствие чего возникает сминание стенового бетона в горизонтальных сечениях и, как следствие, снижение срока службы и опасность быстрого наступления аварийного состояния. Кроме того, строительство таких объектов требует очень высокого качества, которое могут обеспечить немногие строительные организации с большим опытом работы в этой сфере. Железобетонные строения более трудоемки и на 20–30 % дороже, например, зернохранилищ с круглыми металлическими силосами большого диаметра, которыми их стали заменять [10].

Металлические емкости (силосы, бункеры, резервуары и др.) также находят широкое применение в агропромышленном комплексе для хранения как сыпучих, так и жидких продуктов. Наряду с неоспоримыми достоинствами таких конструкций (компактность вследствие вертикального расположения, прочность, быстрый монтаж, удобство эксплуатации при загрузке-разгрузке) они обладают целым рядом недостатков, в частности:

- высокая теплопроводность металла, которая может неблагоприятно сказываться на хранении продукции, например, зерна;
- опасность коррозионного износа металла и необходимость постоянной антакоррозийной защиты при эксплуатации;
- конденсация влаги на внутренних стенах, что может приводить к порче зерна, его самосогреванию и потере его потребительских, фуражных и семенных свойств;
- высокая чувствительность вертикальных резервуаров к неравномерным осадкам основания. Из практики авторов настоящей статьи известно несколько случаев кренов и сверхпроектных деформаций металлических резервуаров, используемых для хранения жидкых пищевых продуктов, вследствие чего их дальнейшая эксплуатация стала невозможной без дорогостоящих мер по выравниванию кренов и усилению оснований и фундаментов [11]. Также имеется необходимость постоянного геотехнического мониторинга [12] с учетом взаимного влияния как самих резервуаров друг на друга, так и окружающей застройки [13];
- постоянно изменяющееся вследствие загрузки-разгрузки напряженно-деформированное состояние металлической оболочки резервуаров и абсолютно гибкой системы «металлическое днище — грунтовое основание» для типовых резервуаров с кольцевыми фундаментами, возводимыми только под стены [14].

На основании вышеизложенного анализа достоинств и недостатков существующих конструкций складских и емкостных сооружений для агропромышленного комплекса можно сделать следующие выводы:

- большинство применяемых для данной цели каркасных зданий существенно ограничены по высоте из-за невозможности восприятия существенных горизонтальных эксплуатационных нагрузок, обусловленных боковым давлением насыпных продуктов или материалов (зерна, картофеля, удобрений и т.д.);
- задача разработки эффективных конструктивных решений, обеспечивающих высокие темпы строительства и надежную эксплуатацию при значительном боковом давлении на несущие стены, является актуальной;
- перспективным направлением совершенствования конструкций зданий агропромышленного комплекса является применение быстровозводимых бетонных ЛЕГО-блоков;
- основной проблемой внедрения таких конструкций является недостаточная несущая способность при работе на горизонтальные эксплуатационные нагрузки, так как большинство таких блоков укладываются «на сухую» и не имеют армирования кладки.

В настоящей работе предпринята попытка разработки и научного обоснования параметров армированной кладки из бетонных ЛЕГО-блоков, которая позволила бы строить и эксплуатировать высокие складские помещения с большой степенью загрузки (на большую высоту засыпки) при сохранении устойчивости и надежности в течение всего жизненного цикла объекта.

Результаты исследования. В настоящее время бетонные ЛЕГО-блоки производятся различными фирмами как в России, так и за рубежом.

Известен положительный опыт проектирования и строительства зданий из ЛЕГО-блоков (рис. 3 а) и ЛЕГО-кирпичей (рис. 3 б) в условиях Сибири [15].

Размер обычного блока: длина – 500 мм; высота – 220 мм; ширина – 250 мм. Специальная геометрия фасонных блоков обеспечивает удобный монтаж и надежное соединение.

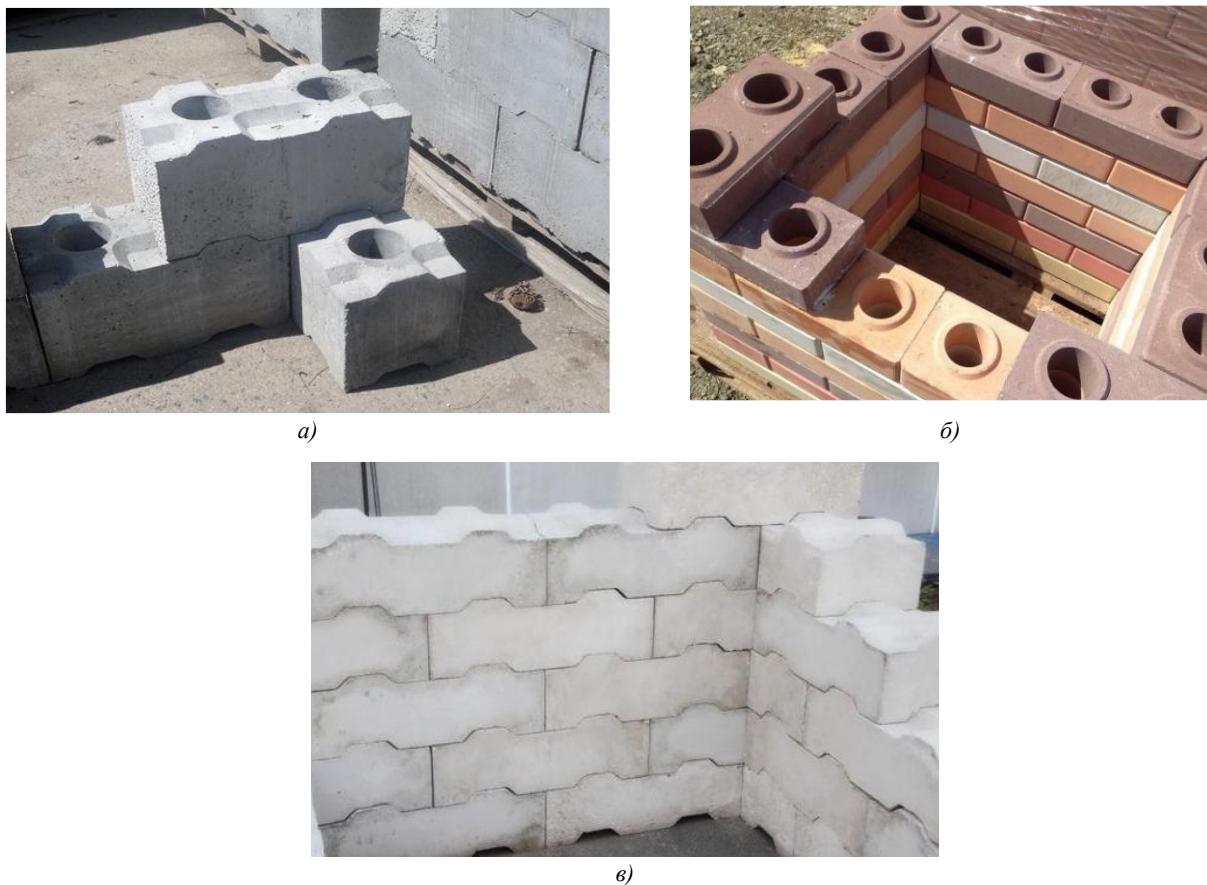


Рис. 3. Быстроуводимые конструкции, применяемые в Сибири: *а* — ЛЕГО-блоки, *б* — ЛЕГО-кирпичи; *в* — пример кладки из ЛЕГО-блоков из полистиролбетона без раствора [15]

В зависимости от типа строения рекомендуются три различных технологии строительства из ЛЕГО-блоков [15]:

- укладка без раствора;
- укладка без раствора с армированием;
- укладка на раствор.

В качестве основных недостатков таких блоков авторы [15] выделяют невозможность возведения высоких зданий и сооружений, недостаточную апробацию применения таких блоков в практике строительства, а также отсутствие нормативной базы.

Инженерно-строительной производственной группой компаний IS GROUP выпускаются фундаментные ЛЕГО-блоки серии ФБС (рис. 4) [16].

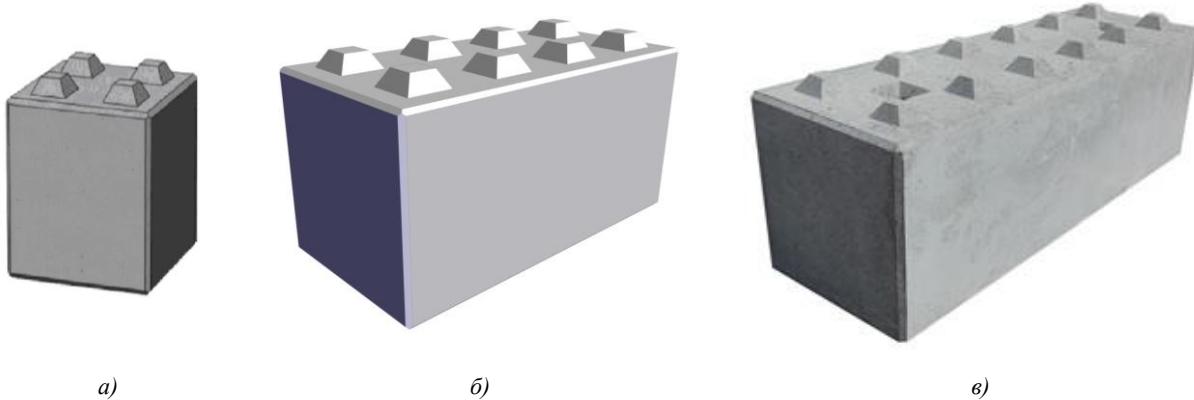


Рис. 4. Фундаментные ЛЕГО-блоки холдинга IS GROUP [16]: *а* — ФБС 6-6-6; *б* — ФБС 12-6-6; *в* — ФБС 24-6-6 [16]

В качестве основных преимуществ таких блоков их производители отмечают следующие [16]:

- быстрое строительство — конструкция площадью около 50 м^2 может быть возведена всего за один час;
- отсутствие необходимости в связующем растворе или армировании — система соединения «шпунт-паз» не только удобна, но и позволяет сэкономить на покупке раствора и арматуры;

- многоократность — ЛЕГО-блоки легко собираются и легко разбираются. Их можно использовать многоократно и применять на разных объектах и для разных целей;
- надежное сцепление — строительные блоки отличаются высокой точностью сцепления, что гарантирует прочность конструкции на протяжении всего срока службы и позволяет выдерживать широкий спектр нагрузок и воздействий;
- независимость от времени года — из ЛЕГО-блоков можно строить независимо от времени года и погодных условий. Сам продукт и технологии его сборки являются «погодоустойчивыми». Ему не нужно ждать благоприятной погоды или особых температур. А это означает отсутствие простоев и потерь денег;
- ЛЕГО-блоки идеально подходят для строительства быстровозводимых временных зданий и малонагруженных конструкций. Это современная и высокоэстетичная европейская технология, которая обеспечивает качественный результат без больших затрат. Нужное количество блоков приобретается один раз и повторно используется после сноса.

В Ростовской области бетонные ЛЕГО-блоки различных типоразмеров производят:

- ООО «ЖелезобетонИнвест» (г. Ростов-на-Дону) — 21 типоразмер фундаментных блоков ФБШ [17];
- ООО «Торговый дом «Минерал» (п. Целина) — 10 типоразмеров универсальных бетонных ЛЕГО-блоков [18].

ООО «ТД Минерал» в 2025 г. разработало Технические условия ТУ 23.61.12-001-86245892-2025 «Бетонные блоки типа «Лего», согласно которым блоки изготавливают из тяжелого бетона по ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые» со следующими характеристиками:

- класс бетона по прочности на сжатие — не менее В20;
- водонепроницаемость — W4;
- морозостойкость — F1 100 по 1-му базовому методу.

В качестве областей применения этих блоков в ТУ указаны:

- зонирование помещений (возведение отсеков и ниш для раздельного хранения, например, сельхозпродукции в пределах одного помещения);
- прочная несъемная опалубка при монолитном строительстве;
- строительство стен и подвалов, внутренних перегородок;
- возведение подпорных стен;
- строительство складских и хозяйственных помещений.

В 2024–2025 гг. на территории АО «Целинскагрохимсервис» (п. Целина Ростовской области) из ЛЕГО-блоков ООО «ТД Минерал» было возведено одноэтажное здание склада для хранения сельхозпродукции (бесподвальное, пятиугольное в плане, с габаритными размерами 96,5×48,5 м) со следующими характеристиками:

- максимальная высота здания — 14,0 м;
- уровень ответственности — нормальный (II);
- степень долговечности — II (не менее 50 лет);
- степень огнестойкости — II;
- площадь застройки — 4347 м².

Сотрудниками и аспирантами кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов (ИГОФ) ДГТУ по заказу АО «Целинскагрохимсервис» выполнялось обследование технического состояния здания (на этапе незавершенного строительства) и научно-техническое сопровождение его строительства. Основной целью Заказчика являлось установление возможности загружения стен из ЛЕГО-блоков горизонтальными эксплуатационными нагрузками от насыпных и жидких материалов.

Общий вид (отдельные фасады) и элементы конструкций строящегося здания склада приведены на рис. 5.

В рамках обследования было установлено следующее. Конструктивная схема — каркасная: несущие комбинированные колонны (нижняя часть — железобетонные, верхняя — металлические); металлические прогоны и стропильные фермы покрытия. Пространственную жесткость здания обеспечивает совместная работа колонн из блоков LEGO с монолитными сердечниками, монолитного железобетонного пояса на высоте 6,0 м по всему периметру здания и металлических стропильных ферм покрытия.

В связи со сложностью конфигурации здания, наличием большого количества элементов с разной жесткостью, неоднородностью грунтового основания для исследования использован метод конечных элементов, хорошо апробированный при решении аналогичных задач в объемной постановке [19, 20]. Для оценки НДС конструкций от действия сочетаний постоянных и временных нагрузок была разработана трехмерная конечно-элементная модель обследуемого здания. Для построения исходной геометрической модели здания приняты конструктивные решения с размерами элементов, установленными в процессе обмерных работ. Общий вид 3D-модели здания склада показан на рис. 6.



Рис. 5. Обследуемое здание строящегося склада сельхозпродукции с наружными стенами из ЛЕГО-блоков (п. Целина, февраль 2025 г.): а — фасад в осях А–Ж; б — фасад в осях 17–1; в — элементы каркаса

В модели учтены все несущие элементы: колонны, стены, металлические фермы каркаса с точным назначением сечений стержней согласно выполненному обследованию.

На первом этапе моделирования установлена геометрическая изменяемость схемы при существующем конструктивном решении ферм. В этой связи рассмотрено 4 варианта усиления конструкций дополнительными

стержневыми элементами, и рекомендован 1-й вариант усиления — устройство дополнительных стержней-раскосов между нижним поясом ферм и металлическим надколонником, а также устройство дополнительных связей между фермами для повышения общей жесткости каркаса. При этом задавались только постоянные нагрузки, снеговая и ветровая.

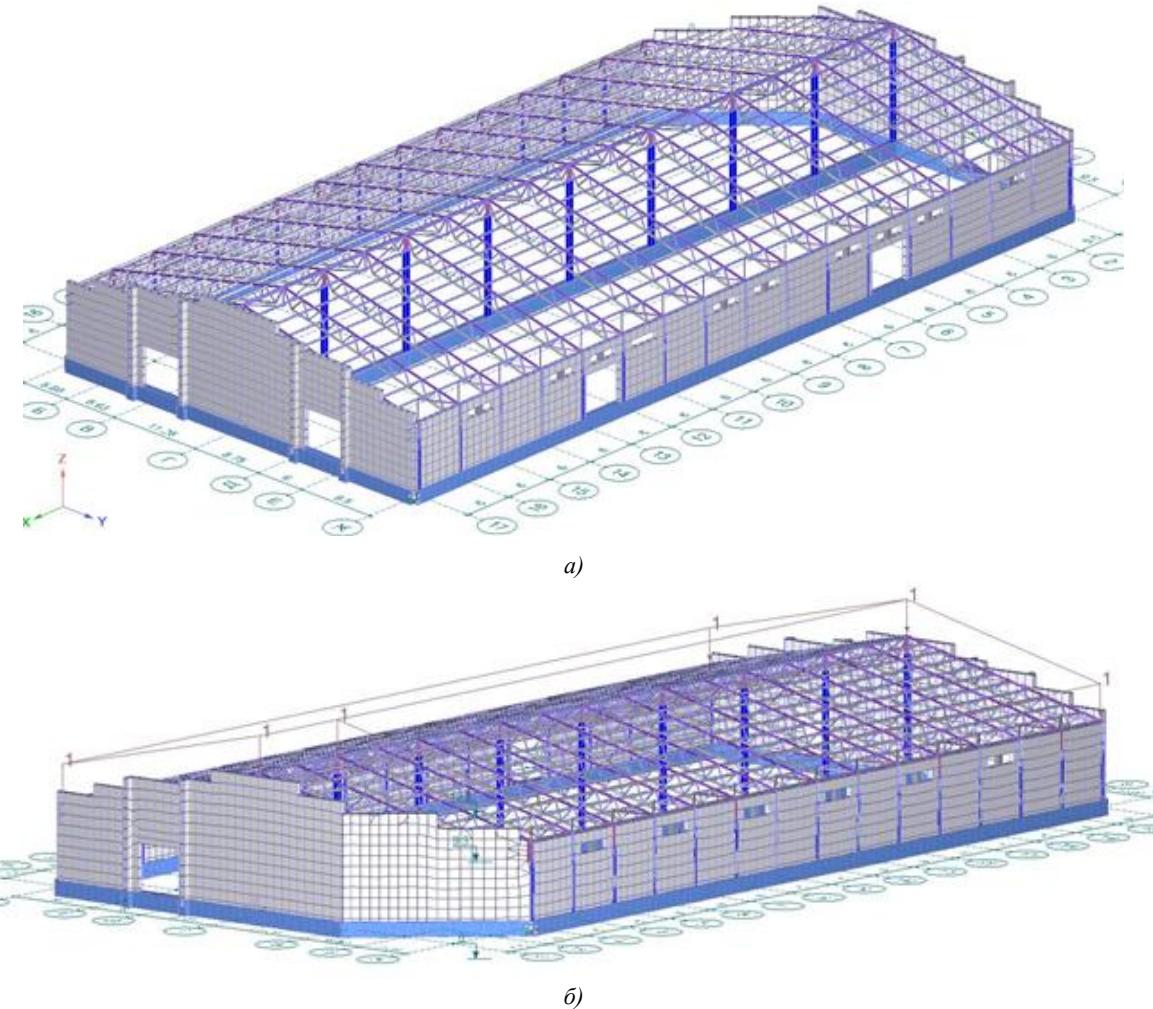


Рис. 6. Общий вид 3D-модели здания: *а* — вид со стороны фасадов А–Ж и 17–1; *б* — вид со стороны фасадов Ж–А и 1–17

На 2-м этапе моделирования выполнялась проверка работоспособности и устойчивости конструкции от горизонтальных эксплуатационных нагрузок, в результате чего установлена потеря устойчивости конструкций неармированных стен из ЛЕГО-блоков даже при минимальном загружении насыпным материалом (зерном).

В связи с невозможностью использования неармированных стен из бетонных ЛЕГО-блоков для восприятия расчетных эксплуатационных нагрузок в рамках научно-технического сотрудничества с АО «Целинскагрохимсервис» по его заказу сотрудниками кафедры ИГОФ ДГТУ была выполнена научно-исследовательская работа, которая включала:

- изучение положительного и негативного опыта строительства и эксплуатации зданий и сооружений из ЛЕГО-блоков»;
- анализ достоинств и недостатков известных ЛЕГО-блоков, а также построенных из них зданий и сооружений;
- разработку конструктивных решений, направленных на совершенствование ЛЕГО-блоков с целью возможности армирования кладки из данных блоков;
- анализ эксплуатационных нагрузок, действующих на несущие стены от хранения различных материалов и продуктов: жидкого удобрения КАС и зерна;
- разработку компьютерной модели стены из ЛЕГО-блоков в ПК «Лира 10» и оценку напряженно-деформированного состояния при действии различных нагрузок и различной высоте стен;
- разработку рекомендаций по проектированию несущих армированных стен из ЛЕГО-блоков.

Основной целью исследования является научное обоснование и разработка технических решений, позволяющих использовать бетонные ЛЕГО-блоки в несущих конструкциях, воспринимающих горизонтальные эксплуатационные нагрузки.

В связи с возможностью хранения внутри помещений (емкостей) из ЛЕГО-блоков жидких и сыпучих материалов с различной плотностью ρ , $\text{т}/\text{м}^3$, расчет и подбор армирования кладки из ЛЕГО-блоков выполнялся для стен высотой до 15 м при эксплуатационных нагрузках высотой до 13 м для 2 различных вариантов:

- от веса удобрения КАС-32 ($\rho = 1,32 \text{ т}/\text{м}^3$);
- от веса зерна ($\rho = 0,8 \text{ т}/\text{м}^3$) с учетом динамических нагрузок от погрузчика.

В результате анализа отечественного [15–18, 23] и зарубежного [21, 22, 24–26] опыта проектирования и строительства зданий и сооружений из ЛЕГО-блоков, созданных в том числе с помощью 3D-печати [24], было установлено, что главным недостатком кладки из таких блоков является ее низкая сопротивляемость горизонтальным (сдвигающим и опрокидывающим) нагрузкам, которые могут возникать при эксплуатации зданий и сооружений, предназначенных для хранения сыпучих и жидких материалов.

В этом случае в кладке возникают растягивающие напряжения, которые приводят к сверхнормативным деформациям и даже полному разрушению таких конструкций, что подтверждается негативным опытом их эксплуатации.

Армирование отдельных блоков позволит повысить прочность каждого блока, но не прочность их соединения между собой.

Таким образом, основным направлением совершенствования кладки из бетонных ЛЕГО-блоков является ее армирование вертикальными арматурными стержнями, соединяющими несколько бетонных блоков по высоте. Такое решение позволяет существенно повысить прочность кладки и создает благоприятные условия для восприятия горизонтальных эксплуатационных нагрузок от веса сыпучих или жидких материалов.

Для возможности армирования кладки в ЛЕГО-блоках при их изготовлении должны быть предусмотрены сплошные вертикальные отверстия, которые могут быть образованы путем размещения в форме извлекаемых стержней или труб заданного диаметра.

При конструировании ЛЕГО-блоков, обеспечивающих возможность их вертикального армирования, важной инженерной задачей является подбор рационального размещения отверстий в блоке. При решении этой задачи нами учитывались следующие факторы:

- геометрические параметры блоков и расстояния в ряду между осями соседних соединений «шип-паз» (250 мм);
- защитный слой бетона до рабочей арматуры, принимаемый согласно таблице 2 ГОСТ 13015-2015 «Изделия бетонные и железобетонные для строительства», от 15 до 35 мм в зависимости от условий эксплуатации конструкций здания;
- распределение напряжений в кладке при действии горизонтальных эксплуатационных нагрузок.

Так как максимальные растягивающие напряжения в кладке от горизонтальных эксплуатационных нагрузок будут возникать в верхних блоках со стороны действия нагрузки (изнутри здания или сооружения), то арматура и соответственно вертикальные отверстия в блоках под нее должны быть смещены в сторону действия нагрузки.

С учетом всех вышеперечисленных факторов предлагаемая конструкция усовершенствованного ЛЕГО-блока предусматривает вертикальные отверстия диаметром 50 мм, расположенные на расстоянии 250 мм друг от друга. Расстояние от оси отверстий до внутренней боковой грани блока — 125 мм, таким образом защитный слой бетона будет составлять 100 мм ± 15 мм.

Пример конструкции такого усовершенствованного ЛЕГО-блока для стандартного типоразмера 500×1500×600 мм приведен на рис. 7.

Формирование вертикальных отверстий для армирования кладки в блоках других типоразмеров выполняется аналогично приведенному чертежу.

Для разработанных ЛЕГО-блоков выполнен расчет НДС стеновых конструкций и подбор требуемого армирования. Конструкции стен воспринимают два воздействия: собственный вес и боковое давление от полезной нагрузки.

Полезная нагрузка представлена гидростатическим давлением жидкого удобрения КАС-32 либо давлением сыпучей среды — зерна (пшеницы).

Стены выполнены из кладки бетонных ЛЕГО-блоков на цементно-песчаном растворе. Толщина блоков — 500 мм.

Класс бетона, принятый для расчета — B25.

В таблице 1 приведены физико-механические характеристики зерна, принятые для моделирования нагрузок и расчета. Поскольку наиболее невыгодной нагрузкой является нагрузка от пшеницы, принято решение выполнить расчет на воздействие от данного типа сыпучей среды.

Боковое давление на стену от сыпучей среды определяем по формуле:

$$P = \gamma \cdot h \cdot \operatorname{tg}^2(45^\circ - \phi/2),$$

где γ — удельный вес пшеницы, $\text{kН}/\text{м}^3$; h — высота насыпи, м; ϕ — угол внутреннего трения, град.

Результаты расчета давления на стену от веса зерна в зависимости от высоты насыпи сведены в таблицу 2.

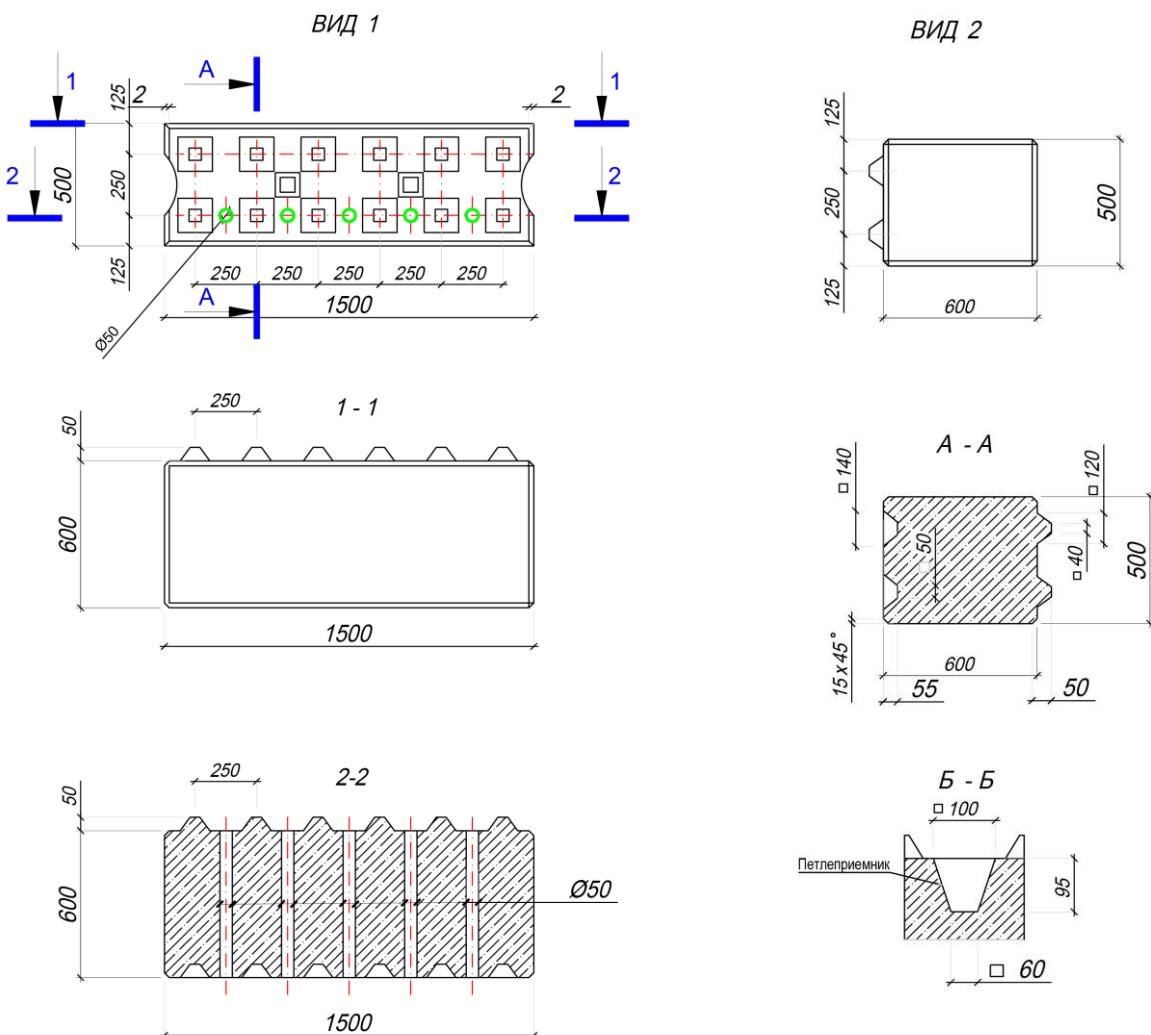


Рис. 7. Конструкция усовершенствованного ЛЕГО-блока для формирования армированной кладки

Таблица 1

Физико-механические характеристики зерна

Зерновой материал	Средний диаметр зерен d , мм	Угол внешнего трения ψ , °	Угол внутреннего трения ϕ , °	Влажность, %	Плотность ρ , кг/м ³
Пшеница	3,8	22,1	17,5	14,4	808
Подсолнечник	5,0	26,6	16,7	14,7	450
Кукуруза	7,1	22,4	18,4	16,6	783
Просо	2,2	20,2	15,1	15,0	770

Таблица 2

Расчетное давление на стену от веса зерна

Высота насыпи, м	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Максимальное давление у нижней грани, кПа	13	17	22	26	30	34	39	43	47	52	56	60	65

Формула для расчета давления от жидкого удобрения КАС-32:

$$P = \gamma \cdot h,$$

где γ — удельный вес жидкого удобрения КАС-32, кН/м³; h — высота гидростатического столба, м.

Результаты расчета давления на стену от жидкого удобрения КАС-32 в зависимости от высоты гидростатического столба сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Давление на стену от КАС-32

Высота гидростатического столба, м	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Максимальное давление у нижней грани, кПа	39,6	52,8	66,0	79,2	92,4	105,6	118,8	132,0	145,2	158,4	171,6	184,8	198,0

Шаг арматуры в блоке — 250 мм с привязкой к внешней грани — 100 мм.

Произведен расчет нагрузок на стены от гидростатического давления удобрения КАС-32 высотой столба жидкости от 3 до 7 м для стен высотой от 3 до 15 м. Сводные результаты максимальных перемещений стены от действия эксплуатационных нагрузок в сравнении с предельно допустимыми перемещениями, мм (по таблице Л2 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»), приведены в таблице 4.

Как следует из таблицы 4, высота гидростатического столба жидкости (КАС-32) не должна превышать 6 м. При большей высоте жидкости деформации конструкций превышают допустимые для любой высоты стены (7–15 м). Красным цветом в таблицах 4 и 5 выделены недопустимые по СП 20.13330.2016 значения горизонтальных перемещений.

Таблица 4

Сводная таблица горизонтальных перемещений конструкций стены от действия жидкого удобрения КАС-32

		Максимальные горизонтальные перемещения, мм												
		при высоте конструкции стены, м:												
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Высота гидростатического столба КАС-32, м	3	0,37	0,52	0,67	0,83	0,98	1,13	1,29	1,44	1,59	1,75	1,9	2,05	2,21
	4		1,55	2,04	2,52	3,01	3,49	3,98	4,47	4,95	5,44	5,92	6,41	6,89
	5			4,74	5,93	7,12	8,3	9,49	10,7	11,9	13,1	14,3	15,4	16,6
	6				11,8	14,3	16,7	19,2	21,7	24,1	26,6	29,1	31,5	34
	7					25,6	30,1	34,7	39,3	43,9	48,4	52	57,4	62,2
Предельно допустимые горизонтальные перемещения, мм (СП 20.13330.2016)		10	13,3	16,7	20	23,3	26,7	30	33,3	36,7	40	43,3	46,7	50

Произведен расчет нагрузок на стены от бокового давления насыпи зерна высотой от 3 до 9 м для стен высотой от 3 до 15 м. Сводные результаты максимальных перемещений стены от действия эксплуатационных нагрузок в сравнении с предельно допустимыми перемещениями, мм (по таблице Л2 СП 20.13330.2016), приведены в таблице 5.

Таблица 5

Сводная таблица горизонтальных перемещений конструкций стены от действия зерна

		Максимальные горизонтальные перемещения, мм												
		при высоте конструкции стены, м:												
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Высота насыпи зерна, м	3	0,15	0,21	0,27	0,33	0,39	0,45	0,51	0,59	0,63	0,69	0,75	0,81	0,87
	4		0,6	0,79	0,97	1,16	1,35	1,54	1,73	1,91	2,1	2,29	2,48	2,66
	5			1,9	2,4	2,9	3,3	3,8	4,3	4,8	5,2	5,7	6,2	6,7
	6				4,7	5,6	6,6	7,6	8,5	9,5	10,5	11,5	12,4	13,4
	7					9,96	11,7	13,5	15,3	17,1	18,9	20,7	22,4	24,2
Предельно допустимые горизонтальные перемещения, мм (С П20.13330.2016)	8						19,3	22,3	25,3	28,3	31,3	34,4	37,4	40,4
	9							35,4	40,4	45,3	50,2	55,2	60,1	65
Предельно допустимые горизонтальные перемещения, мм (С П20.13330.2016)		10	13,3	16,7	20	23,3	26,7	30	33,3	36,7	40	43,3	46,7	50

Как следует из таблицы 5, высота насыпи зерна не должна превышать 8 м. При большей высоте насыпи зерна деформации конструкций превышают допустимые для любой высоты стены (9–15 м).

В результате моделирования всех возможных сочетаний высоты стены и высоты действия нагрузок от жидкого удобрения КАС-32 и насыпи зерна рассчитаны рекомендуемые параметры армирования кладки, приведенные соответственно в таблицах 6 и 7. В данных таблицах указаны как значения суммарной площади арматуры на 1 п. м. конструкции стены, так и конкретные значения диаметров арматурных стержней, рассчитанные исходя из шага армирования 250 мм (т. е. 4 стержня на 1 п. м.).

Таблица 6

Сводная таблица требуемого армирования у растянутой грани конструкций стены от действия жидкого удобрения КАС-32, см² на 1 п. м. (при шаге 250 мм)

Высота гидростатического столба КАС-32, м		Требуемые площадь армирования, см ² , и диаметр арматуры, мм												
		при высоте конструкции стены, м:												
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	2,60 Ø10	2,39 Ø10	2,14 Ø10	1,96 Ø8	1,78 Ø8	1,59 Ø8	1,41 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8
4		7,49 Ø16	7,57 Ø16	7,29 Ø16	7,02 Ø16	6,78 Ø16	6,87 Ø16	6,63 Ø16	6,21 Ø16	6,09 Ø14	5,91 Ø14	5,73 Ø14	5,57 Ø14	
5			17,1 Ø25	16,7 Ø25	17,0 Ø25	16,6 Ø25	16,9 Ø25	16,5 Ø25	16,1 Ø25	16,5 Ø25	16,1 Ø25	15,7 Ø25	15,3 Ø25	
6				35,1 Ø36	33,9 Ø36	35,0 Ø36	34,3 Ø36	33,7 Ø36	34,8 Ø36	34,2 Ø36	33,5 Ø36	34,6 Ø36	34,0 Ø36	
7					62,0	60,9	62,9	61,8	60,7	62,5	61,2	59,9	61,4	
Предельно допустимые горизонтальные перемещения, мм (таблица Л2 СП 20.13330.2016)		10	13,3	16,7	20	23,3	26,7	30	33,3	36,7	40	43,3	46,7	50

Примечание: исходя из минимального процента армирования, рекомендуется применять стержни диаметром не менее 14 мм.

Таблица 7

Сводная таблица требуемого армирования у растянутой грани конструкций стены от действия зерна, см² на 1 п. м. (при шаге 250 мм)

Высота насыпи зерна, м		Требуемые площадь армирования, см ² , и диаметр арматуры, мм												
		при высоте конструкции стены, м:												
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8
4		2,21 Ø10	1,94 Ø8	1,76 Ø8	1,57 Ø8	1,4 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8						
5			5,53 Ø14	5,32 Ø14	5,11 Ø14	4,92 Ø14	4,74 Ø14	4,56 Ø14	4,38 Ø12	4,21 Ø12	4,04 Ø12	3,89 Ø12	3,70 Ø12	
6				10,6 Ø20	10,6 Ø20	10,4 Ø20	10,1 Ø18	10,3 Ø20	9,94 Ø18	9,65 Ø18	9,83 Ø18	9,55 Ø18	9,06 Ø18	
7					18,8 Ø25	18,3 Ø25	18,7 Ø25	18,3 Ø25	17,8 Ø25	18,3 Ø25	17,8 Ø25	17,4 Ø25	17,9 Ø25	
8						32,1 Ø32	31,5 Ø32	30,9 Ø32	30,3 Ø32	31,2 Ø32	30,7 Ø32	30,0 Ø32	31,0 Ø32	
9							52,3	51,0	52,3	50,8	52,1	51,4	50,7	
Предельно допустимые горизонтальные перемещения, мм (таблица Л2 СП 20.13330.2016)		10	13,3	16,7	20	23,3	26,7	30	33,3	36,7	40	43,3	46,7	50

Примечание: исходя из минимального процента армирования, рекомендуется применять стержни диаметром не менее 14 мм.

Для соединения арматурных стержней в кладке из блоков «ЛЕГО» рекомендуются следующие возможные соединения (по СП 63:13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции»): муфтовое резьбовое; муфтовое опрессованное; сварное внахлест по ГОСТ 14098-2014 «Соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций» (тип С23). Длина стыка арматуры должна приниматься в соответствии с СП 63.13330.2018 и рекомендациями завода-изготовителя муфт.

Заключение. На основе анализа объемно-планировочных и архитектурных решений складских и емкостных зданий и сооружений АПК установлено, что как в отечественной, так и зарубежной практике находят преимущественное применение одноэтажные складские помещения каркасного типа, бункерные (закромные) и сilosные (башенные) резервуары. Основной особенностью эксплуатации таких объектов являются изменяющиеся во времени горизонтальные эксплуатационные нагрузки от веса жидкостей или насыпных материалов. Выполненный

анализ достоинств и недостатков существующих сельскохозяйственных складских и емкостных сооружений свидетельствует об актуальности разработки новых высокоэффективных, быстровозводимых, надежных и безопасных в течение всего жизненного цикла конструктивных и технологических решений таких объектов. На примере строящегося здания склада сельхозпродукции в п. Целина Ростовской области выполнено обследование его технического состояния, обмерные работы, изучение инженерно-геологических условий, и разработана математической 3D-модель, на которой исследовано НДС конструкций на действующие нагрузки. В результате моделирования установлено, что кладка из неармированных ЛЕГО-блоков не обеспечивает прочность конструкции даже при минимальной высоте загружения насыпным или жидким материалом.

Основным направлением совершенствования кладки из бетонных блоков «ЛЕГО» является ее армирование вертикальными арматурными стержнями, соединяющими несколько бетонных блоков по высоте. Такое решение позволяет существенно повысить прочность кладки и создает благоприятные условия для восприятия горизонтальных эксплуатационных нагрузок от веса сыпучих или жидких материалов. В этой связи авторами статьи усовершенствована конструкция бетонных ЛЕГО-блоков, производимых ООО «ТД Минерал» по ТУ 23.61.12-001-86245892-2025 «Бетонные блоки типа «Лего». Предлагаемая конструкция усовершенствованного блока «ЛЕГО» предусматривает вертикальные отверстия диаметром 50 мм, расположенные на расстоянии 250 мм друг от друга. Расстояние от оси отверстий до внутренней боковой грани блока — 125 мм, таким образом защитный слой бетона будет составлять $100 \text{ mm} \pm 15 \text{ mm}$. Блоки в кладке должны ориентироваться армированной стороной в направлении действия горизонтальной эксплуатационной нагрузки со стороны сыпучего или жидкого материала. На математических моделях подобраны рациональные параметры армирования кладки из ЛЕГО-блоков для различных сочетаний высоты склада и высоты сыпучего материала (зерна) или плотной жидкости (удобрение КАС-32).

Представленные в статье результаты могут быть широко использованы при проектировании и строительстве складских и емкостных сооружений АПК, при этом основными достоинствами внедрения предложенных конструктивных решений армированной кладки из ЛЕГО-блоков являются: высокие темпы строительства, технологичность, возможность увеличения горизонтальных нагрузок от сыпучих или жидких материалов на внешние несущие стены, более рациональное использование внутреннего объема помещений и др.

Новое конструктивное решение позволяет армировать ЛЕГО-блоки и строить склады высотой до 10–15 м при засыпке зерном до 8 м или заполнением удобрением КАС-32 на высоту до 6 м. Это существенно расширяет область применения и технико-экономические показатели подобных объектов. Рекомендуемые схемы армирования кладки из ЛЕГО-блоков при рациональных сочетаниях заданных максимальной высоты стен и высоты загружения складов продукцией позволяют оптимизировать затраты на хранение при соблюдении эксплуатационной надежности объекта в течение всего жизненного цикла.

В качестве дальнейшего развития исследований предполагается разработка криволинейных ЛЕГО-блоков для формирования круглых в плане объектов (силосов, бункеров), а также разработка системы мониторинга напряженно-деформированного состояния таких конструкций в течение всего периода эксплуатации.

Список литературы/References

1. Гольденберг Л.И. *Прочность и устойчивость некоторых эффективных типов тонколистовых металлических оболочек*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва; 1990. 356 с.
2. Goldenberg LI *Strength and Stability of some Effective Types of Thin-Sheet Metal Shells*. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Engineering. Moscow; 1990. 356 p. (In Russ.)
3. Сазанбаев С.К. *Исследование динамики и напряженно-деформированного состояния, совершенствование конструкций навивных металлических силосов*. Дис. ... канд. техн. наук. Ташкент; 1991. 169 с.
4. Sazanbaev SK *Research of Dynamics and Stress-Strain State, Improvement of Structures of Wound Metal Silos*. Dissertation for the degree of Candidate of Science in Engineering. Tashkent; 1991. 169 p. (In Russ.)
5. Стрельцов И.В. *Местная устойчивость гофрирования стенки цилиндрических зернохранилищ при сдвиговом воздействии*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва; 1993. 165 с.
6. Streltsov IV *Local Stability of the Corrugated Walls of Cylindrical Grain Storages under Shear Stress*. Dissertation for the degree of Candidate of Science in Engineering. Moscow; 1993. 165 p. (In Russ.)
7. Карсункин В.В. *Разработка и исследование комплексных рамно-панельных конструкций производственных зданий сельскохозяйственного назначения*. Дисс. ... канд. техн. наук. Ульяновск; 1998. 122 с.
8. Karsunkin VV *Development and Research of Complex Frame-Panel Structures of Industrial Buildings for Agricultural Purposes*. Dissertation for the degree of Candidate of Science in Engineering. Ulyanovsk; 1998. 122 p. (In Russ.)
9. Ращепкин С.В. *Принципы конструирования и экспериментальные исследования новых металлических спиральных силосов*. Дис. ... канд. техн. наук. Саратов; 2003. 172 с.

- Raschepkin SV *Principles of Design and Experimental Studies of New Metal Spiral Silos*. Dissertation for the degree of Candidate of Science in Engineering. Saratov; 2003. 172 p. (In Russ.)
6. Фейденгольд В.Б. *Методы технологического проектирования и научного обеспечения эффективной эксплуатации заготовительных элеваторов*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва; 2005. 361 с.
- Feidengold VB *Methods of Technological Design and Scientific Support of Efficient Operation of Procurement Elevators*. Dissertation for the degree of Candidate of Science in Engineering. Moscow; 2005. 361 p. (In Russ.)
7. Маркович А.С. *Определение расчётной нагрузки сыпучего материала, действующей на стены цилиндрических силосов, в результате экспериментальных и теоретических исследований*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва; 2013. 193 с.
- Markovich AS *Determination of the Design Load of a Bulk Material Acting on the Walls of Cylindrical Silos as a Result of Experimental and Theoretical Studies*. Dissertation for the degree of Candidate of Science in Engineering. Moscow; 2013. 193 p. (In Russ.)
8. Accu-Steel. URL: <https://accusteel.com/> (дата обращения: 25.11.2025).
9. Вайнер И. Строительство и ремонт зернохранилищ. *Комбикорма*. 2015;4:35–38. URL: https://kombikorma.ru/sites/default/files/2/4_15/04_2015_35-38.pdf (дата обращения: 25.11.2025).
10. Юкиш А., Ильина О. Проблемы и пути модернизации зернохранилищ. *Комбикорма*. 2011;4:13–14. URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/4_11/4-11_13-14.pdf (дата обращения: 25.11.2025).
- Weiner I Construction and Repair of Grain Storages. *Compound Feed*. 2015;4:35–38. (In Russ.) URL: https://kombikorma.ru/sites/default/files/2/4_15/04_2015_35-38.pdf (accessed: 25.11.2025)
11. Прокопов А.Ю., Виницкий А.Н. Разработка и обоснование метода выравнивания кренов стальных резервуаров гидродомкратами. В: *Материалы национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники. 2018»*. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2018. С. 570–572.
- Prokopov AYu, Vinitsky AN Development and Substantiation of a Method for Leveling the Rolls of Steel Tanks with Hydraulic Jacks. *Proceedings of the National Scientific and Practical Conference "Relevant Problems of Science and Technology. 2018"*. Rostov-on-Don: DSTU; 2018. P. 570–572. (In Russ.)
12. Прокопов А.Ю., Рай А.Ю., Капралова И.А. О результатах обследования и разработке программы мониторинга технического состояния резервуарного парка морского порта Тамань. В: *Материалы Международной научно-практической конференции «Строительство-2013: Современные проблемы промышленного и гражданского строительства»*. Ростов-на-Дону: РГСУ; 2013. С. 102–104.
- Prokopov AYu, Rai AYu, Kapralova IA On the Results of the Survey and the Development of a Program for Monitoring the Technical Condition of the Taman Seaport Tank Farm. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Construction-2013: Modern Problems of Industrial and Civil Engineering"*. Rostov-on-Don: RSSU; 2013. P. 102–104. (In Russ.)
13. Прокопов А.Ю., Акопян В.Ф., Гаптисламова К.Н. Изучение напряженно-деформированного состояния грунтового массива и взаимного влияния подземных конструкций существующих и вновь возводимых сооружений в береговой зоне морского порта Тамань. *Инженерный вестник Дона*. 2013;4(27). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2104> (дата обращения: 25.11.2025).
- Prokopov AYu, Akopyan VF, Gaptislamova KN Studying of the Deformed Condition of the Soil Massif and Mutual Influence of Underground Designs of Existing and Again Erected Constructions in a Coastal Zone of Seaport of Taman. *Engineering Journal of Don*. 2013;4(27). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2104> (accessed: 25.11.2025) (In Russ.).
14. Прокопов А.Ю., Ткачева К.Э. Исследование напряженно-деформированного состояния фундамента вертикального резервуара с учетом динамики эксплуатационных нагрузок. *Инженерный вестник Дона*. 2015;3(37). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3200> (дата обращения: 25.11.2025).
- Prokopov AYu, Tkacheva KE A Study of Stress-Strain State of Foundation of Vertical Vessel Subject to Dynamic Operating Loads. *Engineering Journal of Don*. 2015;3(37). (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3200> (accessed: 25.11.2025)
15. Сазонов И.С., Арышев Д.Ю. Строительство зданий из ЛЕГО-блоков в условиях Сибири. *Аллея науки*. 2022;5(68):185–189. URL: https://alley-science.ru/domains_data/files/7May2022/STROITELSTVO%20ZDANIY%20IZ%20LEGO-BLOKOV%20V%20USLOVIYaH%20SIBIRI.pdf (дата обращения: 25.10.2025).
- Sazonov IS, Aryshev DYu Construction of Buildings from LEGO Blocks in Siberia. *Alley of Science*. 2022;5(68):185–189. (In Russ.) URL: https://alley-science.ru/domains_data/files/7May2022/STROITELSTVO%20ZDANIY%20IZ%20LEGO-BLOKOV%20V%20USLOVIYaH%20SIBIRI.pdf (accessed: 25.11.2025)
16. IS GROUP (ООО «ИС ГРУПП»). URL: <https://www.isgmsk.ru/katalog/fundamentnye-bloki-fbs/> (дата обращения: 25.10.2025).
17. ООО «ЖелезобетонИнвест». URL: <https://gbinvest.ru/fb8.html> (дата обращения: 25.10.2025). Ferroconetoninvest LLC. (In Russ.) URL: <https://gbinvest.ru/fb8.html> (accessed: 25.10.2025)

18. АО «Целинскагрохимсервис». URL: <https://cahs.ru/beton> (дата обращения: 25.10.2025).
JSC Tselinskagrokhimservice. (In Russ.) URL: <https://cahs.ru/beton> (accessed: 25.10.2025)
19. Головатенко Д.В. Прочностной анализ бункерного зернохранилища ёмкостью до 60 тонн в Компас-3Д. В: *Материалы пула научно-практических конференций.* Керчь: КГМТУ; 2024. С. 140–145.
- Golovatenko DV Strength Analysis of a Bunker Grain Storage with a Capacity of Up to 60 Tons in Compass-3D. *Proceedings of the Pool of Scientific and Practical Conferences.* Kerch: KSSTU; 2024. P. 140–145. (In Russ.)
20. Константинов В.Н. Использование различных вариантов метода конечных элементов для статического и динамического анализа нагрузок на стены башенных зернохранилищ в процессе хранения, загрузки и разгрузки зерна (Испания). *Инженерно-техническое обеспечение АПК.* 2003;1:17.
- Konstantinov VN The Use of Various Variants of the Finite Element Method for Static and Dynamic Analysis of Loads on the Walls of Tower Grain Storages during Storage, Loading and Unloading of Grain (Spain). *Engineering and Technical Support of the Agro-Industrial Complex.* 2003;1:17. (In Russ.)
21. Barhemat R., Mahjoubi S., Li V.C., Bao Yi. Lego-inspired reconfigurable modular blocks for automated construction of engineering structures. *Automation in Construction.* 2022;139:104323. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104323>
22. Bao Yi., Li V.C. Feasibility study of lego-inspired construction with bendable concrete. *Automation in Construction.* 2020;113:103161. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103161>
23. Naumchik I.O. Application of polystyrene lego blocks in construction. В: *Сборник докладов научно-технической конференции «Дни студенческой науки».* Москва: НИУ МГСУ; 2018. С. 363–365.
- Naumchik IO Application of Polystyrene Lego Blocks in Construction. *Proceedings of the Scientific and Technical Conference "Days of Students' Science".* Moscow: NRU MSUCE; 2018. P. 363–365. (In Russ.)
24. Baneshi V., Dehghan S.M., Hassanli R. An experimental study on the behavior of interlocking masonry blocks manufactured using 3D printed mold. *Advances in Structural Engineering.* 2023;26(2):360–380. <https://doi.org/10.1177/1369433221126595>
25. Ali M., Gultom R.J., Chouw N. Capacity of innovative interlocking blocks under monotonic loading. *Construction and Building Materials.* 2012;37:812–821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.002>
26. Anand K.B., Ramamurthy K. Development and Performance Evaluation of Interlocking-Block Masonry. *Journal of Architectural Engineering.* 2000;6(2):45–51. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0431\(2000\)6:2\(45\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(2000)6:2(45))
27. Yousaf S.M., Gul A., Shahzada Kh., Khan S.W. Evaluation of lateral strength capacity of cored interlocking block masonry piers under variable pre-compression loads. *Structures.* 2024;70:107640. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107640>

Об авторах:

Чжан Юань, аспирант кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), kalashnikov1947a1@gmail.com

Прокопов Альберт Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной геологии, оснований и фундаментов Донского государственного технического университета (344041, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), prokopov72@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

Чжан Юань: обзор российского и зарубежного опыта применения ЛЕГО-блоков, анализ достоинств и недостатков, разработка вариантов совершенствования конструкций блоков, обследование технического состояния строящегося здания из ЛЕГО-блоков, подготовка исходных данных для моделирования, формулировка выводов и рекомендаций, подготовка текста.

А.Ю. Прокопов: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение моделирования и расчетов, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Zhang Yuan, PhD student of the Department of Engineering Geology, Bases and Foundations at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), kalashnikov1947a1@gmail.com

Albert Yu. Prokopov, Dr.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Engineering Geology, Bases and Foundations at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), prokopov72@rambler.ru

Claimed contributorship:

Zhang Yuan: review of Russian and foreign experience in using LEGO-blocks, analysis of advantages and disadvantages, development of options for improving block designs, inspection of the technical condition of a building under construction from LEGO blocks, preparation of initial data for modeling, formulation of the conclusions and recommendations, preparation of the manuscript.

AYu Prokopov: formation of the basic concept, aims of the study, modeling and calculations, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 25.10.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 06.11.2025

Принята к публикации / Accepted 22.11.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 666.9.017

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-95-103>

Корреляции между прочностью и электрическим сопротивлением бетона.

Часть 1. Краткий обзор

Д.М. Степин , Т.М. Хафизов , А.Х. Байбурина , А.Д. Овчинников ,

Э.А. Каминская , Н.О. Коломиец

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

abayburin@mail.ru



EDN: IYYXFY

Аннотация

Введение. Существующие методы неразрушающего контроля прочности бетона предполагают доступ к поверхности бетона, что не всегда возможно в технологии бетонных работ. Например, при непрерывном формовании конструкции в скользящей опалубке требуется определять прочность бетона в процессе формования без непосредственного доступа к уложенным слоям твердеющей бетонной смеси. Известный метод определения прочности бетона посредством измерения его электросопротивления редко используется, не стандартизирован и часто приводит к противоречивым результатам. Целью исследования первой части статьи является изучение обнаруженных ранее корреляций между прочностью бетона и его электросопротивлением, выявление преимуществ и недостатков методов измерений, чтобы выяснить целесообразность такого подхода для способа опускающегося бетона.

Материалы и методы. Применен классический метод обзора литературы с группированием определенных признаков в отдельные сравнительные таблицы с последующим обобщением, что облегчает понимание разработанности темы статьи. Из рассмотренных источников были выбраны только самые важные и информативные, в основном, иностранные.

Результаты исследования. Анализ данных обзора позволил установить: способы измерения электросопротивления (поверхностный, объёмный, внутренний, прямой), типы исследованных бетонов, размеры выборок, сроки испытаний, диапазоны прочности бетона, типы зависимостей и коэффициенты корреляции. Среди факторов, влияющих на результат измерений отмечены: водоцементное отношение, тип вяжущего и заполнителей, вид добавок, температура бетона, его пористость и др. Для пояснения сути методов определения электросопротивления бетона приведена краткая информация.

Обсуждение и заключение. Основной сложностью в косвенных методах определения прочности является построение градиуровочных зависимостей, на результаты могут оказывать влияние различные факторы. Трудности связаны также с креплением омических контактов на опалубку или бетон. Все эти особенности будут учтены в дальнейших исследованиях для определения связи между прочностью и электросопротивлением бетона и повышения точности измерений. Преимущества рассмотренного способа контроля прочности, такие как сохранение целостности конструкции, оперативность и малая трудоёмкость измерений, обуславливают его применение в автоматизированных бетонных технологиях.

Ключевые слова: неразрушающие методы испытаний, прочность бетона, электрическое сопротивление бетона, технология бетона, корреляция

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Степин Д.Н., Хафизов Т.М., Байбурина А.Х., Овчинников А.Д., Каминская Э.А., Коломиец Н.О. Корреляции между прочностью и электрическим сопротивлением бетона. Часть 1. Краткий обзор. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):95–103. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-95-103>

Correlations between the Strength and Electrical Resistance of Concrete. Part 1. A Brief Overview

Dmitry M. Stepin , Tagir M. Khafizov , Albert Kh. Baiburin , Andrey D. Ovchinnikov , Evelina A. Kaminskaya , Nikita O. Kolomiets 

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

 abayburin@mail.ru

Abstract

Introduction. The existing methods of non-destructive testing of concrete strength entail access to the concrete surface, which is not always possible to accomplish in concrete work technology. E.g., while continuously forming a structure in a sliding formwork, it is required that the strength of the concrete is identified during the molding process with no direct access to the layers of the hardening concrete mix being laid. The well-known method of identifying concrete strength by means of measuring its electrical resistance is neither commonly used nor standardized, and tends to yield contradictory results. The aim of the study of the first part of the article is to investigate the previously identified correlations between the concrete strength and its electrical resistance, to identify the advantages and disadvantages of measurement methods in order to find how feasible such an approach is for identifying a method for sinking concrete.

Materials and Methods. The classical method of literature review is employed with grouping of certain features into separate comparative tables followed by generalization assisting understanding an extent to which the research topic has been studied. Those were only the most important and informative, largely foreign, sources that were selected from the reviewed sources.

Research Results. The analysis of the review data enabled us to identify the methods of measuring electrical resistance (surface, volumetric, internal, direct ones), types of the investigated concrete, sample sizes, test dates, concrete strength ranges, types of dependencies and correlation coefficients. Among the factors affecting the measurement result were the following: water-cement ratio, type of binder and aggregates, type of additives, temperature of concrete, its porosity, etc. To explain the essence of the methods for identifying concrete electrical resistance, a brief overview is provided.

Discussion and Conclusion. The major difficulty of the indirect methods of identifying the strength lies in designing calibration dependencies with the results affected by a wide range of factors. There are also some difficulties with fastening of ohmic contacts to the formwork or concrete. All of these will be accounted for in follow-up studies to identify the relationship between the concrete strength and electrical resistance and to improve the measurement accuracy. The advantages of the method of strength control, such as maintaining the integrity of the structure, efficiency and low measurement complexity enable it to be employed in automated concrete technologies.

Keywords: non-destructive testing methods, concrete strength, concrete electrical resistance, concrete technology, correlation

Acknowledgements. The authors appreciate the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions helped to significantly improve the quality of the project.

For citation. Stepin DM, Khafizov TM, Baiburin AKh, Ovchinnikov AD, Kaminskaya EA, Kolomiets NO. Correlations between the Strength and Electrical Resistance of Concrete. Part 1. A Brief Overview. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):95–103. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-95-103>

Введение. В запатентованной технологии опускающегося бетона, разработанной в Южно-Уральском государственном университете [1] и в других автоматизированных бетонных технологиях, возникает задача контроля прочности бетона непосредственно в форме (опалубке), которая не дает доступа к поверхности бетона для традиционных методов неразрушающего контроля. В качестве гипотезы была принята возможность оценки прочности бетона по его электросопротивлению, при этом датчики контроля легко размещаются на опалубке и не требуют остановки производства и доступа к конструкции.

Испытания прочности бетона должны выполняться по требованиям ГОСТ 28570 «Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций», ГОСТ 22690 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля», ГОСТ 17624 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности», ГОСТ 18105 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности», ГОСТ 10180 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Существуют три группы методов контроля прочности бетона: разрушающие, неразрушающие прямые и неразрушающие косвенные. Первая группа методов позволяет получать наиболее достоверные данные о прочности бетона, так как испытанию подвергаются глубинные слои конструкции, однако у них высокая трудоёмкость при испытаниях и требуется восстановление локальных повреждений в конструкциях. В то же время неразрушающие косвенные сохраняют целостность конструкций, являются

относительно недорогими, но требуют построения градиуровочных зависимостей для каждого вида и состава бетона. При этом на точность измерений существенное влияние оказывают различные факторы, такие как наличие дефектов и арматуры в зоне измерения, состояние поверхности бетона, температура, влажность и т.д. [2].

Материалы и методы. Неразрушающий контроль является неотъемлемой частью технологии производства и применения товарного бетона и сборного железобетона. Современные стандарты устанавливают обязательное использование неразрушающих методов для определения прочности бетона по предварительно установленным градиуровочным зависимостям [3]. Трудоемкость неразрушающего контроля состоит непосредственно из измерений прибором того или иного параметра (отскок бойка, величина ударного импульса, скорость ультразвука, диаметр отпечатка и пр.) после выполнения надлежащего количества измерений.

Однако в указанных выше стандартах не нормируется метод контроля прочности по электросопротивлению. По изученной на эту тему литературе [3–13] в большинстве случаев электрическое сопротивление тесно связано с прочностью бетона, но требует правильной калибровки и учёта параметров смеси, а для некоторых конкретных типов бетона корреляция может отсутствовать или быть отрицательной.

При обзоре литературы анализировались следующие аспекты исследований: тип бетона, размер выборки, метод измерения электросопротивления, диапазон прочности бетона, вид и коэффициент корреляции, тип влияющего фактора и результат влияния.

Результаты исследований. Измерения электрического сопротивления по-разному соотносятся с прочностью бетона на сжатие. В исследованиях [4] установлена логарифмическая зависимость, а в это же время авторы [8] с помощью зонда Веннера подтверждают сильную нелинейную логарифмическую зависимость ($R^2 > 0,99$). В работе [10] сделан вывод, что методы внутреннего электросопротивления надёжно прогнозируют прочность смесей с различными свойствами вяжущего и заполнителя. В этом исследовании также приводятся данные о сильной положительной корреляции (значения R^2 от 0,823 до 0,999). Напротив, авторы [12] не обнаружили значимой корреляции в электропроводящих бетонах, а в статье [7] отмечается отрицательная корреляция при замене крупного заполнителя стальным шлаком (что, по нашему мнению, логично).

Исследования также показывают, что параметры бетонной смеси, такие как соотношение воды и цемента или воды и вяжущего, тип цемента и использование добавок (цеолит или пущолан), влияют как на удельное электрическое сопротивление, так и на прочность [9]. Различные способы измерения сопротивления также влияют на силу корреляции [10]. Эти результаты показывают, что при правильной калибровке и учёте влияющих факторов измерения удельного электрического сопротивления могут служить практическим неразрушающим методом оценки прочности бетона в строительных материалах [8]. Основные характеристики исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики включенных исследований

Исследователи, источник	Тип бетона	Размер выборки	Продолжительность исследований
Araújo and Meira, 2022 [4]	Шесть различных смесей	Упоминаний не найдено	Упоминаний не найдено
Deda, 2020 [10]	24 смеси с разным содержанием заполнителей, соотношением воды и вяжущего, добавок	24 смеси	До 28 дней
Dehghanpour and Yilmaz, 2019 [12]	Электропроводящие бетоны с углеродным волокном и наноуглеродной сажей	8 смесей и контрольная серия	28 дней
Hnin et al., 2016 [13]	Различное соотношение воды и вяжущего, содержание золы и цементного теста	Упоминаний не найдено	Упоминаний не найдено
Medeiros-Junior et al., 2014 [9]	12 смесей с четырьмя типами бразильского цемента	12 смесей	То же
Medeiros-Junior et al., 2019 [6]	Смеси с двумя типами цемента и различным содержанием пущолана	Упоминаний не найдено	То же
Nzar et al., 2022 [7]	Бетон нормальной прочности с отходами стального шлака в качестве крупного заполнителя	338 точек данных	1–180 дней
Scasserra et al., 2023 [8]	Сборный железобетон	Упоминаний не найдено	До 28 дней
Silva et al., 2016 [5]	Упоминаний не найдено	То же	До 28 дней
Yurt et al., 2023 [11]	Бетонные композиты, активируемые щелочью	4 смеси	28 дней
Штакельберг и др., 2010 [3]	Цементно-бетонные композиты	8 смесей	Упоминаний не найдено

Анализ включенных исследований показывает следующее.

Типы бетона: в 6-ти исследованиях использовались несколько смесей с разным составом; в 4-х исследованиях использовались специализированные бетоны (например, электропроводящие, сборные, щелочестойкие); в одном исследовании мы не нашли информации о типе бетона.

Размер выборки: размер выборки упоминается в 6-ти исследованиях и не указывается в 5-ти исследованиях. Сообщаемый размер выборки варьировался от 4 до 24 смесей, а в одном исследовании указаны 338 точек данных.

Продолжительность исследования: имеются упоминания о продолжительности исследования в 6-ти исследованиях; нет упоминаний в 5-х исследованиях. Из них 3 исследования длились до 28 дней, два исследования длились ровно 28 дней, а одно исследование длилось от 1 до 180 дней.

Проанализированные исследования имели своей целью определение вида корреляции между электросопротивлением и прочностью бетона, результаты исследований сведены в таблице 2.

Таблица 2

Корреляции между электросопротивлением и прочностью

Исследователи, источник	Метод изучения электросопротивления	Диапазон прочности	Коэффициент корреляции	Результаты
Araújo and Meira, 2022 [4]	Поверхностное электрическое сопротивление	Упоминаний не найдено	Упоминаний не найдено	Логарифмическое соотношение
Deda, 2020 [10]	Объемный, поверхностный и внутренний	То же	То же	Электросопротивление надёжно для прогнозирования прочности
Dehghanpour and Yilmaz, 2019 [12]	Двухзондовый датчик, метод Веннера и ASTM C1760-12	То же	Не имеет значения	Никаких существенных соотношений
Hnin et al., 2016 [13]	Четыре зонда Веннера	То же	Упоминаний не найдено	Хорошая корреляция
Medeiros-Junior et al., 2014 [9]	Поверхностное электрическое сопротивление	То же	$R^2 = 0,823 - 0,999$	Сильная положительная корреляция
Medeiros-Junior et al., 2019 [6]	Упоминаний не найдено	То же	Упоминаний не найдено	Обратная пропорциональность соотношению воды и цемента (w/c)
Nzar et al., 2022 [7]	То же	10–55 МПа	То же	Отрицательная корреляция со стальным шлаком
Scasserra et al., 2023 [8]	Метод Веннера (четырёхзондовый)	Упоминаний не найдено	$R^2 > 0,99$	Сильная нелинейная логарифмическая корреляция
Silva et al., 2016 [5]	Упоминаний не найдено	То же	Упоминаний не найдено	Тесная взаимосвязь
Yurt et al., 2023 [11]	Прямое измерение (мегаомметр)	То же	То же	Сильная связь, снижение прочности с увеличением доли цеолита в составе
Штакельберг и др., 2010 [3]	Упоминаний не найдено	2–72 МПа (по графикам)	То же	Линейная или близкая к линейной корреляция

Кратко поясним суть основных методов. Двухзондовый метод (датчик) применяют для измерения удельного сопротивления образцов, имеющих правильную геометрическую форму и постоянное поперечное сечение. При этом на торцевых гранях образца, например, в виде прямоугольной пластины, изготавливают омические контакты, то есть контакты между металлом и полупроводником или двумя разнородными полупроводниками, характеризующиеся линейной и симметричной вольт-амперной характеристикой. Через эти контакты вдоль образца пропускают электрический ток. На одной из поверхностей образца вдоль линий тока устанавливают два контакта в виде металлических иголок-зондов, имеющих малую площадь соприкосновения с поверхностью и позволяющих измерить разность потенциалов. Если образец однороден, то его удельное сопротивление измеряется в Ом·см.

Четырёхзондовый метод измерения удельного сопротивления полупроводников (метод Веннера) является наиболее распространенным. Кроме высоких метрологических показателей преимущество этого метода состоит в том, что для его применения не требуется создания омических контактов к образцу, возможно измерение удельного сопротивления объемных образцов самой разнообразной формы и размеров, а также удельного сопротивления слоев полупроводниковых структур. Условием для его применения, с точки зрения формы образца, является наличие плоской поверхности, линейные размеры которой превосходят линейные размеры системы зондов. К образцу в линию прикладывают четыре зонда, расположенные на равном расстоянии. Два внешних зонда подводят ток к образцу, а два внутренних — измеряют результирующее падение потенциала. Все зонды устанавливаются на одну и ту же поверхность образца, поэтому метод подходит для измерения удельного сопротивления объемного бетона на месте.

Метод по стандарту ASTM C1760-12 предназначен для определения объемной электрической проводимости насыщенных образцов затвердевшего бетона. Цель метода — быстро оценить сопротивление бетона проникновению хлорид-ионов путем диффузии. Процедура проведения замеров:

- 1) цилиндрический образец диаметром 10 см и длиной 20 см помещают между двумя ячейками, заполненными раствором хлорида натрия;
- 2) между ячейками прикладывают потенциал в 60 вольт;
- 3) измеряют общий объем тока за одну минуту между двумя ячейками;
- 4) на основе измеренного тока, приложенного напряжения и размеров образца вычисляют объемную электрическую проводимость бетона.

На результаты измерений влияют разные факторы, среди которых соотношение воды и цементных материалов, тип и количество дополнительных цементных материалов, наличие полимерных добавок и другие¹.

Анализ корреляций электросопротивления и прочности показал следующее. Упоминания о методах определения электросопротивления мы нашли во всех исследованиях:

- поверхностные методы были упомянуты в 3-х исследованиях;
- методы Веннера были упомянуты в 3-х исследованиях;
- другие методы (внутренний, объемный по ASTM C1760-12, прямой) упоминались в одиночных исследованиях;
- мы не нашли упоминания о конкретном методе для 4-х исследований.

Коэффициенты корреляции: имеются упоминания о коэффициентах корреляции в 3-х исследованиях:

- в 2-х исследованиях сообщалось о сильной корреляции ($R^2 > 0,99$ или $R^2 = 0,823\text{--}0,999$);
- в 1-м исследовании сделан вывод об отсутствии значимой корреляции (что в технических науках соответствует $r < 0,6\text{--}0,7$).

Важность взаимосвязей: все исследования предоставили некоторую информацию о важности взаимосвязи между электрическим сопротивлением и прочностью бетона:

- в 2-х исследованиях сообщалось о логарифмических зависимостях;
- 2 исследования сообщили о прочных соотношениях без указания типа;
- в 2-х исследованиях была выявлена отрицательная корреляция с добавками в бетон (стальной шлак, цеолит);
- в одиночных исследованиях сообщалось: линейная или близкая к линейной корреляция, незначительная корреляция, хорошая корреляция, обратная зависимость от соотношения воды и сухого вещества, а также корреляция от внутреннего электросопротивления, надежная для прогнозирования прочности.

Диапазон прочности бетона: мы нашли упоминание о диапазоне прочности бетона только в 2-х исследованиях (10–55 и 2–72 МПа).

В большинстве включенных исследований имеются прямые указания о влияющих факторах (таблица 3).

Анализ влияющих факторов показал следующее.

Типы факторов: типы факторов указаны во всех включенных исследованиях. Наиболее распространенными факторами были соотношение воды и вяжущего и температура, которые упоминались в 2-х исследованиях. Каждый из 14-ти других факторов упоминался только в одном исследовании.

Влияние на электросопротивление указывалось в 8-ми исследованиях: в 4-х исследованиях сообщалось, что на электросопротивление влияли различные факторы; в каждом из 11-ти исследований сообщалось о значительном эффекте: повышении проводимости, снижении электросопротивления или о том, что это зависит от времени и соотношения количества воды к цементу w/c (water-to-cement ratio).

¹ Примечание: метод ASTM C1760-12 был отменён в январе 2021 года

Влияние на прочность упомянуто в 7-ми исследованиях: эксперименты показали значительную или улучшенную прочность; в каждом из исследований сообщалось, что прочность зависит от типа цемента, водоцементного соотношения, пористости, добавок, уменьшается при добавлении цеолита. Мы не нашли упоминаний о влиянии на сопротивление в 2-х исследованиях и о влиянии на прочность — в 4-х исследованиях.

Таблица 3
Описания влияющих факторов

Исследователи, источник	Тип фактора	Влияние на электросопротивление	Влияние на прочность
Araújo and Meira, 2022 [4]	Упоминаний не найдено	Упоминаний не найдено	Упоминаний не найдено
Deda, 2020 [10]	Тип вяжущего, природа заполнителя	Значительный эффект	Значительный эффект
Dehghanpour and Yilmaz, 2019 [12]	Углеродное волокно, наноуглерод черного цвета	Повышенная проводимость	Улучшенная прочность
Hnin et al., 2016 [13]	Соотношение вода/вяжущее, содержание летучей золы	Под влиянием факторов	Под влиянием факторов
Medeiros-Junior et al., 2014 [9]	Тип цемента, соотношение вода/вяжущее	Увеличивается со временем, уменьшается с увеличением соотношения w/c	Зависит от типа цемента
Medeiros-Junior et al., 2019 [6]	Содержание пущолана в соотношении вода/цемент (w/c)	Выше при большем количестве пущолана, ниже при большем соотношении w/c	Более низкая с более высоким w/c
Nzar et al., 2022 [7]	Содержание стального шлака	Пониженный	Увеличенная
Scasserra et al., 2023 [8]	Температура, форма, размер образцов	Под влиянием факторов	Упоминаний не найдено
Silva et al., 2016 [5]	Температура	Под влиянием температуры	То же
Yurt et al., 2023 [11]	Замена цеолита, температура активации	Под влиянием факторов	Снижается с увеличением содержания цеолита
Штакельберг и др., 2010 [3]	Пористость цементного камня и цементно-бетонных композиций	Пропорциональна увеличению гелевой пористости	Пропорциональна увеличению прочности

В исследованиях использовались различные методы измерения удельного электрического сопротивления, в том числе поверхностные, объёмные и внутренние. Хотя прямое сравнение точности и надёжности во всех исследованиях ограничено из-за разнообразия подходов, можно сделать несколько ключевых выводов.

Поверхностные и внутренние измерения: в исследовании [10] методы внутреннего электрического сопротивления оказались особенно надёжными для прогнозирования прочности на сжатие. Это говорит о возможных различиях в точности между методами поверхностных и внутренних измерений.

Сравнение нескольких методов: в [12] сравнили три разных метода (двуихондовый, метод Веннера и ASTM C1760-12). Хотя они не обнаружили значимой связи с прочностью проводящих бетонов, но полученные линейные зависимости между значениями удельного сопротивления, измеренными данными методами, оказались соответствующими, что говорит о согласованности результатов, полученных разными методами измерения.

Использование зондов Веннера: в исследованиях [8, 12, 13] использовался метод зондов Веннера, что говорит о его широком применении при данных исследованиях. Авторы [8] сообщили об очень сильной корреляции ($R^2 > 0,99$) при использовании этого метода, что указывает на его потенциальную надёжность.

Специальное оборудование: исследователи [11] использовали мегаомметр для прямого измерения сопротивления, что может быть преимуществом для некоторых типов бетона (например, для композитов, активированных щелочью).

Обсуждение и заключение. Исследования выявили несколько потенциальных практических применений измерения удельного электрического сопротивления для оценки прочности бетона.

Неразрушающий контроль: в исследовании [8] подчеркнули важность использования электрического сопротивления в качестве неразрушающего метода оценки прочности бетона при производстве сборных железобетонных конструкций.

Оценка прочности бетона в раннем возрасте: исследователи [5] продемонстрировали возможность прогнозирования прочности в возрасте 28 дней с помощью измерения удельного сопротивления в раннем возрасте.

Контроль качества: выявленные в большинстве исследований сильные корреляции позволяют предположить, что измерение удельного сопротивления можно использовать в качестве быстрого и эффективного метода постоянного контроля качества при производстве бетона [3, 4, 8–10].

Специализированные бетоны: исследования проводящих бетонов [12] и щелочеактивированных композитов [11] показывают, что измерения удельного сопротивления могут иметь уникальное применение в специализированных типах бетонов, хотя зависимости могут отличаться от обычных бетонов.

Авторы [8] отметили необходимость калибровки и использования поправочных коэффициентов, подчеркнув важность разработки стандартизованных процедур для различных типов бетона и областей применения, чтобы обеспечить надёжную оценку прочности на практике.

Как указано в обобщающей многолетние исследования статье [3], корреляционные зависимости между прочностью цементно-бетонных композиций и их электропроводностью либо линейные, либо близкие к линейным. В указанном исследовании сделана попытка раскрыть физическую сущность линейных корреляций «прочность–электросопротивление». Вместе с тем показано, что линейные корреляции зависят от вида и количества добавки замедлителя твердения, от марки цемента и класса бетона. Возрастание электрического сопротивления обусловлено увеличением гелевой составляющей формирующейся в процессе твердения пористости, а также изменением ее собственных электропроводящих свойств [3].

Таким образом, после рассмотрения преимуществ и недостатков существующих методов контроля прочности бетона стало ясно, что для способа опускающегося бетона применим неразрушающий метод контроля прочности посредством электросопротивления (косвенный метод). С целью определения дальнейшего вектора исследований и определения способа измерения электросопротивления были проанализированы результаты современных исследований, на основе которых были составлены сравнительные таблицы по ряду критериев, где установлены методы исследования, особенности образцов, размеры выборок, вид и степень корреляции, влияющие факторы. Данный анализ стал фундаментом для дальнейших исследований связи электросопротивления и прочности бетона, результаты которых авторы планируют опубликовать во второй части.

Список литературы/References

1. Хафизов Т.М., Головнев С.Г., Денисов С.Д. Способ формования железобетонных конструкций посредством опускающегося бетона. Патент РФ № RU2566540. 2015.
2. Khafizov TM, Golovnev SG, Denisov SD *A Method of Forming Reinforced Concrete Structures by Means of Sinking Concrete*. RF Patent No. RU2566540. 2015. (in Russ.)
2. Улыбин А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений. *Инженерно-строительный журнал*. 2011;4:10–15. URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/4\(22\)/ulybin_control.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/4(22)/ulybin_control.pdf) (дата обращения 07.10.2025).
3. Улыбин А.В. On the Choice of Concrete Strength Inspection Methods of Ready-built Structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2011;4:10–15. (in Russ.) URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/4\(22\)/ulybin_control.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/4(22)/ulybin_control.pdf) (accessed: 07.10.2025)
3. Штакельберг Д.И., Вильге Б.И., Бойко С.В., Гольдман Ф.А. Физическая сущность линейных корреляций прочность — электрическое сопротивление при контроле упрочнения цементно-бетонных композиций. *Строительные материалы*. 2010;3:118–122.
4. Shtakelberg DI, Vilge BI, Boyko SV, Goldman FA Physical Essence of Linear Strength-Electrical Resistance Correlations in Controlling Hardening of Cement-Concrete Compositions. *Construction Materials*. 2010;3:118–122. (in Russ.)
4. Araújo C.C., Meira G.R. Correlation between concrete strength properties and surface electrical resistivity. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* 2022;1(15):e15103. <https://doi.org/10.1590/S1983-4195202200010003>
5. Silva J., Jalali S., Ferreira R.M. Estimating Long-Term Durability Parameters Based on Electrical Resistivity Measurements. In: *Proceedings of the International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability. ICEETS*. Nagercoil, India; 2016.
6. Medeiros-Junior R.A., Munhoz G.S., Medeiros M.H.F. Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan. *Revista ALCONPAT*. 2019;9(2):152–166. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>

7. Nzar S.M., Ahmed S.M., Samir H., Rawaz K. Electrical resistivity-Compressive strength predictions for normal strength concrete with waste steel slag as a coarse aggregate replacement using various analytical models. *Construction and Building Materials*. 2022;327(12):127008. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127008>

8. Scasserra M.C., Balzamo H., Fernandez Luco L. The use of electrical resistivity measurement to estimate compressive strength in precast concrete processes. In: *Proceedings of the LACCEI international multi-conference for engineering, education and technology: Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations*. Buenos Aires, Argentina; 2023 <https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.1564>

9. Medeiros-Junior R.A., Lima M.G., Medeiros M.H.F., Real L.V. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. *Revista ALCONPAT*. 2014;4(2):113–128. <https://doi.org/10.21041/ra.v4i2.21>

10. Grazia MT, Deda H, Sanches LFM. The Influence of the Binder Type & Aggregate Nature on the Electrical Resistivity and Compressive Strength of Conventional Concrete. *Journal Building Engineering*. 2021;43:102540. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102540>

11. Yurt Ü., Kir B., Bicen Y. Correlation of destructive and non-destructive tests with electrical resistance in cementless composites. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2023;11(5):2283–92. <https://doi.org/10.29130/dubited.1364092>

12. Dehghanpour H., Yilmaz K. The Relationship between Resistances Measured by Two-Probe, Wenner Probe and C1760-12 ASTM Methods in Electrically Conductive Concretes. *SN Applied Sciences*. 2020;2. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1811-7>

13. Hnin S.W., Sancharoen P., Tangtermsirikul S. Effects of Concrete Mix Proportion on Electrical Resistivity of Concrete. *Materials Sciences Forum*. 2016;866:68–72. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.866.68>

Об авторах:

Степин Дмитрий Михайлович, студент Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ORCID](#), dmitriistepin@yandex.ru

Хафизов Тагир Мавлитович, заведующий лабораторией кафедры строительного производства и теории сооружений Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ORCID](#), kafizovtm@susu.ru

Байбурин Альберт Халитович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительного производства и теории сооружений Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), abayburin@mail.ru

Овчинников Андрей Дмитриевич, инженер кафедры строительного производства и теории сооружений Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76)), [ORCID](#), ovchinnikovad@susu.ru

Каминская Эвелина Александровна, студентка Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ORCID](#), melena20021@mail.ru

Коломиец Никита Олегович, студент Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ORCID](#), Nikita.colomiec03@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Д.М. Степин: поиск и анализ литературы, подготовка основного текста.

Т.М. Хафизов: анализ результатов исследований, корректировка выводов.

А.Х. Байбурин: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

А.Д. Овчинников: поиск литературы, анализ результатов исследований.

Э.А. Каминская: поиск и анализ литературы.

Н.О. Коломиец: поиск и анализ литературы.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Dmitry M. Stepin, student, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ORCID](#), dmitriistepin@yandex.ru

Tagir M. Khafizov, Head of the Laboratory of the Department of Building Technologies and Structural Engineering, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ORCID](#), kafizovtm@susu.ru

Albert Kh. Baiburin, Dr.Sc.(Eng.), Professor of the Department of Construction Production and Theory of Structures, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), Associate Professor, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), abayburin@mail.ru

Andrey D. Ovchinnikov, Engineer of the Department of Construction Production and Theory of Structures, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ORCID](#), ovchinnikovad@susu.ru

Evelina A. Kaminskaya, student, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ORCID](#), melena20021@mail.ru

Nikita O. Kolomietz, student, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ORCID](#), Nikita.colomiec03@gmail.com

Claimed contributorship:

DM Stepin: literature search and analysis, preparation of the main manuscript.

TM Khafizov: analysis of the research results, correction of the conclusions.

AKh Baiburin: scientific supervision, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

AD Ovchinnikov: literature search, analysis of the research results.

EA Kaminskaya: literature search and analysis.

NO Kolomietz: literature search and analysis.

***Conflict of Interest Statement:* the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 10.10.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 25.10.2025

Принята к публикации / Accepted 10.11.2025

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК [691.32:620.173]:658.562

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-104-111>

Оценивание прочности на сжатие бетона в конструкции в случаях сомнений в его соответствии установленным требованиям

В.Н. Деркач ID, И.Е. Демчук ID

Филиал «Научно-технический центр» РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», г. Брест, Республика Беларусь

v-derkatch@yandex.ru



EDN: KYUSCV

Аннотация

Введение. При оценке прочности бетона на основе стандартных испытаний могут возникать сомнения относительно его соответствия. Процедура оценивания прочности бетона в таких случаях производится в соответствии с ГОСТ Р 57360-2016 (РФ) и СТБ EN 13791-2012 (РБ). Принципиально другие подходы к оценке прочности бетона содержатся в EN 13791-2019 (введен в 2020 г.), многие положения которого имеют значительные отличия от предыдущей версии и являются новыми для специалистов, осуществляющих контроль прочности бетона на этапе возведения и при проведении обследования железобетонных конструкций.

Материалы и методы. Объектом исследований является участок бетонной или железобетонной конструкции, в которой оценивают прочность бетона при сомнениях в соответствии бетона установленным требованиям. В таких случаях проводят следующие испытания бетона: предварительное косвенное испытание; косвенное испытание с последующим отбором и испытанием образцов бетона прямым методом из мест с наименьшей прочностью бетона; испытание образцов бетона прямым методом.

Результаты исследования. Приведены сведения о выборе области и мест испытаний, их количестве, методах отбора кернов и оценивания прочности на сжатие бетона по результатам испытаний кернов, комбинированных испытаний, включающих косвенный метод и испытания кернов. Выполнен анализ методик оценивания прочности бетона в случаях сомнений относительно соответствия бетона установленным требованиям.

Обсуждение и заключение. Приведены принципиальные отличия методик оценки прочности бетона в конструкциях в случаях сомнений относительно соответствия бетона установленным требованиям, приведенных в европейском стандарте и национальных стандартов России и Республики Беларусь. Отмечены недостатки предлагаемой в EN 13791-2019 методики.

Ключевые слова: бетон, прочность на сжатие, конструкции, сомнения, методы оценивания, косвенные испытания, испытания кернов

Для цитирования: Деркач В.Н., Демчук И.Е. Оценивание прочности на сжатие бетона в конструкции в случаях сомнений в его соответствии установленным требованиям. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):104–111. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-104-111>

Original Empirical Research

Assessment of the Compressive Strength of Concrete in a Structure in Cases of Doubt as to its Compliance with the Established Requirements

Valery N. Derkach ID, Igor E. Demchuk ID

Branch of the Scientific and Technical Center of RUE STROITECHNORM, Brest, Republic of Belarus

v-derkatch@yandex.ru

Abstract

Introduction. When assessing the strength of concrete based on standard tests, there may be doubts about its compliance. The procedure for assessing the strength of concrete in such cases is carried out in accordance with GOST R 57360-2016

(Russian Federation) and STB EN 13791-2012 (Republic of Belarus). Fundamentally different approaches to assessing concrete strength are contained in EN 13791-2019 (introduced in 2020), many provisions of which differ significantly from the previous version and are new to specialists who monitor concrete strength during the construction stage and during the inspection of reinforced concrete structures.

Materials and Methods. The object of the study is a section of a concrete or reinforced concrete structure where the concrete strength is assessed when there is doubt about its compliance with established requirements. In such cases, the following concrete tests are conducted: preliminary indirect testing; indirect testing followed by the selection and testing of concrete specimens by the direct method from areas with the lowest concrete strength; testing of concrete specimens by the direct method.

Research Results. Information is provided on the selection of test areas and sites, their number, methods of core sampling and assessment of compressive strength of concrete based on the results of core testing, combined tests, including the indirect method and core testing. An analysis of concrete strength evaluation methods is performed in cases of doubt as to the compliance of concrete with the established requirements.

Discussion and Conclusion. The paper presents the fundamental differences in the methods for assessing the strength of concrete in structures in cases of doubt as to the compliance of concrete with the established requirements provided in the European standard and the national standards of Russia and the Republic of Belarus. The disadvantages of the methodology set forth in EN 13791-2019 are outlined.

Keywords: concrete, compressive strength, structures, doubts, assessment methods, indirect tests, core tests

For citation: Derkach VN, Demchuk IE. Assessment of the Compressive Strength of Concrete in a Structure in Cases of Doubt as to its Compliance with the Established Requirements. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):104–111. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-104-111>

Введение. Сомнения в достижении требуемой прочности на сжатие бетона в строящихся конструкциях могут возникнуть из-за сомнений в качестве бетонной смеси, поставляемой на стройплощадку, нарушений, допущенных во время выполнения работ, или после какого-либо исключительного события на стройплощадке. Термин «сомнение» включает, но не ограничивается следующим:

- недостаточная прочность на сжатие образцов бетона, отобранных для производственного контроля;
- недостаточная прочность на сжатие образцов бетона, отобранных для испытания на идентичность;
- нарушения, допущенные во время выполнения работ.

Процедура оценивания прочности бетона в случаях сомнений относительно соответствия бетона, определенного на основе стандартных испытаний, изложена в стандартах России и Республики Беларусь ГОСТ Р 57360-2016 «Конструкции железобетонные сборные. Определение прочности бетона на сжатие» и СТБ EN 13791-2012 «Оценка фактической (in-situ) прочности на сжатие конструкций и элементов сборного бетона», которые являются идентичными европейскому стандарту EN 13791-2007 «Оценка прочности бетона на сжатие на месте в конструкциях и сборных элементах». В 2020 г. была введена в действие новая версия названного стандарта — EN 13791-2019, в которой содержатся принципиально иные подходы к оценке прочности бетона в конструкциях или элементах конструкций. Многие положения данного стандарта являются новыми для специалистов, осуществляющих контроль прочности затвердевшего бетона при возведении и обследовании железобетонных конструкций, и требуют детального анализа и комментариев.

Материалы и методы. В стандарте EN 13791-2019 рассматриваются два варианта оценивания прочности на сжатие бетона в конструкции (лат. — *in-situ*):

- оценивание характеристического значения прочности на сжатие бетона в конструкции и/или прочности бетона в определенном месте конструкции;
- оценивание класса прочности на сжатие бетона, поставленного и уложенного в конструкцию, когда возникают сомнения в прочности бетона на сжатие по результатам стандартных испытаний или некачественного выполнения бетонных работ.

В последнем случае оценивание прочности на сжатие бетона *in-situ* производится с целью:

1) оценки области испытания, для которой имеется подтверждение того, что поставленный бетон соответствует заявленной прочности на сжатие, но результаты испытаний отобранных на месте образцов указывают на несоответствие, например, когда:

- установлена прочность на сжатие поставленного бетона, вызывающего сомнения и подозрения;
 - содержание воздуха в бетонной смеси превышает максимально допустимое значение;
 - в бетонную смесь добавляется вода на стройплощадке по инструкции потребителя без проведения контрольных испытаний.
- 2) контроля прочности на сжатие бетона, когда производитель заявил о несоответствии;
- 3) контроля прочности на сжатие бетона при нарушении технологии выполнения работ, связанных с укладкой, уплотнением или набором прочности бетона.

Согласно EN 13791-2019 объектом исследований является область испытаний или место испытаний, где определяется характеристическая прочность бетона на сжатие, которая непосредственно используется для оценки соответствия железобетонной или бетонной конструкции действующим техническим нормативным правовым актам (далее — ТНПА). Поэтому в стандарте EN 13791-2019 отсутствует процедура приведения прочности бетона, определенной по стандартным образцам, к прочности бетона в конструкции при помощи коэффициента 0,85 и установления класса бетона по прочности на сжатие в существующей конструкции (таблица 1 EN 13791-2007).

В настоящей статье рассмотрены методы оценивания прочности бетона, которые применяют в случае возникших сомнений или спорных вопросов относительно качества бетона, поставленного на строительную площадку и уложенного в конструкцию.

О сомнениях относительно качества бетона может заявить его производитель. В этом случае он обязан предоставить заказчику полный комплект информации, позволяющий идентифицировать объем нарушений и возможные риски. На основании осмотра конструкции осуществляется локализация участка, на котором уложен бетон, вызывающий сомнения. Производитель бетона обязан не только объяснить причины несоответствия, но и оценить характеристическую прочность на сжатие бетона на момент его доставки и предоставить информацию, на основании каких данных был проведен анализ прочности бетона. В случае занижения прочности на сжатие бетона может потребоваться оценивание класса прочности на сжатие *in-situ* и оценка безопасности конструкции.

Если в ходе исследования выявляется необходимость проведения испытаний бетона в конструкции для разрешения спорных вопросов о соответствии бетона, поставленного на строительную площадку и уложенного в конструкцию, возможны следующие варианты:

- предварительное испытание;
- косвенное испытание с последующим отбором и испытанием кернов из мест с наименьшей прочностью бетона;
- испытание кернов.

Блок-схема оценивания класса прочности на сжатие бетона приведена на рис. 1.

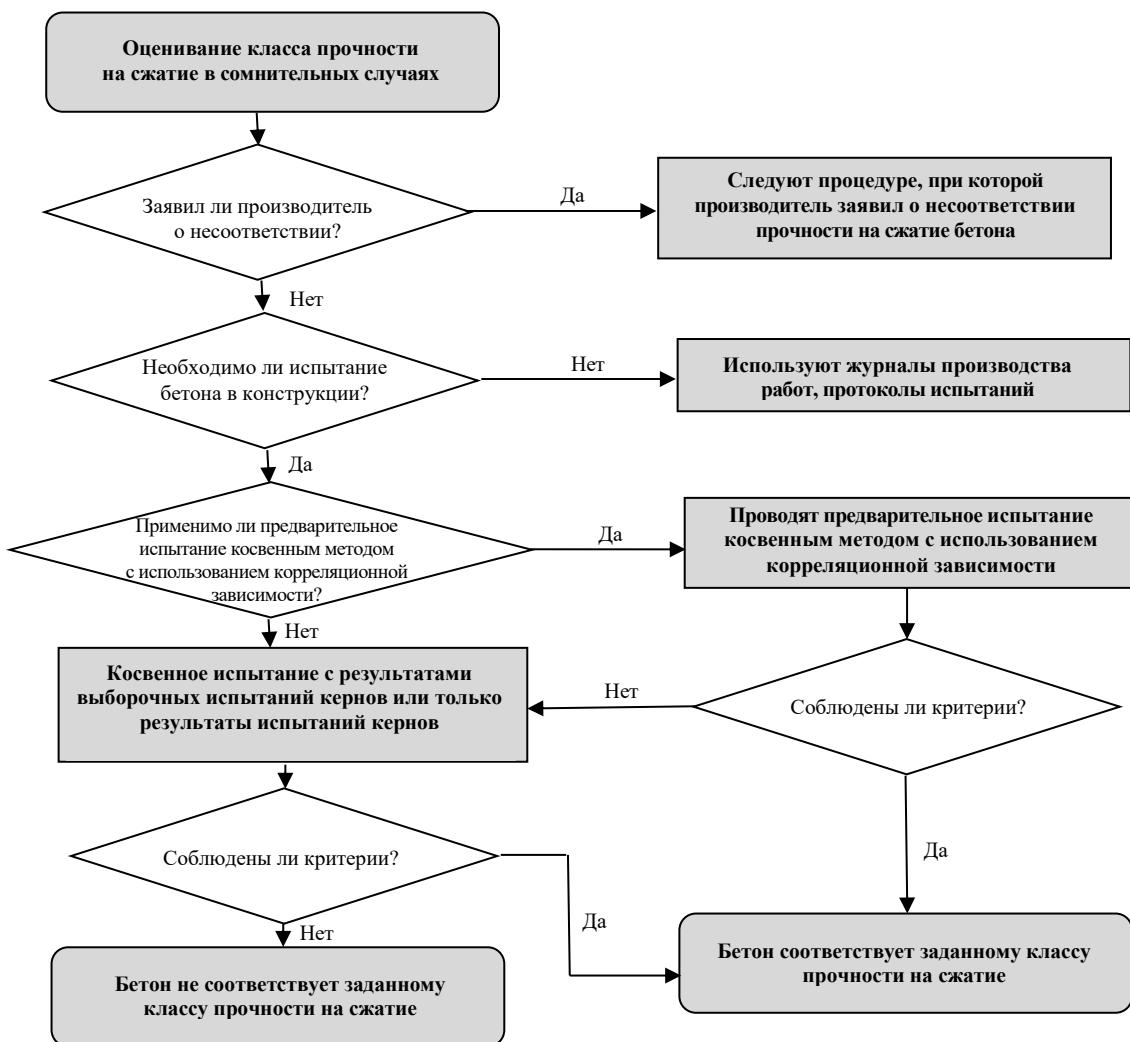


Рис. 1. Блок-схема оценивания класса прочности на сжатие бетона в случаях сомнений с ссылками на соответствующие пункты EN 13791-2019

В случае положительного результата испытаний бетон, поставленный в конструкцию, считается соответствующим заданному классу прочности на сжатие, любые корректировки бетона, поставленного на стройплощадку, считаются незначительными, а уровень качества работ при укладке, уплотнении и твердении бетона — соответствующим ТНПА.

Если по результатам испытаний не доказано соответствие бетона заданному классу прочности на сжатие, может потребоваться проверка соответствия конструкции установленным требованиям с учетом полученной прочности на сжатие бетона. Независимо от причин несоответствия (неправильного выбора компонентов, низкого качества бетонных работ, дефектов в бетоне) несущая способность и эксплуатационная пригодность конструкции должны быть обеспечены.

Результаты исследования. Предварительные испытания предполагают применение косвенного метода с установленной корреляционной зависимостью между результатом косвенного испытания и прочностью бетона на сжатие. В EN 13791-2019 рассмотрено два метода косвенных испытаний прочности бетона: метод упругого отскока (EN 12504-2-2001 «Испытания бетона в конструкциях. Часть 2. Неразрушающий контроль. Определение критерия отскока») и метод скорости распространения ультразвукового импульса UPV (EN 12504-4-2004 «Испытание бетона в конструкциях. Часть 4. Определение скорости распространения ультразвукового импульса»). Следует отметить, что в стандарте EN 13791-2019 отсутствует косвенный метод испытаний, основанный на вырыве анкеров из бетона согласно EN 12504-3-2005. В отечественной практике данный метод неразрушающего контроля прочности бетона рекомендуется использовать в качестве эталонного метода [1–3]. Отказ от этого метода испытаний в новой версии стандарта очевидно связан с неопределенностями, обусловленными различием в прочности бетона в поверхностных слоях конструкции и его основном объеме, а также условиями испытаний (тип заполнителя, наличие арматуры, влажность и т.д.). По этой же причине EN 13791-2019 требует, чтобы после разрезания отобранного из конструкции керна по длине он не содержал:

- бетон в пределах 30 мм до любой поверхности;
- бетон в пределах 50 мм или 20 % от верхней поверхности слоя бетона, в зависимости от того, какое значение больше, на участках с толщиной слоя не более 1,5 м;
- бетон в пределах 300 мм от верхней поверхности слоя, где толщина слоя составляет 1,5 м и более.

Результат испытания в соответствии с EN 12504-2-2001 — это величина отскока, которая представляет собой медианное значение не менее девяти достоверных результатов в месте проведения испытания. При определении скорости распространения ультразвукового импульса UPV согласно EN 12504-4-2004 результатом испытания является одно значение скорости распространения ультразвукового импульса или значение средней скорости распространения ультразвукового импульса, если в месте проведения испытания было проведено более одного измерения.

Величина отскока и скорость распространения ультразвукового импульса не являются прямыми измерениями прочности на сжатие бетона, но при использовании корреляционной зависимости они могут применяться для оценки прочности на сжатие бетона в конструкции.

Испытания по определению упругого отскока молотка позволяют измерить поверхностную твердость бетона, но не оценить его качество по всему сечению конструкции. Данный метод не рекомендуется к применению в следующих случаях:

- глубина карбонизации бетона более 5 мм;
- использовались опалубки с контролируемым влагоотделением или поверхностные упрочнители бетона;
- бетон поврежден пожаром;
- бетонные поверхности повреждены в результате химического воздействия или разморожены.

Испытания по определению скорости распространения ультразвукового импульса позволяют оценить качество бетона по всему сечению конструкции, но на результаты испытаний существенное влияние оказывает влажность бетона и другие факторы.

Предварительное испытание может применяться для оценки однородности состава бетона в области испытания, выявления мест с более низкой прочностью на сжатие, а также для оценки достижения заданного класса прочности на сжатие бетона при наличии надежной корреляционной зависимости между прочностью бетона и результатом косвенного испытания. В EN 13791-2019 содержится следующее: «если по результатам косвенных испытаний установлено несоответствие требуемым критериям, это не является доказательством того, что бетон не соответствует заданному классу прочности на сжатие». В этом случае должны выполняться дополнительные исследования, основанные на испытаниях кернов, или комбинированные испытания, включающие один из косвенных методов и испытания кернов.

Перед проведением комбинированных испытаний исследуемый бетон должен быть разделен на области, включающие объем бетона не более 180 м³. Затем область испытания делят на участки объемом бетона

примерно 30 м³. В зависимости от количества участков устанавливают количество мест, в которых будут проводиться косвенные испытания, а также отбор кернов (таблица 1).

Таблица 1
Минимальное количество мест испытания в области испытания для косвенного метода

Количество участков, включающих примерно 30 м ³ бетона, в области испытания ^a	Минимальное количество мест проведения косвенного испытания
1 ^b	9
от 2 до 4	12
от 5 до 6	20

^a Если объем охватывает большую площадь, то следует увеличить количество косвенных испытаний, чтобы они отражали изменчивость результатов в пределах области испытания.

^b При условии, что рассматривается как один объем

Из таблицы 1 следует, что даже при очень небольшом объеме уложенного бетона минимальное количество мест косвенных испытаний составляет девять. На участках, включающих большие объемы бетона (около 30 м³), места косвенных испытаний следует распределять равномерно по площади исследуемого участка.

Косвенные испытания служат основой для определения мест, в которых будет проводиться отбор кернов. Принцип отбора кернов и критерии оценивания приведены в таблице 2.

Места для отбора кернов и критерии оценки

Количество объемов, составляющих примерно 30 м ³ , в области испытания	Минимальное количество мест отбора кернов	Среднее значение результатов испытания керна в местах, наиболее близких к медианной величине отскока или среднему значению UPV для области испытания ^b	Минимальное значение результатов испытания ^{b, c}
1 ^d	По одному керну на каждое из двух наименьших значений косвенного испытания для области испытания	—	≥ 0,85 (f _{ck,spec} – M)
от 2 до 4	Один керн при наименьшем значении косвенного испытания для области испытания и по одному керну в каждом из 2 мест проведения испытания, наиболее близких к медианной величине отскока или среднему значению UPV для области испытания	≥ 0,85 (f _{ck,spec} + 1)	≥ 0,85 (f _{ck,spec} – M)
от 5 до 6		≥ 0,85 (f _{ck,spec} + 2)	≥ 0,85 (f _{ck,spec} – M)

^b Прочность керна может быть выражена как f_{c,1:1core} или f_{c,2:1core} в зависимости от выбранного значения f_{ck,spec}.

^c Для бетона класса прочности на сжатие С20/25 или выше M = 4 МПа. Для бетонов С16/20, С12/15 и С8/10 значение M соответственно равно 3, 2 и 1 МПа.

^d При условии, что рассматривается как один объем.

Из таблицы 2 следует, что для небольшого объема бетона для оценивания его соответствия установленному классу прочности на сжатие достаточно в девяти местах провести косвенные испытания бетона и выполнить испытания двух кернов.

Значения f_{ck,spec}, приведенные в таблице 1, относятся к прочности бетона, определенной на цилиндрических (f_{ck,cyl}) или кубических (f_{ck,cube}) образцах, соответствующих данному классу прочности на сжатие.

Если возникает необходимость в проведении исследований прочности бетона на основании испытаний кернов, то, так же как и в случае комбинированных испытаний, каждая область должна быть разделена на участки,

включающие не более 30 м^3 бетона. Минимальное количество мест проведения испытания зависит от количества участков, на которые разбита область испытания (таблица 3).

Таблица 3

Критерии оценки на основе результатов испытания кернов

Количество участков включающих примерно 30 м^3 бетона, в области испытания	Минимальное количество мест проведения испытания для каждого участка	Среднее значение результатов испытания керна для области испытания ^b	Наименьший результат испытания ^{b,c}
1 ^d	3	—	$\geq 0,85 (f_{ck,spec} - M)$
от 2 до 4	2	$\geq 0,85 (f_{ck,spec} + 1)$	$\geq 0,85 (f_{ck,spec} - M)$
от 5 до 6	2	$\geq 0,85 (f_{ck,spec} + 2)$	$\geq 0,85 (f_{ck,spec} - M)$

^b Прочность керна может быть выражена как $f_{c,1:1core}$ или $f_{c,2:1core}$ в зависимости от выбранного значения $f_{ck,spec}$.

^c Для класса прочности на сжатие C20/25 или выше $M = 4 \text{ МПа}$. Для C16/20, C12/15 и C8/10 значение M соответственно равно 3, 2 и 1 МПа.

^d При условии, что он рассматривается как один объем.

Для испытаний используют керны с соотношением длины к диаметру 2:1 или 1:1 и диаметром $\geq 75 \text{ мм}$. Если произвести отбор таких кернов не представляется возможным, допускается принять диаметр керна не менее 50 мм. При определении прочности на сжатие бетона в конструкции результат испытания керна преобразуют в эквивалентное значение для керна с соотношением длины к диаметру 2:1 с помощью коэффициента длины керна (CLF). Для тяжелого бетона преобразование результатов испытания керна с соотношением длины к диаметру 1:1 в эквивалентное значение для керна с соотношением длины к диаметру 2:1 производят, принимая значение CLF равным 0,82, что ниже значения CLF, установленного в EN 13790-2007 и равного 0,85. Следует отметить, что в указанном стандарте диаметр кернов рекомендуется принимать не менее 100 мм. Чтобы получить результат испытания, отбор кернов проводят в каждом месте испытания (по три керна диаметром 50 мм или по одному керну диаметром $\geq 75 \text{ мм}$). Критерии оценки соответствия бетона приведены в таблице 3. Если оба критерия удовлетворены, то можно утверждать, что для исследуемой области испытания бетон соответствует установленному классу по прочности на сжатие.

Множители, равные 0,85, в критериях оценки (см. таблицы 2, 3) выражают соотношение характеристической прочности бетона, определяемой *in-situ*, к прочности бетона, полученной на основании испытаний стандартных образцов. Наблюдаемая разница в прочности бетона обусловлена различиями в укладке бетонной смеси, уходе, усадке и экзотермии твердеющего бетона [1–5]. Следовательно, даже при идеальных условиях бетонирования и ухода за бетоном маловероятно, что его прочность, определяемая *in-situ*, превысит 70–85 % прочности, полученной на стандартных образцах [6–10]. По этой причине в Еврокоде 2 (EN 1992-1-1-2004) установлены требования по модификации частного коэффициента для бетона, если его прочность получена на основании испытаний в готовой конструкции.

Обсуждение и заключение. Методика оценки прочности бетона в конструкциях в случаях сомнений относительно соответствия бетона установленным требованиям, приведенная в стандарте EN 13791-2019, имеет принципиальные отличия от предыдущей версии указанного стандарта, а также национальных стандартов России и Республики Беларусь — ГОСТ Р 57360-2016 и СТБ EN 13791-12. Наиболее важные отличия заключаются в:

- введении иной методики определения прочности на сжатие бетона в конструкции и изменении критериев ее оценивания в случае сомнений в качестве бетона;
- определении количества мест испытания в зависимости от применяемых методов оценивания прочности на сжатие бетона;
- отказе от установления актуального класса прочности бетона на сжатие в конструкции с учетом коэффициента 0,85, выражающего отношение прочности бетона в конструкции к прочности бетона стандартных образцов (см. таблица 1 в EN 13791-2007). Согласно стандарту EN 13791-2019 оценивают характеристическую прочность бетона в конструкции (в месте или в области испытания);
- изменении коэффициента преобразования значений, получаемых на кернах с соотношением высоты к диаметру $h/d = 2$, к кернам с соотношением высоты к диаметру $h/d = 1$, с 0,85 на 0,82;
- уменьшении диаметра основных образцов-кернов с $\geq 100 \text{ мм}$ до $\geq 75 \text{ мм}$;
- исключении при оценивании прочности на сжатие бетона конструкций косвенного метода, основанного на вырыве анкеров.

Необходимо отметить, что предлагаемые в стандарте EN 13791-2019 методы статистического анализа при оценивании значений прочности бетона по выборкам эмпирических данных малого объема не лишены определенных недостатков предыдущей версии. Это касается прежде всего установления конкретного закона распределения случайной величины (нормального или логнормального), а также обеспеченности результатов определения прочности бетона.

Список литературы/References

1. Парфенов А.А., Сивакова О.А., Гусарь О.А. Выбор оптимальных методов определения прочности бетона при обследовании зданий и сооружений. *Строительные материалы*. 2019;1:60–63. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-60-63>

Parfenov AA, Sivakova OA, Gusar' OA Selection of Optimal Methods for Determining the Strength of Concrete when Inspecting Buildings and Structures. *Construction Materials Russia*. 2019;1:60–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-60-63>

2. Улыбин А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений. *Инженерно-строительный журнал*. 2011;4:10–15. <https://doi.org/10.5862/MCE.22.1>

Ulybin AV On the Choice of Concrete Strength Inspection Methods of Ready-Built Structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2011;4:10–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.5862/MCE.22.1>

3. Штенгель В.Г. Общие проблемы технического обследования неметаллических строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. *Инженерно-строительный журнал*. 2010;7(17):4–9. <https://doi.org/10.18720/MCE.17.2>

Stengel VG General Problems of Technical Inspection of Non-Metallic Building Structures of Operated Buildings and Structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2010;7(17):4–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.18720/MCE.17.2>

4. Леонович С.Н., Снежков Д.Ю. Исследование неравнопрочности бетона на объекте монолитного строительства комплексным неразрушающим методом. *Известия вузов. Строительство*. 2009;8:108–115.

Leonovich SN, Snejzhkov DYu Investigation of an Uneven Strength of Concrete at a Monolithic Construction Site Using a Complex Non-Destructive Method. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2009;8:108–115. (In Russ.)

5. Байбурин А.Х., Погорелов С.Н. Исследование неоднородности прочности бетона монолитных конструкций. *Инженерно-строительный журнал*. 2012; 3:12–18. <https://doi.org/10.5862/MCE.29.1>

Baiburin AK, Pogorelov SN Study of Concrete Strength Heterogeneity in Monolithic Structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 3:12–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.5862/MCE.29.1>

6. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Мониторинг возводимых железобетонных конструкций на основе неразрушающих испытаний бетона: методы контроля, критерии соответствия. *Строительство и реконструкция*. 2015;2:159–160. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/47600> (дата обращения: 29.10.2025).

Snejzhkov DYu, Leonovich SN Monitoring of Cast in Place Concrete Construction by Non Destructive Nesting: Methods, Criteria of Conformity. *Building and Reconstruction*. 2015;2:159–160. (In Russ.) URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/47600> (accessed: 29.10.2025)

7. Тур В.В., Дереченник С.С. Критерии оценки соответствия прочности бетона в подходах европейских и американских стандартов. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2012;1(73):173–178. URL: <https://rep.bstu.by/bitstream/handle/data/2871/173-178.pdf;jsessionid=27363036E2B493BA50F2B1A46F24F58C?sequence=1> (дата обращения: 29.10.2025).

Tur VV, Derechennik SS Assessment Criteria for Compliance Concrete Strength by European and American Standards Approaches. *Vestnik of Brest State Technical University*. 2012;1(73):173–178. (In Russ.) URL: <https://rep.bstu.by/bitstream/handle/data/2871/173-178.pdf;jsessionid=27363036E2B493BA50F2B1A46F24F58C?sequence=1> (accessed: 29.10.2025)

8. Тур В.В., Дереченник С.С. Новый критерий для оценивания соответствия прочности бетона в условиях ограниченной выборки результатов испытаний. *Строительство и реконструкция*. 2016;6(68):71–84.

Tur VV, Derechennik SS A New Criterion for Assessing the Conformity of Concrete Strength in a Limited Sample of Test Results. *Building and Reconstruction*. 2016;6(68):71–84. (In Russ.)

9. Дереченник С.С., Тур В.В. Новый подход к оцениванию IN-SITU характеристической прочности бетона в существующих железобетонных конструкциях при ограниченном количестве результатов полевых испытаний. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2018;1(109):109–115. URL: <http://rep.bstu.by/handle/123456789/94> (дата обращения: 29.10.2025).

Derechennik SS, Tur VV A New Approach to Assessment of the Concrete In-Situ Characteristic Compressive Strength in Existing RC-Structures Based on a Limited Test Data. *Vestnik of Brest State Technical University*. 2018;1(109):109–115. (In Russ.) URL: <http://rep.bstu.by/handle/123456789/94> (accessed: 29.10.2025)

10. Runkiewicz L., Runkiewicz M., Sieczkowski J. Nowe zasady stosowania badań nieniszczących do oceny wytrzymałości i jednorodności betonów. Cz. 1. *Builder*. 2021;1(282):21–25. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5921>

Об авторах:

Деркач Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, директор филиала «Научно-технический центр» РУП «СТРОЙТЕХНОРМ» (224023, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 267/2), [ORCID](#), v-derkatch@yandex.ru

Демчук Игорь Евгеньевич, кандидат технических наук, начальник отдела филиала «Научно-технический центр» РУП «СТРОЙТЕХНОРМ» (224023, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 267/2), [ORCID](#), 7263712@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В.Н. Деркач: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, подготовка текста, формирование выводов.

И.Е. Демчук: анализ результатов исследований, доработка текста, формирование списка литературы.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Valery N. Derkach, Dr.Sci.(Eng.), Professor, Director of the Scientific and Technical Center Branch of RUE STROITECHNORM (267/2 Moskovskaya Str., Brest, 224023, Republic of Belarus), [ORCID](#), v-derkatch@yandex.ru

Igor E. Demchuk, Cand.Sci.(Eng.), Head of the Department of the Scientific and Technical Center Branch of RUE STROITECHNORM (267/2 Moskovskaya Str., Brest, 224023, Republic of Belarus), [ORCID](#), 7263712@mail.ru

Claimed contributorship:

VN Derkach: scientific supervision, formation of the basic concept, aims of the study, preparation of the manuscript, formation of the conclusions.

IE Demchuk: analysis of the research results, revision of the manuscript, formation of the references.

Поступила в редакцию / Received 27.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 10.10.2025

Принята к публикации / Accepted 05.11.2025