

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





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 5, № 2, 2026

Издание является платформой для научно-образовательного сотрудничества российских и иностранных исследователей, вовлеченных в строительную сферу.

Журнал включен в Единый государственный перечень научных изданий — «Белый список» (Категория 2).

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, категория II) 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)

<i>Индексация и архивация</i>	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, Internet Archive, Google Scholar, Mendeley, AGRIS, SCILIT, Baidu, OpenAlex, Library of Congress, Semantic Scholar, Berkeley, OpenAIRE, MIT Libraries
<i>Наименование органа, зарегистрировавшего издание</i>	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
<i>Учредитель и издатель</i>	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)
<i>Периодичность</i>	4 выпуска в год
<i>Адрес учредителя и издателя</i>	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
<i>E-mail</i>	sovtrendstr@gmail.com
<i>Телефон</i>	+7 (863) 273–83–72
<i>Сайт</i>	http://www.stsg-donstu.ru/
<i>Дата выхода в свет</i>	25.06.2026





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. 5, no. 2, 2026

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)

<i>Indexing and Archiving</i>	RISC, CyberLeninka, CrossRef, Internet Archive, Google Scholar, Mendeley, AGRIS, SCILIT, Baidu, OpenAlex, Library of Congress, Semantic Scholar, Berkeley, OpenAIRE, MIT Libraries
<i>Name of the Body that Registered the Publication</i>	Extract from the Register of Registered Mass Media ЭЛ № ФС 77 – 83923 dated September 16, 2022, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
<i>Founder and Publisher</i>	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU)
<i>Periodicity</i>	4 issues per year
<i>Address of the Founder and Publisher</i>	1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
<i>E-mail</i>	sovtrendstr@gmail.com
<i>Telephone</i>	+7 (863) 2–738–372
<i>Website</i>	http://www.stsg-donstu.ru/
<i>Date of Publication</i>	25.06.2026



Редакционная коллегия

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

Выпускающий редактор

Студенникова Светлана Геннадьевна, 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);

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

Батаев Дена Карим-Султанович, доктор технических наук, профессор, Комплексный научно-исследовательский институт имени Х. И. Ибрагимова Российской академии наук (Грозный, 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 специального профессионального образования (Ташкент, Республика Узбекистан);

Емрах Маденси, доктор технических наук, доцент, Факультет гражданского строительства, Университет Неджметтина Эрбакана (Конья, Турция);

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 (ЮРГПУ НПИ) имени М.И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация);

Плешко Михаил Степанович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (НИТУ «МИСиС») (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 Вардгес Игитович, доктор технических наук, профессор, руководитель Ассоциации промышленных предприятий Армении (Ереван, Республика Армения);

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

Толкынбаев Темирхан Анапияевич, доктор технических наук, профессор, действительный (иностранн) член Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), 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 (НИУ МГСУ), академик Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) (Москва, Российская Федерация);

Мохаммед Шаабан Галла, PhD в области гражданского строительства, Инженерный факультет Университета Кафр-эль-Шейха (Египет);

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 (НИУ МГСУ) (Москва, Российская Федерация);

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

Товмасын Саркис Арисаткаесович, 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, 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)

Alexey N. Beskopylny, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Dena Karim S. Bataev, Dr.Sci. (Engineering), Professor, academician of the Academy of Sciences of the Chechen Republic (Grozny, 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);

Emrah Madenci, Dr.Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Civil Engineering, Necmettin Erbakan University (Türkiye);

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. Tolkyndaev, 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)

Batyr M. Yazhev, 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)

Mohamed Shaaban Ghalla, Ph.D. in Civil Engineering, Assistant Lecturer at the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kafrelsheikh University (Egypt);

Vadim I. Bepalov, 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

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

- Римшин В.И., Евдокименко А.С., Кецо Е.С., Воробьев А.Е., Савельев Е.С.* Анализ эксплуатационной безопасности здания при вариациях технического состояния фундаментов 7
- Соболь Б.В., Рашидова Е.В., Васильев П.В., Иващенко В.В.* Комбинированный подход конечно-элементного анализа и искусственных нейронных сетей для диагностики сечений строительных конструкций, ослабленных концентраторами напряжений 22
- Деркач В.Н., Демчук И.Е., Матяс П.И.* Применимость неразрушающих методов для оценки прочности каменной кладки существующих конструкций 32
- Щуцкий С.В., Лиманцев А.А.* К вопросу определения расчетных длин элементов в структурных конструкциях типа «Кисловодск» 41

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

- Алиев С.А.* Методологические основы проекта организации строительства развития территорий в системе комплексного развития территорий 49
- Байбурин Д.А., Потанов А.Н.* Корреляции поврежденности основных конструкций промышленных зданий от сроков их эксплуатации 56

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Шляхова Е.А.* Инновационная технология приготовления бетонных смесей 66

ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

- Розанцева Н.В., Сагитдинов М.Р.* Организационно-технологическая модель управления строительными отходами в условиях плотной городской застройки 73
- Спирова А.Ю., Карелин Д.В.* Эволюция городской ирригации и орошаемой городской среды в Центральной Азии 83

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

- Тиратурян А.Н., Абделаал М.Э.Р.* Остаточный ресурс дорожных одежд на автомобильных дорогах с высокой интенсивностью движения 97
- Федосов С.В., Федосеев В.Н., Воронов В.А.* Цифровой подход к управлению жизненным циклом малоэтажного объекта капитального строительства с тепло- и воздухообменом 107

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

- Rimshin VI, Evdokimenko AS, Ketsko ES, Vorobyov AE, Savelyev ES* Evaluating Building Operational Safety under Variations of the Technical Condition of Foundations 7
- Sobol BV, Rashidova EV, Vasiliev PV, Ivashchenko VV* A Combined Finite Element Analysis and Artificial Neural Network Approach for Diagnostics of Building Cross-Sections Weakened with Stress Concentrators .. 22
- Derkach VN, Demchuk IE, Matyas PI* Applicability of Non-Destructive Methods for Assessing the Strength of Masonry of Existing Structures 32
- Shchutsky SV, Limantsev AA* On the Issue of Determining the Design Lengths of Elements in Structural Con-structions of the Kislovodsk Type 41

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

- Aliiev SA* Methodological Foundations of a Project of Organizing Construction and Development of Territories in a System of Integrated Territorial Development 49
- Baiburin DA, Potapov AN* Correlations of Damage to the Main Structures of Industrial Buildings from their Ser-vice Life 56

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Shlyakhova EA* Innovative Technology of Preparation of Concrete Mixtures 66

URBAN PLANNING, PLANNING OF RURAL SETTLEMENTS

- Rozantseva NV, Sagitdinov MR* An Organizational and Technological Model of Construction Waste Management in Dense Urban Development 73
- Spirova AYu, Karelin DV* Evolution of Urban Irrigation and Irrigated Urban Environment in Central Asia 83

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES

- Tiratourjan AN, Abdelaal MER* Residual Resource of Road Surfacing on High-Traffic Roads 97
- Fedosov SV, Fedoseev VN, Voronov VA* Digital Approach to Life Cycle Management of a Low-rise Capital Con-struction Facility with Heat and Air Exchange 107

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 69.05:624.046

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-7-21>

Анализ эксплуатационной безопасности здания при вариациях технического состояния фундаментов

В.И. Римшин¹  , А.С. Евдокименко² , Е.С. Кецко³ , А.Е. Воробьев² ,
Е.С. Савельев² 



EDN: ENLSIC

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

² Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Российская Федерация

³ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Российская Федерация

 v.rimshin@niisf.ru

Аннотация

Введение. Современные здания эксплуатируются в условиях изменяющегося климата и нагрузок, где изменения технического состояния фундаментов могут привести к трещинам, неравномерным осадкам и потере несущей способности. Регулярный мониторинг и обследование позволяют вовремя выявлять риски и предотвращать аварии, снижая затраты на ремонт. Целью исследования в данной статье является разработка методов оценки эксплуатационной безопасности при различных технических состояниях фундаментов здания, включая расчет осадок и пределов работоспособности.

Материалы и методы. Исследование включает в себя визуальный осмотр, определение конструктивной схемы здания, инструментальную диагностику, выполнение обмерных работ по зданию с составлением архитектурных чертежей, выявление и фиксацию дефектов, устройство шурфов с составлением обмерных чертежей фундаментов по открытым шурфам и определение прочностных характеристик материала фундаментов, выполнение вскрытий конструкций и испытаний строительных материалов с определением их прочностных характеристик с последующим выполнением поверочных расчетов несущих элементов.

Результаты исследования. На основании результатов поверочных расчетов и выявленных дефектов по конструкциям устанавливалось состояние строительных элементов и здания в целом. Разработаны рекомендации для обеспечения нормальной эксплуатации здания и рекомендации по усилению или ремонту конструкций.

Обсуждение и заключение. Проведенное комплексное техническое обследование здания с применением современных методов неразрушающего контроля и поверочных расчетов позволило выявить текущее техническое состояние конструктивных элементов фундаментов и оснований. По результатам проведенного технического обследования с учетом результатов поверочных расчетов можно сделать вывод, что для дальнейшей нормальной эксплуатации здания на отдельных участках требуется выполнить мероприятия по усилению фундаментов или укреплению грунтов оснований. Научная значимость исследования заключается в разработке и апробации методики комплексной оценки несущей способности оснований и фундаментов с учетом реальных условий эксплуатации, что позволяет повысить точность прогноза долговечности зданий на слабых грунтах. Практическая ценность результатов состоит в формировании конкретных рекомендаций по усилению фундаментов. Полученные выводы могут быть использованы при обследовании аналогичных объектов гражданского и промышленного назначения.

Ключевые слова: фундаменты, инженерно-техническое обследование, поверочные расчёты, техническое состояние, деформационные и прочностные характеристики

Для цитирования. Римшин В.И., Евдокименко А.С., Кецко Е.С., Воробьев А.Е., Савельев Е.С. Анализ эксплуатационной безопасности здания при вариациях технического состояния фундаментов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(2):7–21. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-7-21>

Original Empirical Research

Evaluating Building Operational Safety under Variations of the Technical Condition of Foundations

Vladimir I. Rimshin¹  , Alexandr S. Evdokimenko² , Ekaterina S. Ketsko³ , Alexandr E. Vorobyev² , Egor S. Savelyev² 

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

² Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russian Federation

³ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation

 v.rimshin@niisf.ru

Abstract

Introduction. Modern buildings operate under changing climate and loading conditions, where foundation degradation leads to cracks, uneven precipitation and load-bearing capacity loss. Regular monitoring and inspections enable timely risk detection, accident prevention and repair cost reduction. The aim of the study is to develop methods for assessing operational safety across various foundation conditions, including calculating precipitation and performance limits.

Materials and Methods. The study included visual inspection, structural scheme identification, instrumental diagnostics, building inspection with preparation of the architectural drawings, defect detection and documentation, installation of pits with preparation of measuring drawings of epy foundations for open pits and identification of the strength characteristics of the foundation material, opening structures and testing building materials to identify their strength characteristics with subsequent verification calculations of the load-bearing elements.

Research Results. Based on the results of the verification calculations and identified structural defects, the condition of the building elements and the building as a whole has been established. Recommendations have been developed for ensuring the normal operation of a building as well as for strengthening or repairing structures.

Discussion and Conclusion. Comprehensive technical inspection of the building using advanced non-destructive testing methods and verification calculations revealed the current technical condition of the foundation elements and foundations. Based on the results of the technical inspection, taking into account the results of the verification calculations, it can be concluded that for further normal operation of a building in some areas, it is necessary to take measures in order to strengthen the foundations or strengthen foundations soils. The scientific significance lies in the developed and testing of the methodology for comprehensive assessment of the load-bearing capacity of foundations taking into account real-world operating conditions, which makes it possible to increase the accuracy of forecasting the durability of buildings on weak soils. The practical value of the results lies in the formation of specific recommendations for strengthening foundations. The findings can be used in inspecting similar civil and industrial facilities.

Keywords: foundations, engineering and technical inspection, verification calculations, technical condition, deformation and strength characteristics

For citation. Rimshin VI, Evdokimenko AS, Ketsko ES, Vorobyov AE, Savelyev ES Evaluating Building Operational Safety under Variations of the Technical Condition of Foundations. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):7–21. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-7-21>

Введение. Современные здания эксплуатируются в условиях изменяющегося климата, динамических нагрузок и неоднородных слабых грунтов (насыпные пески, водонасыщенные глины), что приводит к деформациям фундаментов, трещинам, неравномерным осадкам и в дальнейшем к аварийным состояниям. Используемые методы обычно фокусируются на новых конструкциях, не принимая во внимание эксплуатационные характеристики сооружений. Целью данного исследования является разработка методологии оценки эксплуатационной надежности фундаментов зданий на грунтах различных типов с расчётом осадок и выявлением технического состояния конструкций. Для её достижения были поставлены следующие задачи: проведение инструментального обследования, выполнение поверочных расчётов по I группе и II группе предельных состояний, разработка рекомендаций по усилению фундаментов [1–4].

Материалы и методы. В состав работ по техническому обследованию фундаментов и оснований здания входило устройство шурфов с составлением обмерных чертежей фундаментов по отрытым шурфам и определение прочностных характеристик материала фундаментов. Глубина шурфов назначалась с учетом установления фактической глубины заложения существующих фундаментов, их конструкций, прочности материалов и так далее. Пробы грунтов отбирались преимущественно в интервале 10–60 см ниже подошв фундаментов ненарушенной структуры (3 пробы по каждому шурфу), лабораторные испытания образцов выполнялись по стандартным методикам в соответствии с действующими ГОСТами. Деформационные и прочностные характеристики грунтов определялись согласно Приложению Б СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений».

На основании результатов, полученных по отрытым шурфам, выполнены поверочные расчеты оснований фундаментов по II группе предельных состояний (по деформациям). Расчеты выполнялись с учетом п. 5.3.18 СП 22.13330.2011.

При выполнении поверочных расчетов оснований фундаментов устанавливались следующие параметры: расчетное сопротивление грунтов основания, допустимая нагрузка на фундаменты, давление по подошвам фундаментов с учетом существующих нагрузок.

В состав обследования вертикальных и горизонтальных несущих конструкций, лестницы и крыши входило изучение состояния несущих элементов, включающее выполнение обмерных работ с составлением архитектурных чертежей и чертежей узлов конструкций на участках вскрытий.

Выполнялось выявление и фотофиксация дефектов по внутренним помещениям здания (на участках фактического доступа) с составлением схем расположения дефектов на схемах поэтажных планов и фиксация дефектов по фасадам здания с нанесением дефектных участков на эскизные чертежи фасадов.

В ходе настоящего технического обследования выполнялись работы по определению прочностных характеристик строительных материалов несущих конструкций неразрушающими методами контроля. Класс прочности бетона определялся на основании непосредственных измерений прочности бетона неразрушающими методами по ГОСТ 22690 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля» (методом ударного импульса) и с учетом требований п. 8.3.5 СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» (фактический класс прочности бетона устанавливался как $B = 0,8 \cdot R_{сж}$)^{1,2} [1–3].

Прочностные характеристики арматуры конструкций определялись на основании экспертной оценки с учетом профиля арматуры, года постройки здания и данных СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции». Расчетное сопротивление стержневой арматуры принято равным $R_s = 510$ МПа, $R_{sc} = 450$ МПа — для арматуры периодического профиля А600.

Испытания металла конструкций не выполнялись. Прочностные характеристики стальных прокатных элементов устанавливались по данным СП 13-102-2003 и по имеющимся справочным данным. При расчетах стальных элементов значение расчетного сопротивления стали растяжению принято равным для колонн из прокатных швеллеров $R_y = 230$ МПа (для стали С235), для балок из прокатных двутавров, опорных столиков уголков и стальных полос $R_y = 240$ МПа (для стали С245). Для расчета сварных соединений принято, что выполнена ручная электродуговая сварка электродами Э42.

По результатам выполненных вскрытий, обмерных работ, данных измерений прочностных характеристик материалов выполнялись поэлементные поверочные расчеты горизонтальных и вертикальных несущих конструкций.

Поверочные расчеты конструкций выполнялись по I группе предельных состояний (по несущей способности) согласно разделу 10 СП 13-102-2003. Поверочные расчеты стальных конструкций выполнены в соответствии с СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции», железобетонных — в соответствии с СП 52-101-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры».

Поверочные расчеты выполнены с учетом полезной нагрузки на перекрытие над 1-м этажом, определенной по СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия» и составляющей 200 кг/м^2 (нормативное значение). Полезная снеговая нагрузка на покрытие принята равной 180 кг/м^2 (III снеговой район). Нормативная нагрузка от перегородок принята равной 50 кг/м^2 . Вес полов составляет 150 кг/м^2 (нормативное значение). Поскольку вскрытие кровли не производилось, нагрузка от пирога покрытия принята на основании экспертной оценки.

При выполнении поверочных расчетов нагрузки от собственного веса конструкций определялись на основании выполненных вскрытий и проведенных обмерных работ. Удельный вес материалов устанавливался на основании экспертной оценки: бетон $\gamma_f = 24 \text{ кН/м}^3$; железобетон $\gamma_f = 25 \text{ кН/м}^3$; сталь $\gamma_f = 78,5 \text{ кН/м}^3$; кирпичная кладка $\gamma_f = 18 \text{ кН/м}^3$; керамзитобетон $\gamma_f = 12 \text{ кН/м}^3$; цементно-песчаная стяжка $\gamma_f = 18 \text{ кН/м}^3$; грунт обратной засыпки $\gamma_f = 16 \text{ кН/м}^3$.

¹ Бондаренко В.М., Римшин В.И. *Диссипативная теория силового сопротивления железобетона*. Москва: Студент; 2015. 111 с.

² Курбатов В.Л., Римшин В.И., Дайронас М.В. *Контроль и надзор в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве*. Минеральные воды; 2024.

Принимая во внимание то, что выполнялись выборочные вскрытия, на отдельных участках нагрузка на конструкции определялась на основании экспертной оценки. Усилия в конструкциях определялись методами строительной механики. По результатам поверочных расчетов вертикальных и горизонтальных несущих конструкций устанавливались следующие параметры: значения фактической несущей способности вертикальных и горизонтальных несущих конструкций, коэффициент использования несущей способности существующих элементов вертикальных и горизонтальных несущих конструкций. Состояние конструкций и сооружения в целом устанавливалось на основании выполненного технического обследования и поверочных расчетов. Все работы по обследованию несущих конструкций, определению прочности материалов, поверочные расчеты выполнялись в соответствии с действующими нормативными документами [4–10].

Техническое обследование здания выполнялось поэтапно. Предварительное обследование: ознакомление с имеющейся документацией, общий осмотр объекта, сплошное визуальное обследование строительных конструкций, выявление дефектов и повреждений по внешним признакам с необходимыми замерами и фиксацией. Детальное сплошное обследование: выполнение обмерных работ, измерение прочностных характеристик материалов несущих конструкций, выполнение вскрытий несущих конструкций, устройство шурфов, выполнение обмерных чертежей фундаментов и конструкций на участках вскрытий, выполнение инженерно-геологического обследования грунтов оснований фундаментов, работы по составлению обмерных чертежей поэтажных планов, фасадов, разрезов, плана кровли и схемы раскладки несущих конструкций перекрытия и покрытия, работы по обмеру необходимых геометрических параметров строительных конструкций, элементов, узлов и фундаментов, инструментальное определение параметров дефектов и повреждений, выполнение поверочных расчетов, анализ результатов обследования, составление технического отчета с выводами по результатам обследования, подготовка рекомендаций для обеспечения дальнейшей нормальной эксплуатации здания. Предварительное обследование включало подготовительный период, когда осуществлялся сбор и анализ исходных данных. На основании предварительного обследования устанавливались места расположения шурфов, вскрытий и измерения прочностных характеристик конструкций. Для определения прочностных характеристик строительных материалов неразрушающими методами использовался прибор Оникс 2.6. Тахеометрическая съемка конструкций выполнена тахеометром Trimble M3 (5")^{3,4} [11–14].

Техническое обследование здания. Краткая характеристика объекта обследования

Рассматриваемое здание административного назначения построено в 1995 году (двухэтажное, без подвала). Высота помещений первого этажа от уровня пола до низа плит перекрытия составляет около 3900 мм, второго — около 2570 мм. Конструктивная схема здания каркасная. Строение выполнено в виде двух объемов прямоугольной формы в плане с габаритными размерами около 25,0×9,4 м и 37,2×9,8 м. Пространственная жесткость и устойчивость здания обеспечивается рамами каркаса с жестким сопряжением колонн с фундаментами и шарнирным сопряжением ригелей с колоннами. Совместная работа элементов каркаса обеспечена жесткими горизонтальными дисками — сборными плитами междуэтажного перекрытия и покрытия. Площадка вокруг здания спланирована, внутренний двор заасфальтирован. По контуру строения выполнена отмостка из асфальтобетона. Отвод талых и дождевых вод на участке с асфальтовым покрытием обеспечен за счет вертикальной планировки. Схема здания изображена на рис. 1.

Фундаменты под колонны каркаса выполнены столбчатыми из монолитного железобетона. Цокольные части наружных стен опираются на монолитные железобетонные фундаментные балки, уложенные по столбчатым фундаментам. Стеновые панели надземной части здания выше цоколя опираются на блоки ФБС через стальные прокатные элементы (в уровне первого этажа), на нижележащие панели (в уровне второго этажа) и на стальные опорные столики, приваренные к колоннам (в уровне первого и второго этажей). Стены лестничного блока опираются на бетонные полы, уложенные по грунту.

Основные колонны каркаса выполнены составного сечения из стальных прокатных швеллеров № 30, соединенных планками 200×7 мм с шагом около 700 мм. Основные колонны воспринимают нагрузки от перекрытия над первым этажом и покрытия, а также от сборных керамзитобетонных стеновых панелей. Между основными колоннами каркаса устроены стальные фахверковые колонны из спаренных швеллеров № 30. Фахверковые колонны служат для опирания наружных стеновых панелей и воспринимают ветровые нагрузки. Стальные вертикальные связи по колоннам каркаса отсутствуют.

Ограждающие стены устроены из сборных стеновых керамзитобетонных панелей толщиной 340 мм. Панели выполнены преимущественно ненесущими (навесными) с опиранием на стальные опорные столики, приваренные к основным колоннам каркаса и колоннам фахверка. Отдельные стеновые панели выполнены самонесущими

³ Римшин В.И., Бондаренко В.М., Бакиров Р.О., Назаренко В.Г. *Железобетонные и каменные конструкции*. Москва; Стройиздат: 2007.

⁴ *Обследование и испытание зданий и сооружений*. Москва; 2012.

с опиранием на блоки ФБС через стальные подкладки из прокатных элементов (в уровне первого этажа) и на нижележащие панели (в уровне второго этажа). Цокольная часть наружных стен выполнена из сборных бетонных блоков ФБС с опиранием на монолитные железобетонные фундаментные балки. Фасады облицованы кирпичом толщиной около 120 мм. Облицовка фасадов по осям А, Г и 9 выполнена керамической плиткой в виде заводской облицовки стеновых панелей. Кирпичная кладка облицовки опирается на сборные блоки ФБС. Внутренние стены лестничного блока в уровне первого этажа выполнены из кладки полнотелого глиняного кирпича на цементно-песчаном растворе. Толщина стен с учетом облицовки составляет около 310–460 мм. Перегородки толщиной 90–410 мм выполнены из кладки полнотелого глиняного кирпича, пенобетонных блоков на цементно-песчаном растворе и каркасно-обшивными из гипсокартонных листов.

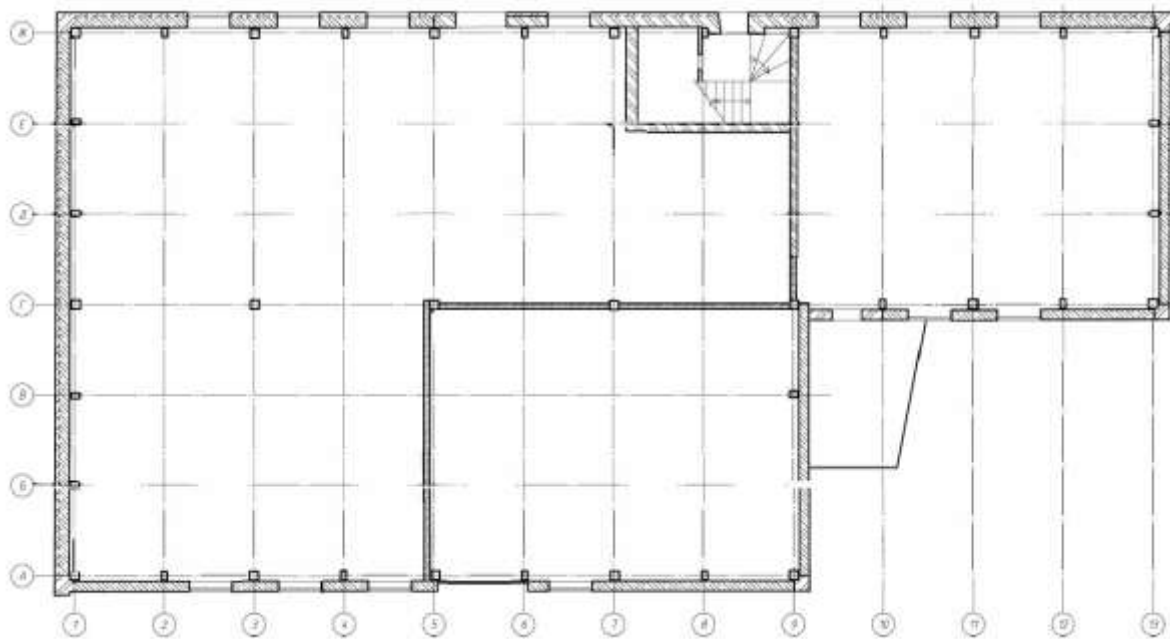


Рис. 1. Схема обследуемого здания в осях 1–13/А–Ж

Перекрытие здания выполнено по балочной схеме из сборных железобетонных многопустотных плит размерами $6,0 \times 1,2 \times 0,22(h)$ м и $6,0 \times 1,8 \times 0,22(h)$ м с опиранием на стальные ригели двутаврового сечения № 50 и № 50Б2, а также монолитных участков с опиранием на железобетонные прогоны вдоль осей А, Ж и 9–13.

Вертикальная коммуникация по зданию обеспечивается двухмаршевой сборной железобетонной лестницей, расположенной в осях 7–9/Е–Ж. Лестница с отметки 0,000 м до отметки +0,680 м выполнена из монолитного железобетона. Безопасное передвижение по лестнице обеспечено ограждениями из стальных элементов.

Покрытие выполнено плоским. Железобетонные многопустотные плиты покрытия пролетом размерами $6,0 \times 1,2 \times 0,22(h)$ м и $6,0 \times 1,8 \times 0,22(h)$ м опираются на стальные ригели каркаса двутаврового сечения № 50 и № 50Б2, а также монолитные участки с опиранием на железобетонные прогоны размерами поперечного сечения $120 \times 220(h)$ мм вдоль осей А и Ж. Ригели сквозного сечения, состоящие из двух прокатных элементов, объединены стальными планками.

Водоотвод атмосферных осадков обеспечен разуклонкой поверхности крыши в направлении воронок внешних водосточных труб. Кровля выполнена из мягкого рулонного материала, устроенного по слою цементно-песчаной стяжки и утеплителя. По контуру крыши устроен парапет из кладки глиняного полнотелого кирпича на цементно-песчаном растворе.

По внешнему виду состояние здания оценивается как удовлетворительное.

Результаты обследования фундаментов и грунтов оснований.

Столбчатый фундамент по шурфу № 1 в осях 9/А под колонну выполнен в виде плиты из монолитного железобетона с габаритными размерами около $2,1 \times 1,8 \times 0,36(h)$ м. Сопряжение колонны каркаса с фундаментом обеспечено посредством подколонника из монолитного железобетона размерами примерно $1 \times 1 \times 1,45(h)$ м. Под наружные стены устроены фундаментные железобетонные балки с габаритными размерами около 500×570 мм. На уровне верха фундаментной балки выполнена горизонтальная гидроизоляция из слоя рубероида. Глубина заложения фундамента от уровня планировочной отметки земли составляет около $d = 1,55$ м. Схема расположения шурфа № 1 и сечения 1–1 и А–А изображены на рис. 2.

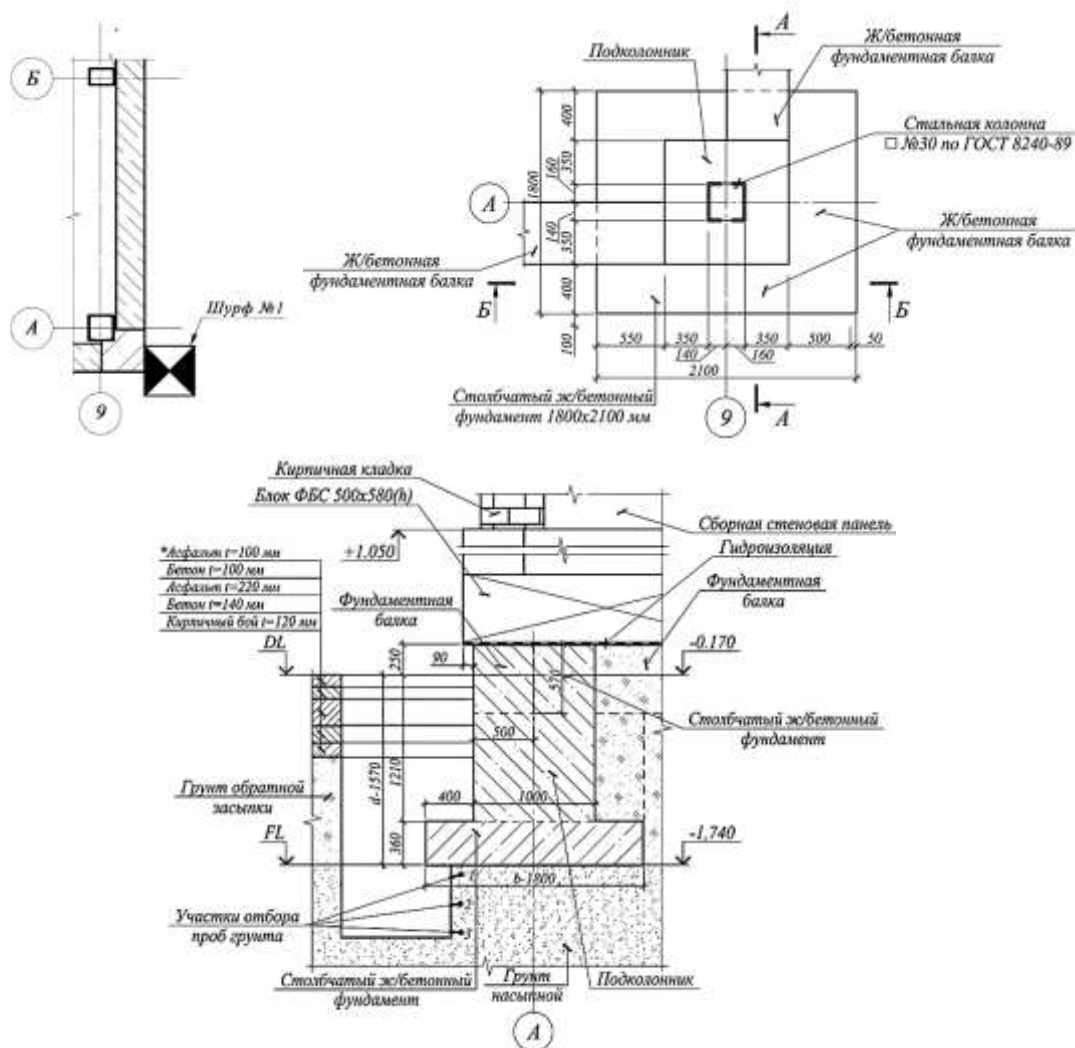


Рис. 2. Схема расположения шурфа №1 и сечения 1–1 и А–А

Столбчатый фундамент по шурфу № 2 в осях 5/Г под колонну выполнен в виде плиты из монолитного железобетона с габаритными размерами около $2,4 \times 2,4 \times 0,6(h)$ м. Сопряжение колонны каркаса с фундаментом обеспечено посредством подколонника из монолитного железобетона размерами $1,2 \times 1,2 \times 1,05(h)$ м. Глубина заложения фундамента от уровня планировочной отметки земли составляет около $d = 2,65$ м. На рис. 3 изображена схема расположения шурфа № 2 и сечение А–А.

Столбчатый фундамент по шурфу № 3 в осях 1/Ж под колонну выполнен в виде плиты из монолитного железобетона с габаритными размерами около $1,6 \times 1,6 \times 0,7(h)$ м. Спряжение колонны каркаса с фундаментом обеспечено посредством подколонника из монолитного железобетона размерами $1,2 \times 1,2 \times 0,9(h)$ м. Под наружные стены устроены фундаментные железобетонные балки с габаритными размерами около 500×570 мм. На уровне верха фундаментной балки выполнена горизонтальная гидроизоляция из слоя рубероида. Глубина заложения фундамента от уровня планировочной отметки земли составляет около $d = 1,6$ м. На рис. 4 изображена схема расположения шурфа № 3 и сечение А–А.

Столбчатый фундамент по шурфу № 4 в осях 1/А под колонну выполнен в виде плиты из монолитного железобетона с габаритными размерами около $1,8 \times 1,8 \times 0,6(h)$ м. Сопряжение колонны каркаса с фундаментом обеспечено посредством подколонника из монолитного железобетона размерами $1,0 \times 1,0 \times 1,0(h)$ м. Под наружные стены устроены фундаментные железобетонные балки с габаритными размерами около 500×570 мм. На уровне верха фундаментной балки выполнена горизонтальная гидроизоляция из слоя рубероида. Глубина заложения фундамента от уровня планировочной отметки земли составляет около $d = 2,0$ м. На рис. 5 изображена схема расположения шурфа № 4 и сечение А–А.

Фундамент по шурфу № 5 в осях 7/Е в сечениях А–А и Б–Б под стены лестничного блока выполнен в виде бетонных полов по насыпному грунту. Толщина полов составляет около 150 мм. Гидроизоляция полов отсутствует. Глубина заложения фундамента от уровня планировочной отметки земли составляет около $d = 1,05$ м. На рис. 6 изображена схема расположения шурфа № 5 и сечение А–А.

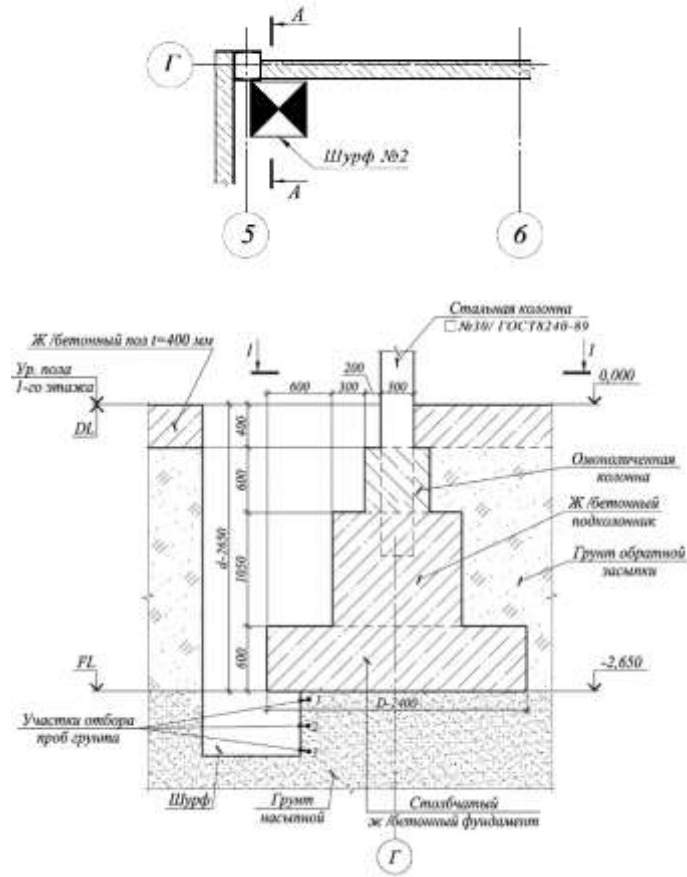


Рис. 3. Схема расположения шурфа № 2 и сечение А–А

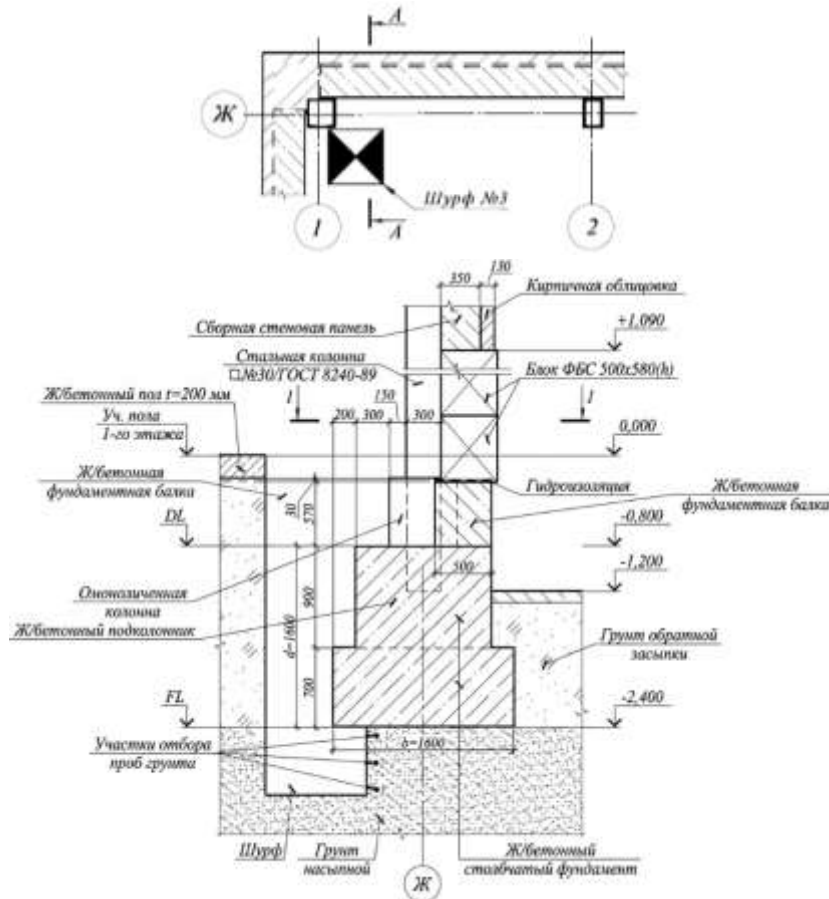


Рис. 4. Схема расположения шурфа № 3 и сечение А–А

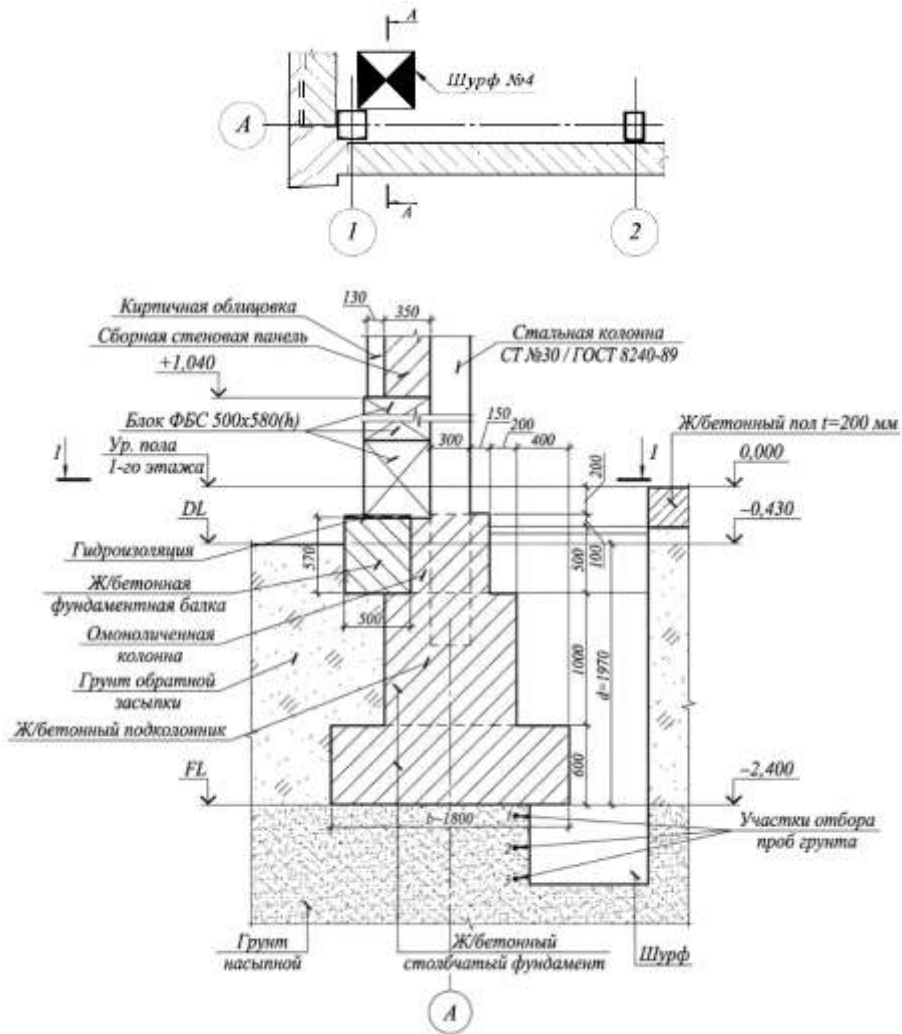


Рис. 5. Схема расположения шурфа № 4 и сечение А-А

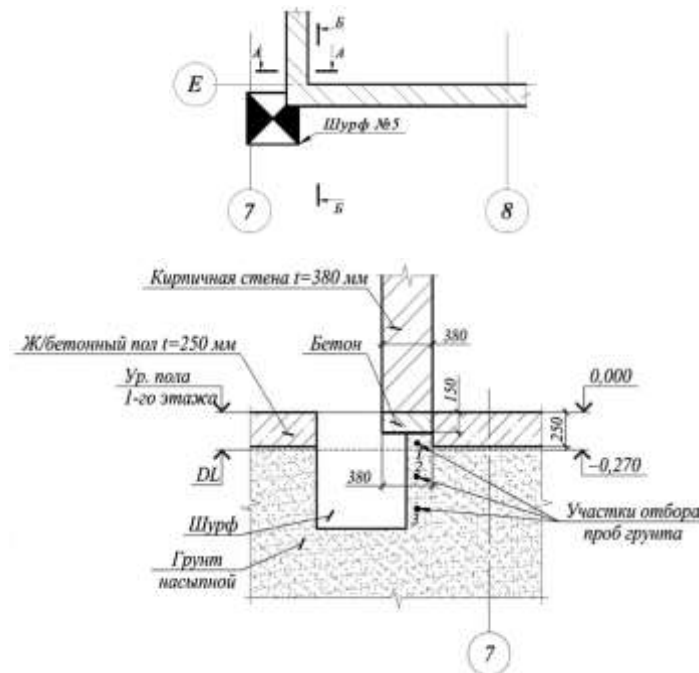


Рис. 6. Схема расположения шурфа № 5 и сечение А-А

Столбчатые фундаменты под колонны каркаса и фундаментные балки под самонесущие наружные стены выполнены из монолитного железобетона класса по прочности не ниже В20. Фундамент под стены лестничного блока выполнен в виде бетонных полов по грунту. Глубина заложения подошв столбчатых фундаментов от уровня планировочной отметки составляет 1,05–2,65 м.

По вскрытым шурфам №№ 1, 3, 4 горизонтальная гидроизоляция выполнена по верху фундаментных балок из слоя рубероида. Гидроизоляция фундаментов и полов по грунту отсутствует. Полы помещений первого этажа выполнены по грунту из монолитного бетона толщиной 150–400 мм. Дефектов фундаментов не выявлено. Прочность бетона столбчатых фундаментов и фундаментных балок, измеренная неразрушающими методами контроля, соответствует классу В20 с расчетным сопротивлением бетона сжатию $R_b = 11,5$ МПа.

По шурфу № 1 насыпные грунты песчаного состава на глубине 0,1–0,6 м от подошвы фундамента имеют следующие усредненные значения физических характеристик: плотность грунта $\rho = 18,8$ кН/м³; влажность $w = 0,184$; плотность грунта в сухом состоянии $\rho_d = 15,9$ кН/м³; плотность частиц грунта $\rho_s = 26,7$ кН/м³; коэффициент пористости $e = 0,67$; степень водонасыщения $S_r = 0,73$. Гранулометрический состав: > 2 мм — 4,8 %; > 0,5 мм — 8,2 %; > 0,25 мм — 24,7 %; > 0,1 мм — 46,7 %; < 0,1 мм — 15,6 %. Подстилающие насыпные грунты представлены слежавшимися качественными темно-серо-желтыми мелкими песками средней плотности, влажными, глинистыми с включениями крошки красного кирпича, известкового раствора и бутового камня-известняка.

Минимальные нормативные значения прочностных и деформационных характеристик подстилающих грунтов (согласно Приложению Б СП 22.13330.2011) следующие: удельное сцепление $c_n = 1$ кПа; угол внутреннего трения $\phi_n = 31^\circ$; модуль деформации $E = 26$ МПа.

При расчете оснований фундаментов по II группе предельных состояний использовались нормативные значения нагрузок продолжительного действия. При этом для полезных кратковременных нагрузок на перекрытия и от снега приняты длительные части путем умножения соответственно на понижающие коэффициенты 0,35 и 0,7. При выполнении поверочных расчетов фундаментов устанавливались расчетное сопротивление грунтов оснований, допустимая нагрузка на фундаменты, действующее или проектное давление по подошвам фундаментов с учетом принятой полезной нагрузки^{5,6,7} [15–21].

По шурфу № 1 в осях 9/А при габаритных размерах столбчатого фундамента около 2,1×1,8×0,36(н) м и глубине заложения около $d = 1,55$ м расчетное сопротивление — по минимальным нормативным значениям прочностных характеристик мелких песков при $c_n = 1$ кПа и $\phi_n = 31^\circ$ — составляет $R = 0,023$ МПа. Сбор нагрузок на фундамент в шурфе № 1 представлен в таблице 1.

Таблица 1

Сбор нагрузок. Шурф № 1

Нагрузки	$A_{гр}, \text{м}^2$	$q_n, \text{МПа}$	$q_p, \text{МПа}$	$N_n, \text{кН}$	$N_p, \text{кН}$
Нагрузки от покрытия					
Постоянные					
Вес покрытия и кровли	13,5	0,0056	0,0066	75,6	89,1
Временные					
Покрытие	13,5	0,0009	0,0013	11,9	17,0
Нагрузки от перекрытия над 1 этажом					
Постоянные					
Вес перекрытия, полов	13,5	0,0052	0,0061	70,2	82,4
Временные					
Временная полезная и перегородки	13,5	0,0012	0,0015	16,2	20,8
Суммарные нагрузки на фундамент					
Вес перекрытий				173,9	209,3
Вес стен и колонн				256,6	294,9
Вес фундамента				117,4	131,8
Суммарная нагрузка				547,9	636,0
Площадь подошвы столбчатого фундамента, м ²					3,78
Давление на основание от нормативных нагрузок, МПа					0,15

⁵ Техническая эксплуатация жилых зданий. Москва; 2012.

⁶ Римшин В.И., Кецо Е.С., Трунгов П.С. Большой строительный словарь. Том 2 П–Я. Москва: АСВ; 2022. 626 с.

⁷ Римшин В.И., Кецо Е.С., Трунгов П.С. Большой строительный словарь. Том 1 А–О. Москва: АСВ; 2022. 572 с.

Результаты исследования. На основании результатов выполненных поверочных расчетов расчетное сопротивление грунтов основания составляет 0,23 МПа. Максимальная допустимая нагрузка на фундамент с учетом определенного расчетного сопротивления грунтов основания и габаритов фундамента не должна превышать 0,23 МПа. Среднее давление по подошве фундамента с учетом принятой нормативной нагрузки на перекрытие 2 кН/м² составляет около 0,145 МПа. Требование п. 5.6.7 СП 22.13330.2011 выполняется.

Аналогичные поверочные расчёты выполнены для шурфов №№ 2–4. Результаты расчётов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты поверочных расчетов по шурфам

№ шурфа	R , МПа	N_{max} , МПа	p , МПа	Норм. нагрузка, кН/м ²	Выполнение п. 5.6.7 СП 22.13330.2011
1	0,23	$\leq 0,23$	0,145	2	Выполняется
2	0,13	$\leq 0,13$	0,175	2	Не выполняется
3	0,18	$\leq 0,18$	0,188	2	Не выполняется
4	0,28	$\leq 0,28$	0,195	4	Выполняется

R — расчетное сопротивление грунта основания, МПа; N_{max} — максимальная допустимая нагрузка на фундамент с учетом определенного расчетного сопротивления грунтов основания и габаритов фундамента; p — среднее давление по подошве фундамента с учетом принятой нормативной нагрузки на перекрытия, МПа.

В шурфе № 5 в осях 7/Е (Сечение А–А) при ширине подошвы ленточного фундамента около 0,38 м и глубине заложения около $d = 0,15$ м (стена опирается на бетонный пол толщиной около 150 мм) расчетное сопротивление при значении расчетного сопротивления грунтов основания, представленных насыпными мелкими влажными песками, равного (в соответствии с таблицей В.9 СП 22.13330.2011) $R_0 = 180$ кПа (отвалы грунтов без уплотнения при степени влажности не более 0,5), составляет $R = 0,09$ МПа. В соответствии с таблицей В.9 СП 22.13330.2011 расчетное сопротивление подстилающих насыпных грунтов для условного фундамента шириной подошвы 1,0 м и глубиной заложения 2,0 м составляет $R_0 = 180$ кПа. Сбор нагрузок на фундамент в шурфе № 5 (сечение А–А) представлен в таблице 3.

Таблица 3

Сбор нагрузок. Шурф № 5 (Сечение А–А)

Нагрузки	$A_{гр}$, м ²	q_n , МПа	q_p , МПа	N_n , кН	N_p , кН
Нагрузки от конструкций лестницы					
Постоянные нагрузки					
вес конструкций лестницы	2,8	0,0035	0,0039	9,8	10,8
Временные нагрузки					
временная полезная	2,8	0,0011	0,0013	2,9	3,5
Суммарные нагрузки на фундамент, МПа					
Конструкции лестницы				9,8	10,8
Вес стены				36,3	39,9
Вес фундамента				1,4	1,6
Временная полезная				2,9	3,5
Суммарная нагрузка				50,5	55,8
Ширина подошвы ленточного фундамента, м					0,38
Давление на основание от нормативных нагрузок, МПа					0,13

В шурфе № 5 в осях 7/Е (Сечение Б–Б) при ширине подошвы ленточного фундамента около 0,25 м и глубине заложения около $d = 0,15$ м (стена опирается на бетонный пол толщиной около 150 мм) расчетное сопротивление при значении расчетного сопротивления грунтов основания, представленных насыпными мелкими влажными песками, равного (в соответствии с таблицей В.9) $R_0 = 180$ кПа (отвалы грунтов без уплотнения при степени влажности не более 0,5), составляет $R = 0,09$ МПа. Сбор нагрузок на фундамент в шурфе № 5 (сечение Б–Б) представлен в таблице 4.

Таблица 4

Сбор нагрузок. Шурф № 5 (Сечение Б–Б)

Нагрузки	N_n , кН	N_p , кН
Вес стены	23,4	25,8
Вес фундамента	0,9	1,0
Суммарная нагрузка	24,3	26,8
Ширина подошвы ленточного фундамента, м		0,25
Давление на основание от нормативных нагрузок, МПа		0,0975

На основании результатов выполненных поверочных расчетов установлено следующее. В сечении А–А расчетное сопротивление грунтов основания составляет 0,09 МПа. Максимальная допустимая нагрузка на фундамент с учетом определенного расчетного сопротивления грунтов основания и габаритов фундамента не должна превышать 0,09 МПа. Среднее давление по подошве фундамента с учетом принятой нормативной нагрузки на лестницу 3 кН/м² составляет около 0,13 МПа. Требование п. 5.6.7 СП 22.13330.2011 не выполняется.

В сечении Б–Б расчетное сопротивление грунтов основания составляет 0,09 МПа. Максимальная допустимая нагрузка на фундамент с учетом определенного расчетного сопротивления грунтов основания и габаритов фундамента не должна превышать 0,09 МПа. Среднее давление по подошве фундамента составляет около 0,1 МПа. Требование п. 5.6.7 СП 22.13330.2011 не выполняется.

В связи с наличием на отдельных участках здания в основании фундаментов насыпных грунтов с низким расчетным сопротивлением (ниже значения расчетного давления) состояние фундаментов под колонны каркаса и стены лестничного блока характеризуется как неудовлетворительное — категория III (ограниченно работоспособное). По результатам проведенного технического обследования с учетом результатов поверочных расчетов (таблица 5) можно сделать вывод, что для дальнейшей нормальной эксплуатации здания на отдельных участках требуется выполнить мероприятия по усилению фундаментов или укреплению грунтов оснований.

Таблица 5

Результаты поверочных расчетов грунтов оснований и конструкций фундаментов

Место расположения фундамента	Несущая способность конструкций фундамента по материалу, МПа	Расчетное сопротивление грунтов основания, МПа	Допустимая нагрузка на грунты основания, МПа	Существующая нагрузка на фундамент, МПа	Коэффициент использования для грунта	Коэффициент использования для конструкций фундамента
Столбчатый фундамент по шурфу № 1 в осях 9/А	Определяется армированием конструкций	0,23	0,23	0,145	0,63	Определяется грунтом основания
Столбчатый фундамент по шурфу № 2 в осях 5/Г	Определяется армированием конструкций	0,13	0,13	0,175	1,35	Определяется грунтом основания
Столбчатый фундамент по шурфу № 3 в осях 1/Ж	Определяется армированием конструкций	0,18	0,18	0,188	1,04	Определяется грунтом основания
Столбчатый фундамент по шурфу № 4 в осях 1/А	Определяется армированием конструкций	0,28	0,28	0,195	0,7	Определяется грунтом основания
Ленточный фундамент по шурфу № 5 в осях 7/Е (Сечение А–А)	1,5	0,09	0,09	0,133	1,48	0,1
Ленточный фундамент по шурфу № 5 в осях 7/Е (Сечение Б–Б)	1,5	0,09	0,09	0,1	1,09	0,07

Обсуждение и заключение. Проведенное комплексное техническое обследование здания с применением современных методов неразрушающего контроля и поверочных расчетов позволило выявить текущее техническое состояние конструктивных элементов и оснований.

По результатам выполненного технического обследования можно сделать вывод, что состояние здания оценивается как удовлетворительное — категория II (работоспособное) за исключением фундаментов под колоннами каркаса и стенами лестничного блока, состояние которых характеризуется как неудовлетворительное — категория III (ограниченно работоспособное).

Установлено, что для обеспечения нормальной эксплуатации здания на участках с насыпными грунтами (шурфы № 2, № 3, № 5) необходимо выполнение мероприятий по усилению фундаментов или укреплению оснований. Усиление ленточных фундаментов под стены лестничного блока может быть выполнено уширением подошвы или укреплением грунтов оснований, столбчатых фундаментов под колонны — устройством свайного основания или укреплением грунтов оснований. Уширение подошвы фундаментов стен лестничного блока рекомендуется выполнить путем устройства монолитной железобетонной обоймы (шириной не менее 300 мм) или подводкой. Окончательные габаритные размеры конструкций усиления следует определять расчетом. Свайное

основание под колонны каркаса может быть выполнено из вертикальных буроинъекционных свай. Совместная работа свай и конструкций фундаментов должна обеспечиваться за счет перевязки арматурных каркасов свай с конструкциями фундаментов и последующим их бетонированием. Укрепление грунтов основания может быть выполнено за счет инъецирования в грунты цементного или специальных растворов.

Рассмотренная методика комплексной оценки эксплуатационной безопасности при различных технических состояниях фундаментов здания повышает прогноз работоспособности, несущей способности и долговечности и применима к аналогичным объектам.

Список литературы/References

1. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Щербань Е.М. Расчет и проектирование строительных конструкций с учетом вариативности структуры, сечений и дифференциации конструктивных характеристик материалов. *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2021;2(62):27–48. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.62.2.002>

Mailyan LR, Stel'makh SA, Shcherban' EM Calculation and Design of Building Structures Given the Variatropy of the Structure, Sections, and Differentiation of Constructive Characteristics of the Materials. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2021;2(62):27–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.62.2.002>

2. Варламов А.А., Римшин В.И. *Модели поведения бетона. Общая теория деградации*. Москва: Инфра-М; 2019. 435 с.

Varlamov AA, Rimshin VI *Models of Concrete Behavior. General Theory of Degradation*. Moscow: Infra-M; 2019. 435 p. (In Russ.).

3. Римшин В., Курбатов В., Анпилов С., Кецко Е. Проектирование мероприятий по реконструкции объектов жилищно-коммунального комплекса. *Русский инженер*. 2022;2(75):44–47. URL: http://www.promweekly.ru/archive/ri/2022/RI_2_2022.pdf (дата обращения: 02.03.2026).

Rimshin V, Kurbatov V, Anpilov S, Ketsko E Design of Reconstruction Measures for Housing and Public Utilities Facilities. *Russian Engineer*. 2022;2(75):44–47. (In Russ.). URL: http://www.promweekly.ru/archive/ri/2022/RI_2_2022.pdf (accessed: 02.03.2026)

4. Mailyan L., Yazyev S., Sabitov L., Konoplev Yu., Radaykin O. Stress-strain state of the system «combined tower-reinforced concrete foundation-foundation soil» of high-rise structures. *Construction Materials and Products*. 2019;2(6):29–37. <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2019-2-6-29-37>

5. Римшин В.И., Анпилов С.М., Кришан А.Л., Астафьева М.А., Ступак А.А. Прочность коротких трубобетонных колонн квадратного сечения. *Русский инженер*. 2023;2(79):46–48. URL: http://www.promweekly.ru/archive/ri/2023/RI_2_2023.pdf (дата обращения: 02.03.2026).

Rimshin VI, Anpilov SM, Krishan AL, Astafieva MA, Stupak AA Strength of Short Square-Section Tube-Reinforced Concrete Columns. *Russian Engineer*. 2023;2(79):46–48. (In Russ.) URL: http://www.promweekly.ru/archive/ri/2023/RI_2_2023.pdf (accessed: 02.03.2026)

6. Римшин В.И., Кецко Е.С., Быков Г.С., Кузина И.С. Теория деградации в приложении к определению прочностных характеристик бетона в зонах огневого и теплового воздействия. *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2024;6(1078):48–50. URL: <http://bstmag.ru/article?id=2631> (дата обращения: 02.03.2026).

Rimshin V.I., Ketsko E.S., Bykov G.S., Kuzina I.S. Degradation Theory as Applied to Determining the Strength Characteristics of Concrete in Fire and Heat Exposure Zones. *BST: Bulletin of Construction Equipment*. 2024;6(1078):48–50. (In Russ.) URL: <http://bstmag.ru/article?id=2631> (accessed: 02.03.2026)

7. Римшин В.И., Кецко Е.С., Керн А.Е., Макарова Е.С. Расчетный анализ конструктивных схем промышленного здания. *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2025;3(1087):15–17. URL: <http://bstmag.ru/article?id=2726> (дата обращения: 02.03.2026).

Rimshin VI, Ketsko ES, Kern AE, Makarova ES Calculation Analysis of Industrial Building Structural Schemes. *BST: Bulletin of Construction Equipment*. 2025;3(1087):15–17. (In Russ.). URL: <http://bstmag.ru/article?id=2726> (accessed: 02.03.2026)

8. Римшин В.И., Кецко Е.С., Кузина И.С., Быков Г.С. Технические решения экологических проблем на очистных сооружениях. В: *Сборник материалов I национальной научно-практической конференции с международным участием «Экологические аспекты современных городов»*. Иваново: ИВГПУ; 2024. С. 91–93.

Rimshin VI, Ketsko ES, Kuzina IS, Bykov GS Technical Solutions to Environmental Problems at Wastewater Treatment Facilities. Environmental Aspects of Modern Cities. *Proceedings of the 1st National Scientific and Practical Conference with International Participation*. Ivanovo: ISPU; 2024. P. 91–93. (In Russ.).

9. Римшин В.И., Кецко Е.С., Кузина И.С., Керн А.Е., Макарова Е.С. Оценка остаточного ресурса несущих конструкций здания. *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2025;4(1088):50–53. URL: <http://bstmag.ru/article?id=2754> (дата обращения: 02.03.2026).

Rimshin VI, Ketsko ES, Kuzina IS, Kern AE, Makarova ES Residual Life Assessment of Load-Bearing Structures of the BST Building. *Bulletin of Construction Equipment*. 2025;4(1088):50–53. (In Russ.) URL: <http://bstmag.ru/article?id=2754> (accessed: 02.03.2026)

10. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Beskopylny A.N., Mailyan L.R., Shilov A.A., Razveeva I. et al. Enhancing the mechanical properties of sulfur-modified fly ash/metakaolin geopolymers with polypropylene fibers. *Polymers*. 2025;17(15):2119. <https://doi.org/10.3390/polym17152119>

11. Римшин В.И., Кришан А.Л., Астафьева М.А., Кецо Е.С., Быков Г.С. Диссипативная теория в приложении исследования трубобетонных конструкций жилы х зданий. *Строительные материалы*. 2024;6:4–7. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-825-6-4-7>

Rimshin VI, Krishan AL, Astafieva MA, Ketsko ES, Bykov GS Dissipative Theory in the Residential Buildings Pipe-Concrete Structures Study. *Construction Materials*. 2024;6:4–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-825-6-4-7>

12. Римшин В.И. Повреждения и методы расчета усиления железобетонных конструкций. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва; 2001. 333 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/povrezhdeniya-i-metody-rascheta-usileniya-zhelezobetonnykh-konstruktsii> (дата обращения: 02.03.2026).

Rimshin VI *Damage and Methods for Calculating Strengthening of Reinforced Concrete Structures*. Dissertation for the Degree of Doctor of Sciences in Engineering. Moscow; 2001. 333 p. (In Russ.) URL: <https://www.dissercat.com/content/povrezhdeniya-i-metody-rascheta-usileniya-zhelezobetonnykh-konstruktsii> (accessed: 02.03.2026)

13. Римшин В.И., Варламов А.А., Курбатов В.Л., Анпилов С.М. Развитие теории деградации бетонного композита. *Строительные материалы*. 2019;6:12–17. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-12-17>

Rimshin VI, Varlamov AA, Kurbatov VL, Anpilov SM Development of the Theory of Concrete Composite Degradation. *Construction Materials*. 2019;6:12–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-12-17>

14. Римшин В.И., Рощина С.И., Усанов С.В. Применение информационного моделирования зданий на примере спортивного объекта. *Русский инженер*. 2024;2(83):44–48. URL: http://www.promweekly.ru/archive/ri/2024/RI_2_2024.pdf (дата обращения: 02.03.2026).

Rimshin VI, Roshchina SI, Usanov SV Application of Building Information Modeling: A Sports Facility Case Study. *Russian Engineer*. 2024;2(83):44–48. (In Russ.) URL: http://www.promweekly.ru/archive/ri/2024/RI_2_2024.pdf (accessed: 02.03.2026)

15. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А. *Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика*. Москва; АСВ; 2020. 322 с.

Krishan AL, Rimshin VI, Astafieva MA *Compressed Concrete Tube Elements: Theory and Practice*. Moscow; ASV; 2020. 322 p. (In Russ.).

16. Monastirev P.V., Elchishcheva T.F., Makarchuk M.V., Erofeev V.T., Rimshin V.I., Erofeeva I.V. The effect of montmorillonite on the rheological and physico-mechanical properties of a thermosetting polymer composite. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024;20(2):109–117. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-2-109-117>

17. Rimshin V.Iv., Kurbatov V.L., Erofeev V.T., Ketsko E.S. Degradation damages survey of the silt reservoir structures. *Building and Reconstruction*. 2022;2(100):65–74.

18. Rimshin V.I., Kurbatov V.L., Erofeev V.T., Ketsko E.S. Comprehensive survey of the silt reservoir structures technical condition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1079:042077. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/4/042077>

19. Dawood S., Rimshin V.I., Suleymanova L., Amelin P.A., Kryuchkov A., Bulgakov A. Investigation of the effects of exposure to a chloride-aggressive environment on flexible reinforced concrete elements with reinforcement damage through experimental studies. *International Review of Civil Engineering*. 2025;16(2):123. <https://doi.org/10.15866/irece.v16i2.25443>

20. Ahtyamova L., Sabitov L., Mailyan A., Mailyan L., Radaykin O. Technological and design features of designing a modular reinforced concrete foundation for a high-rise building of various types. *Construction Materials and Products*. 2019;2(6):5–11. <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2019-2-6-5-11>

21. Сколубович Ю.Л., Анпилов С.М., Добровольский Д.А., Ерофеев В.Т., Леонович С.Н., Маилян Л.Р. и др. Способы продления жизненного цикла зданий с деревянными перекрытиями. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024;9(789):88–103. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-789-9-88-103>

Skolubovich YuL, Anpilov SM, Dobrovolsky DA, Erofeev VT, Leonovich SN, Mailyan LR, Rimshin VI, Sorochaikin AN Methods for Extending the Life Cycle of Buildings with Wooden Floors. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024;9(789):88–103. (In Russ.) <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-789-9-88-103>

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), [ScopusID](#), [ORCID](#), v.rimshin@niisf.ru

Евдокименко Александр Сергеевич, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики, управления, социологии и педагогики, Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) (630008, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113), [ORCID](#), as@sibstrin.ru

Кецко Екатерина Сергеевна, аспирант Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, Российская Федерация, г. Москва, Локомотивный проезд, 21), [ORCID](#), kkuzzina@mail.ru

Воробьев Александр Евгеньевич, студент Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) (630008, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113), [ORCID](#), a.vorobyev@sibstrin.ru

Савельев Егор Сергеевич, студент Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) (630008, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113), [ORCID](#), e.savelyev@sibstrin.ru

Заявленный вклад соавторов:

В.И. Римшин: научное руководство, формирование основной концепции, целей и задач исследования, методологическая экспертиза, рецензирование всех версий рукописи, утверждение результатов и выводов, утверждение финальной версии для публикации.

А.С. Евдокименко: разработка концепции исследования, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Е.С. Кецко: подготовка материалов исследования, сбор и верификация данных, формирование и редактирование финальной версии рукописи.

А.Е. Воробьев: сбор данных, обработка результатов, создание таблиц.

Е.С. Савельев: сбор данных, обработка результатов, подготовка литературы.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на результаты представленного в статье исследования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Vladimir I. Rimshin, D.Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Housing and Communal Services 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 Communal Services and Radiation Safety in Construction at the Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (21 Locomotive Passage, Moscow, 127238, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), v.rimshin@niisf.ru

Alexandr S. Evdokimenko, Cand.Sci. (Economics), Associate Professor of the Department of Economics, Management, Sociology and Pedagogy, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (113 Leningradskaya Str., Novosibirsk, 630008, Russian Federation), [ORCID](#), as@sibstrin.ru

Ekaterina S. Ketsko, Postgraduate Student at the Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (21 Locomotive Passage, Moscow, 127238, Russian Federation), [ORCID](#), kkuzzina@mail.ru

Alexandr E. Vorobyev, Student of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (113 Leningradskaya Str., Novosibirsk, 630008, Russian Federation), [ORCID](#), a.vorobyev@sibstrin.ru

Egor S. Savelyev, Student of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (113 Leningradskaya Str., Novosibirsk, 630008, Russian Federation), [ORCID](#), e.savelyev@sibstrin.ru

Claimed contributorship:

VI Rimshin: scientific supervision, formation of the basic concept, aims and objectives of the research, methodological expertise, review of all versions of the manuscript, approval of the results and conclusions, approval of the final version for publication.

AS Evdokimenko: development of the research concept, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

ES Ketsko: preparation of the research materials, collection and verification of the data, formation and editing of the final version of the manuscript.

AE Vorobyev: collection of the data, processing of the results, design of the tables.

ES Savelyev: collection of the data, processing of the results, preparation of the references.

Conflict of interest statement: the authors state that there are no known financial conflicts of interest or personal relationships that could affect the results of the research presented in the article.

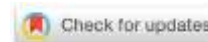
All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 03.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 20.03.2026

Принята к публикации / Accepted 08.04.2026

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 624.04:004.032.26

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-22-31>

Комбинированный подход конечно-элементного анализа и искусственных нейронных сетей для диагностики сечений строительных конструкций, ослабленных концентраторами напряжений



EDN: QPXUQL

Б.В. Соболев¹  , Е.В. Рашидова¹ , П.В. Васильев² , В.В. Иващенко¹ 

¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

² ООО «ДонНовоТех», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

 b.sobol@mail.ru

Аннотация

Введение. Исследование посвящено разработке нового метода идентификации дефектов в строительных конструкциях с концентраторами напряжений. Метод основан на интеграции теневого ультразвукового контроля с алгоритмами глубокого обучения, что позволит достичь точной диагностики с достоверным определением геометрических характеристик дефектов.

Материалы и методы. Использовалась конечно-элементная модель области с угловой точкой и демпфирующими слоями из металла с гибким покрытием. Ультразвуковой актуатор и приемник размещались на противоположных гранях. На распределенной вычислительной системе проведены численные эксперименты с варьированием геометрии и материалов области и параметров дефектов. Полученные сигналы преобразованы в спектрограммы, которые использовались для обучения сверточной нейронной сети, устанавливающей связь между спектрограммой и параметрами дефекта.

Результаты исследования. Сформирован обширный датасет спектрограмм. Обученная нейронная сеть продемонстрировала способность с высокой точностью определять по спектрограмме ключевые параметры дефекта: размер, положение и ориентацию. Верификация метода показала, что он превосходит по точности и скорости традиционные методы анализа ультразвуковых сигналов.

Обсуждение и заключение. Подтверждена эффективность гибридного подхода для неразрушающего контроля в сложных геометрических условиях. Основное преимущество — автоматизированный и интеллектуальный анализ данных, снижающий субъективность. Практическая значимость — создание прототипа адаптивной диагностической системы. Перспективы связаны с дообучением на экспериментальных данных и интеграцией в портативные комплексы для мониторинга конструкций.

Ключевые слова: строительные конструкции, неразрушающий контроль, ультразвуковая диагностика, концентратор напряжений, теневой метод, глубокое обучение, сверточная нейронная сеть, конечно-элементное моделирование, идентификация дефектов, спектрограмма

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

Для цитирования: Соболев Б.В., Рашидова Е.В., Васильев П.В., Иващенко В.В. Комбинированный подход конечно-элементного анализа и искусственных нейронных сетей для диагностики сечений строительных конструкций, ослабленных концентраторами напряжений. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(2):22–31. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-22-31>

A Combined Finite Element Analysis and Artificial Neural Network Approach for Diagnostics of Building Cross-Sections Weakened with Stress Concentrators

Boris V. Sobol¹  , Elena V. Rashidova¹ , Pavel V. Vasiliev² , Valeria V. Ivashchenko¹ 

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

² DonNovoTech LLC, Rostov-on-Don, Russian Federation

 b.sobol@mail.ru

Abstract

Introduction. The study is dedicated to developing a new method for identifying defects in building structures with stress concentrators. The method is based on the integration of shadow ultrasonic testing with deep learning algorithms, which would enable accurate diagnosis with reliably identifying the geometric characteristics of defects.

Materials and Methods. A finite element model of an area with an angular point and damping layers made of metal with a flexible coating was used. An ultrasonic actuator and receiver were placed on the opposite edges. Numerical experiments with changes in the geometry and materials of the area and defect parameters were conducted on a distributed computing system. The resulting signals were converted into spectrograms which were used in order to train a convolutional neural network that establishes a connection between the spectrogram and the defect parameters.

Results. An extensive dataset of spectrograms has been formed. The trained neural network has displayed the ability to accurately identify the key defect parameters based on a spectrogram such as size, position, and orientation. Verification of the method has shown that it outperforms the traditional methods of ultrasonic signal analysis in terms of its accuracy and speed.

Discussion and Conclusion. The hybrid approach for non-destructive testing in complex geometric conditions has been proven to be effective. The major advantage is automated and intelligent data analysis reducing a degree of subjectivity. The practical significance is the creation of a prototype adaptive diagnostic system. Prospects are related to further training on experimental data and integration into portable systems for monitoring structures.

Keywords: building structures, non-destructive testing, ultrasonic diagnostics, stress concentrator, shadow method, deep learning, convolutional neural network, finite element modeling, defect identification, spectrogram

Acknowledgements. The authors would like to thank the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the above comments making it possible to improve its quality.

For citation. Sobol BV, Rashidova EV, Vasiliev PV, Ivashchenko VV A Combined Finite Element Analysis and Artificial Neural Network Approach for Diagnostics of Building Cross-Sections Weakened with Stress Concentrators. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):22–31. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-22-31>

Введение. Фундаментальной научной задачей, на решение которой направлено данное исследование, является изучение проблем прочности и надежности ответственных элементов строительных конструкций с учетом наличия в них внутренних концентраторов напряжений (дефектов). В процессе решения данной научной проблемы реализован комплексный подход, который заключается в следующем. На первом этапе производится диагностика сечений элементов конструкций на предмет выявления в них технологических или эксплуатационных дефектов. На втором этапе производится решение задач механики деформируемого твердого тела для этих элементов с учетом выявленных дефектов, и делаются выводы об их работоспособности [1, 2].

Исходной постановкой задачи на первом этапе является анализ вынужденных колебаний области с угловой точкой в рамках теории упругости, описываемый соответствующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij,j} &= \rho \ddot{u}_i, \\ \sigma_{ij} &= c_{ijkl} u_{k,l}.\end{aligned}$$

Искомые функциями являются компоненты вектора смещений u_i ($i = 1, 2, 3$), система уравнений связывает их с тензором напряжений σ_{ij} через упругие постоянные c_{ijkl} и плотность материала ρ , дополняя граничными условиями:

$$\begin{aligned}u_i|_{S_u} &= u_i^{(0)} \\ \sigma_{ij} n_j|_{S_t} &= p_i \\ \sigma_{ij} n_j|_{S_d} &= q_i.\end{aligned}$$

Граничные условия определяются на поверхностях S_u (заданными перемещениями $u_i^{(0)}$), S_t (заданными нагрузками p_i, q_i , с учётом нормали n_i) и S_d , представляющей поверхность самого разрыва трещины в направлении, параллельном оси аппликат.

Выявление дефектов, к которым относятся трещины и посторонние примеси, представляет собой обратную задачу геометрического типа в механике деформируемого твердого тела [3], где требуется найти контуры дефектов, включая их форму, местоположение и размеры, что непосредственно определяет границы берегов S_d .

В исходной постановке принимается, что берега трещины не контактируют друг с другом и являются свободными от напряжений, что соответствует условию

$$q_i = 0.$$

Поставленная обратная задача идентификации границ дефекта не может быть решена исключительно на основе граничных условий в силу своей некорректности. Для обеспечения устойчивости решения осуществляется привлечение дополнительных экспериментальных данных – амплитудно-временных характеристик (АВХ) поля перемещений \bar{U} , регистрируемых на свободной поверхности.

$$X: u_i = U_i(\bar{x}_j, t).$$

Здесь t представляет собой длительность временного интервала $[0, T]$ записи сигнала, N — общее количество контрольных узлов \bar{x}_j на поверхности S_t , в которых производились замеры АВХ.

Материалы и методы. В работе анализируется модель (рис. 1) области с угловой точкой с покрытием, которая содержит внутренний дефект. Указаны зоны расположения актуатора и датчиков.

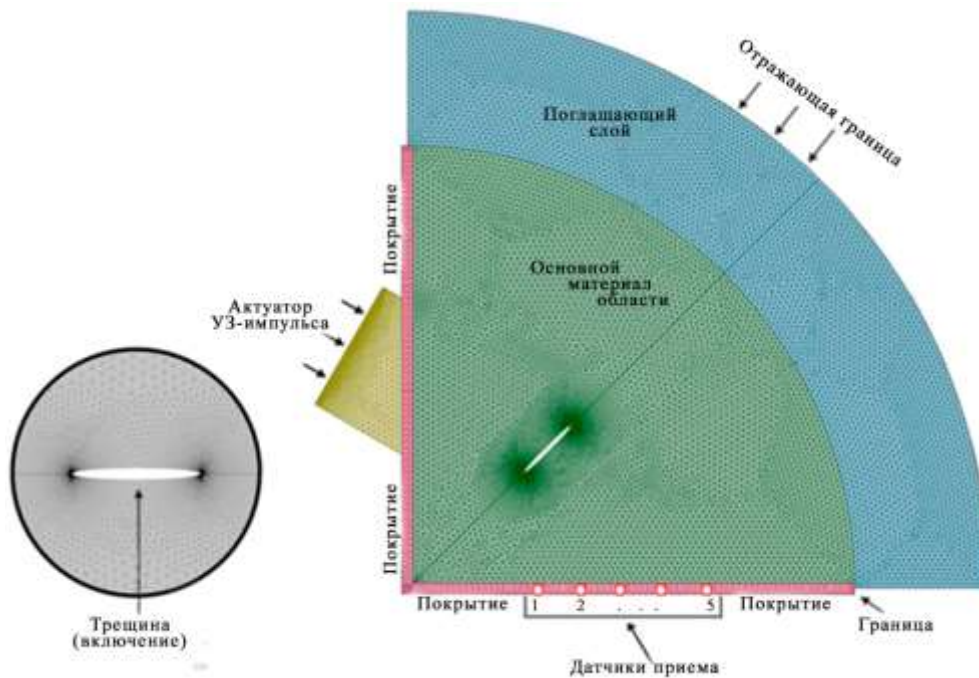


Рис. 1. Исследуемая модель структуры с угловой точкой

Для проведения численного моделирования использовался пакет прикладных программ ANSYS Mechanical версии 2023 R1, который позволяет проводить симуляции сложных физических явлений, включая механику конструкций [4].

Модуль пакета Explicit Dynamics служит инструментом для моделирования распространения упругих волн, демонстрируя высокую точность в сложных и неоднородных материалах. Важным элементом таких расчетов являются специальные поглощающие слои, которые применяются в конечно-элементном анализе для реализации неотражающих граничных условий и минимизации паразитных отражений волн. Они предназначены для аппроксимации бесконечной области, имитируя поведение волн при их взаимодействии с бесконечной средой. Основное функциональное назначение поглощающих слоев — подавление отражений волновой энергии от искусственных границ расчетной области, которые могут приводить к нефизическим результатам и нарушению устойчивости решения.

С методологической точки зрения используемый подход опирается на аппроксимацию искомых функций с помощью кусочно-полиномиальных базисных функций. Алгоритмическая реализация метода ориентирована на проведение расчетов для моделей, имеющих значительное число степеней свободы [5]. Базовыми зависимыми

переменными, определяющими математическую модель модуля, являются скорость и деформация. Для математического описания диссипативных процессов используется модель демпфирования Рэлея.

В основе метода лежит решение системы уравнений, описывающей поведение линейно-упругой среды

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial v}{\partial t} - \operatorname{div} S &= F_v, \\ 2 \frac{\partial E}{\partial t} - [\nabla v + (\nabla v)^T] &= 0, \\ S &= C : \epsilon.\end{aligned}$$

Система описывает закон сохранения импульса (уравнение движения), в котором v — вектор скорости; ρ — плотность материала; S — тензор напряжений Коши; $\operatorname{div} S$ — результирующая поверхностная сила; F_v — вектор внешних объемных сил; кинематическое соотношение, связывающее скорость изменения деформаций (ϵ — тензор деформаций) с градиентом скорости и обобщенный закон Гука (C — тензор упругости).

Скорости распространения упругих волн в сплошной среде находятся в прямой зависимости от ее механических свойств, а именно модуля Юнга (E) и коэффициента Пуассона (ν). Данная связь для скоростей продольной (c_p) и поперечной (c_s) волн математически выражается следующими соотношениями:

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}.$$

Использование явной схемы интегрирования требует специального задания внутренних граничных условий в области соединения покрытия и основного материала, особенно в присутствии угловых точек. Данные условия формулируются с учетом скачка физико-механических характеристик на контакте разнородных материалов. Они обеспечивают непрерывность поля скоростей и равенство нормальных составляющих вектора напряжения:

$$\begin{aligned}v_1 - v_2 &= 0, \\ (S_1 - S_2)n &= 0,\end{aligned}$$

где индексы «1» и «2» обозначают значения параметров на противоположных сторонах границы раздела, а n — единичный вектор нормали к ней.

Для подавления нежелательных отражений от границ расчетной области в модели используется поглощающий слой. Его алгоритм объединяет использование трех методов: масштабирование координат, применение фильтров и наложение простых неотражающих условий. При моделировании выбрана цилиндрическая геометрия поглощающего слоя из-за симметричного расположения относительно угловой точки изучаемой области. Конфигурация поглощающего слоя в цилиндрической системе координат обеспечивает изотропное поглощение волновой энергии независимо от направления ее распространения. Данный подход минимизирует эффект отражения волн от искусственных границ расчетной области, возвращая их энергию обратно в домен.

Несмотря на высокую эффективность методики поглощающих слоев для подавления паразитных граничных отражений, ее применение сопряжено с рядом ограничений. Определенные свойства моделируемых сред могут вызывать преждевременное отражение волн на внутренних неоднородностях до их взаимодействия с демпфирующим слоем. Дополнительным фактором являются возросшие вычислительные затраты, особенно выраженные в задачах с большим количеством степеней свободы. В связи с этим решение о реализации поглощающих слоев требует предварительного анализа и должно быть обосновано спецификой решаемой задачи.

С целью обеспечения минимального отражения волновых возмущений от особенности геометрии в виде угловой точки на правой границе структуры (рис. 1) реализовано специальное граничное условие. Оно минимизирует волновое отражение за счет согласования свойств границы со средой, позволяя продольным и поперечным волнам беспрепятственно покидать область моделирования. Совместное применение этого условия с методикой поглощающих слоев формирует высокоэффективный механизм поглощения для большинства возможных углов падения волн.

Корректное моделирование распространения ультразвуковых волн в упругих средах требует адекватной дискретизации расчетной области [6]. Точность и устойчивость решения в значительной степени определяются параметрами конечно-элементной сетки, которые должны удовлетворять ряду критериев. Ключевым требованием является обеспечение пространственного разрешения, достаточного для аппроксимации самого коротковолнового компонента волнового поля. Для этого максимальный характерный размер элемента сетки (h) должен быть меньше минимальной длины моделируемой волны (λ_{min}). Данное условие может быть формализовано следующим соотношением:

$$h \leq \lambda_{min} / n,$$

где n — количество элементов на длину волны, определяемое порядком используемых конечных элементов и требуемой точностью (как правило, $n \geq 6-10$ для линейных элементов, обычно используется значение $n = 5$).

Особые требования предъявляются к дискретизации областей, прилегающих к границам раздела материалов. Для корректного описания процессов отражения и прохождения волны необходимо локальное увеличение плотности сетки. Обязательным этапом подготовки модели является верификация качества сетки. Критически важными параметрами являются уровень искажения элементов и их соотношение сторон. Превышение допустимых пределов по данным параметрам может привести к ухудшению обусловленности системы уравнений и возникновению численной дисперсии. Параметры пространственной дискретизации определяются волновыми свойствами упругой среды, при этом определяющим фактором выступает мода, обладающая наибольшей фазовой скоростью. Критическим параметром при построении сетки является минимальная длина волны λ_p , связанная с данной модой, которая задает требуемое пространственное разрешение. Для явной схемы интегрирования, используемой в модуле Explicit Dynamics, применение элементов повышенного порядка аппроксимации обуславливает необходимость соблюдения следующего критерия к максимальному размеру элемента:

$$h_{max} = \frac{\lambda_{max}}{1,5} = \frac{c_{max}}{1,5 \cdot f_{max}},$$

где f_{max} — верхняя граница частотного диапазона, подлежащего разрешению в ходе моделирования волновых процессов.

Геометрическая параметризация сетки должна адекватно аппроксимировать особенности структуры, включая криволинейные границы эллиптического дефекта, локализованного в окрестности угловой точки. Детализация сетки в окрестности вершин данного дефекта иллюстрируется на рис. 1 (нижний левый фрагмент). Используемые в модели настройки коэффициента кривизны обеспечивают высокое качество аппроксимации геометрии, соответствующее требованиям применяемого численного метода.

Устойчивость явной схемы интегрирования, применяемой в данной работе, определяется критерием Куранта-Фридрихса-Леви, который устанавливает жесткое ограничение на величину расчетного шага по времени. Величина глобального шага по времени лимитируется минимальным в расчетной области значением отношения характерного размера конечного элемента к скорости распространения наиболее быстрой объемной волны c_p . Таким образом, разрешенный временной интервал определяется наименьшим размером элемента сетки.

Критерии пространственной дискретизации для каждого компонента композитной структуры устанавливаются на основе дисперсионных характеристик материала, в частности скорости распространения доминирующей упругой моды. Это обуславливает необходимость применения адаптивной сетки с повышенной плотностью элементов в областях концентрации волновых полей — зоне локализации дефекта и области ввода акустического воздействия.

На основании приведенных расчетных зависимостей несущая частота зондирующего импульса была установлена на уровне 0,5 МГц. Возбуждающий сигнал формируется в виде синусоидального заполнения, модулированного оконной функцией Хеннинга, и задается посредством следующих граничных условий:

$$S_n = F_A(t), F_A = -p(t)n.$$

Оптимизация вычислительного процесса и параметров моделирования позволила провести необходимый объем численных экспериментов в рамках ограниченных временных ресурсов. На рис. 1 представлена геометрическая конфигурация расчетной области, параметры которой приведены в таблице 1. Модель включает двухкомпонентную структуру, состоящую из покрытия на основе алюминиевого сплава и подложки из стали, формирующей зону угловой особенности.

Результаты исследования. Для повышения устойчивости решения в работе используются дополнительные экспериментальные данные — АВХ поля перемещений, зарегистрированные на свободной поверхности. Найденная совокупность указанных данных позволяет провести идентификацию дефекта. Предложенный подход, интегрирующий теневой УЗ-метод и алгоритмы глубокого обучения, позволяет не только идентифицировать дефекты, но и определять геометрические параметры областей с угловой точкой. Данное комбинированное решение демонстрирует существенное превосходство в скорости, точности и надежности над традиционными методами неразрушающего контроля [6].

Для верификации точности и повышения надежности методики разработана конечно-элементная модель, описывающая процесс распространения ультразвуковых волн. С целью минимизации искажающего влияния паразитных отражений в модель введены специальные демпфирующие слои, поглощающие эти сигналы и предотвращающие их распространение в области с угловой точкой. На основе данной модели реализован теневой метод УЗ-сканирования, где преобразователь и приемник располагаются на противоположных сторонах контролируемого объекта.

Для формирования обучающей выборки в распределенной вычислительной среде выполнена серия численных экспериментов, предполагающих многовариантное решение задач с изменением геометрических параметров: локации источника и приемника сигнала, а также конфигурации внутреннего дефекта. Обучающая выборка

для нейросетевой модели сформирована на основе параметрического анализа методом конечных элементов. В соответствии с методикой, представленной в работах [7, 8], сформирован сбалансированный набор данных, включающий результаты моделирования с вариацией геометрических параметров системы. Полученный массив данных использован для обучения нейросетевой модели, задачей которой являлась бинарная классификация наличия дефекта и регрессия его пространственных характеристик.

Таблица 1

Основные параметры конечно-элементной модели из стали с покрытием сплавом алюминия

Параметр	Значение
Угол раскрытия области с угловой точкой	90 °
Толщина покрытия	1 мм
Размер области с угловой точкой	150 мм
Длина трещины	20 мм
Толщина трещины	2 мм
Удаленность трещины от угловой точки	30 мм
Удаленность актуатора и приемника от угловой точки	25 мм
Скорость распространения продольной волны в покрытии	6 197 м/с
Скорость распространения продольной волны в теле области с угловой точкой	5 778 м/с
Плотность покрытия	2,7 г/см ³
Плотность тела области с угловой точкой	7,85 г/см ³
Модуль Юнга покрытия	70 ГПа
Модуль Юнга тела области с угловой точкой	200 ГПа
Коэффициент Пуассона покрытия	0,33
Коэффициент Пуассона тела области с угловой точкой	0,29
Частота ультразвукового сигнала	0,5 МГц

Диапазоны варьирования параметров включали: длину дефекта — 5–25 мм (20 дискретных значений); ширину дефекта — 0,5–2,5 мм (20 значений); положение дефекта — 5–50 мм (20 значений); позицию актуатора — 0–80 мм (20 значений).

В соответствии с принятой методологией в 5 % случаев анализировались интактные модели, не содержащие дефектов. Элементы обучающей выборки были представлены спектрограммами, сгенерированными посредством алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Полученные спектрограммы представляют частотное содержание сигналов и используются в качестве входных данных для обучения нейросетевой модели.

Совместная регистрация акустических откликов в пяти измерительных позициях (рис. 1) позволила сформировать репрезентативную базу данных, включающую 15 500 реализаций для образцов с дефектами и 780 реализаций для эталонных образцов без дефектов. Физическая природа исследуемого явления исключает возможность применения алгоритмов аугментации входных данных. Проверка адекватности модели осуществлялась на контрольной подвыборке, составляющей 20 % от общего массива экспериментальных данных.

Временные реализации акустических сигналов, полученные в точках мониторинга, представлены на рис. 2 а, а их спектральные характеристики — на рис. 2 б. Целевыми переменными модели выступают геометрические дескрипторы дефекта и бинарный классификатор его обнаружения. Данный набор признаков используется для конструирования обучающих векторов, подаваемых на вход нейросетевой архитектуры.

На рис. 3 представлены спектрограммы сигналов, зарегистрированных в различных точках контроля на поверхности области с угловой точкой. Регистрация проводилась при синхронном перемещении источника и приемника ультразвуковых колебаний вдоль граней исследуемой области. Визуальный анализ спектрограмм демонстрирует их значительную информативность для решения задачи идентификации дефектов.

Анализ спектрограмм в контрольных точках 1–5 выявляет выраженную зону акустической тени, возникающую вследствие наличия внутреннего дефекта. Пространственно-временные особенности распространения волновых полей, зафиксированные в ходе эксперимента, формируют базис для создания обучающего датасета нейросетевой архитектуры.

В работе представлена архитектура сверточной нейронной сети (СНС), предназначенная для классификации изображений [5]. Сетевая модель принимает на вход двумерные матрицы интенсивностей пикселей размером 60×120. Преобразование входных данных осуществляется посредством трехступенчатой иерархической структуры. На каждом этапе данной иерархии применяется сверточная операция, за которой следует нелинейное преобразование с помощью функции ReLU, а затем — операция субдискретизации для редукции пространственной размерности формируемых

признаков. Количество фильтров в сверточных слоях последовательно уменьшается от 64 до 32 и 16 соответственно, что обеспечивает иерархическое выделение признаков различного уровня абстракции. После сверточных слоев выполняется преобразование пространственной структуры данных для обеспечения совместимости с полносвязными слоями. Завершающим этапом обработки является полносвязный скрытый слой, содержащий 512 нейронов с нелинейностью ReLU, который обучается выявлять сложные зависимости между высокоуровневыми признаками. Полносвязный слой, также известный как плотный слой, является важным компонентом СНС. Эти слои следуют за сверточными и объединяющими слоями в архитектуре СНС и служат для объединения информации, извлеченной сверточными слоями, в единый выходной сигнал.

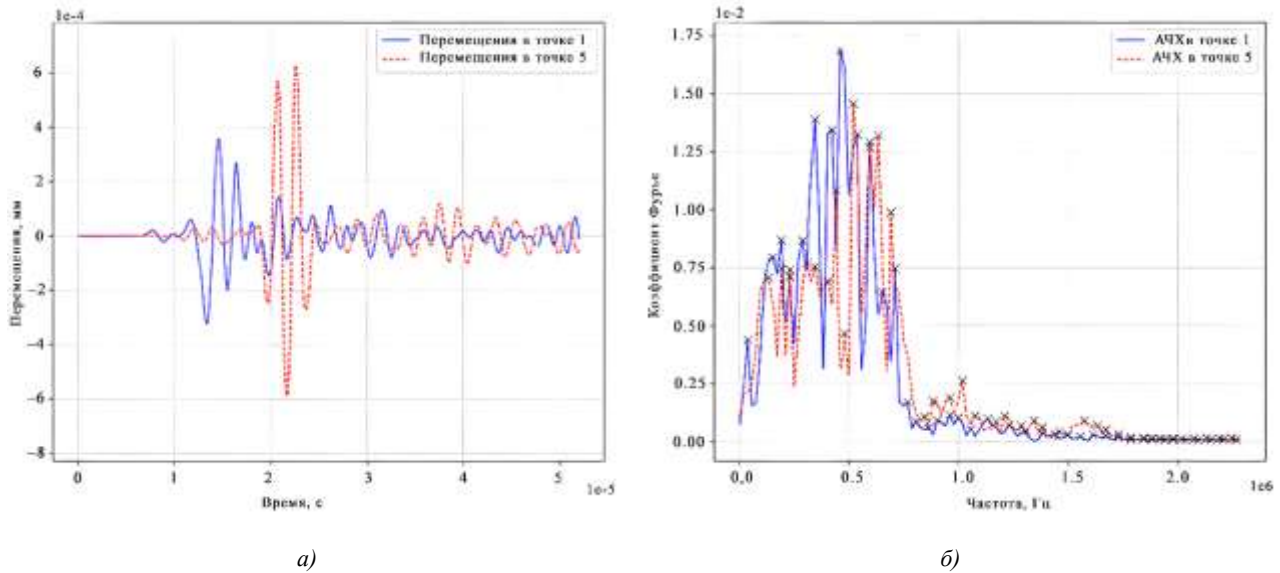


Рис. 2. Анализ акустических сигналов: а — амплитудно-временная характеристика (временная реализация); б — амплитудно-частотная характеристика (спектр)

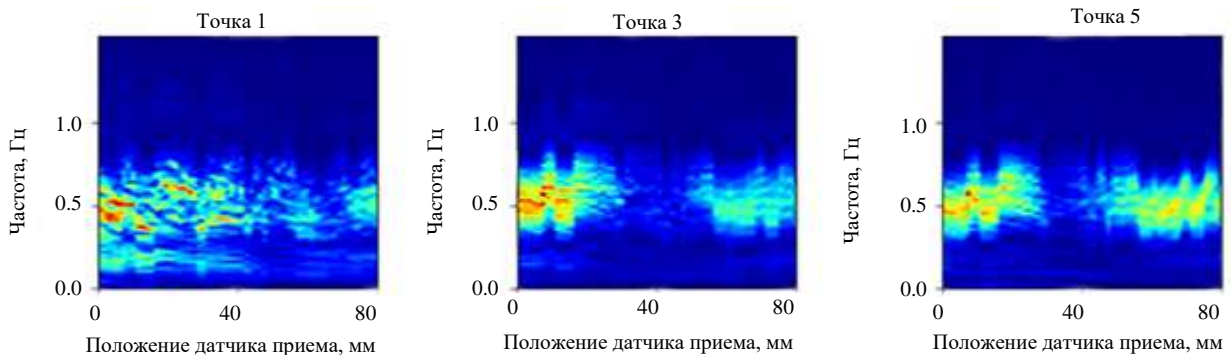


Рис. 3. Спектрограммы сигнала, принятого в 3 различных точках на поверхности области с угловой точкой

Выходной слой сети сформирован пятью нейронами и функцией активации Softmax, обеспечивающей вероятностное распределение по целевым классам. Каждый нейрон соответствует отдельной характеристике дефекта: два из них реализуют бинарную классификацию факта наличия дефекта в зоне контроля, тогда как остальные три — регрессионные нейроны, кодирующие, соответственно, протяженность дефекта, ширину трещины и координату его положения относительно вершины угловой точки. Суммарное количество обучаемых параметров предложенной архитектуры составляет 559 285.

В качестве целевой функции оптимизации была выбрана среднеквадратичная ошибка (MSE). Проведенные эксперименты показали, что удовлетворительное качество модели достигается по прошествии 30 эпох обучения. Стабилизация процесса обучения обеспечивается за счет сбалансированного состава обучающей выборки и применения слоев пакетной нормализации [9], которые способствуют ускорению сходимости и выполняют роль регуляризатора, снижая риск переобучения.

Экспериментальная оценка работоспособности обученной нейросетевой модели проведена на контрольной выборке мощностью 2 500 образцов. Входное пространство модели составляли частотные характеристики, сгенерированные в ходе конечно-элементного моделирования процесса ультразвуковой дефектоскопии. Выходной

интерфейс модели комбинировал детектор наличия дефекта (бинарная классификация) и предикторы его пространственных характеристик (регрессионная задача).

Обсуждение и заключение. Проведен анализ точности регрессионной оценки ширины трещины с использованием предложенной модели (рис. 4). Анализ зависимостей показал, что с ростом ширины трещины точность предсказания увеличивается с последующей стабилизацией в верхней части исследуемого диапазона. Расчет средней относительной ошибки для данного параметра продемонстрировал, что ее величина не превышает 5 % для угла раскрытия контролируемой области $\alpha = 60^\circ$ и 10 % — для $\alpha = 120^\circ$.

Полученные данные подтверждают перспективность использования моделей ультразвукового контроля с применением зондирующих сигналов повышенной частоты, а также с альтернативными схемами акустических преобразователей, что открывает пути для дальнейшего повышения точности идентификации геометрических параметров дефектов.

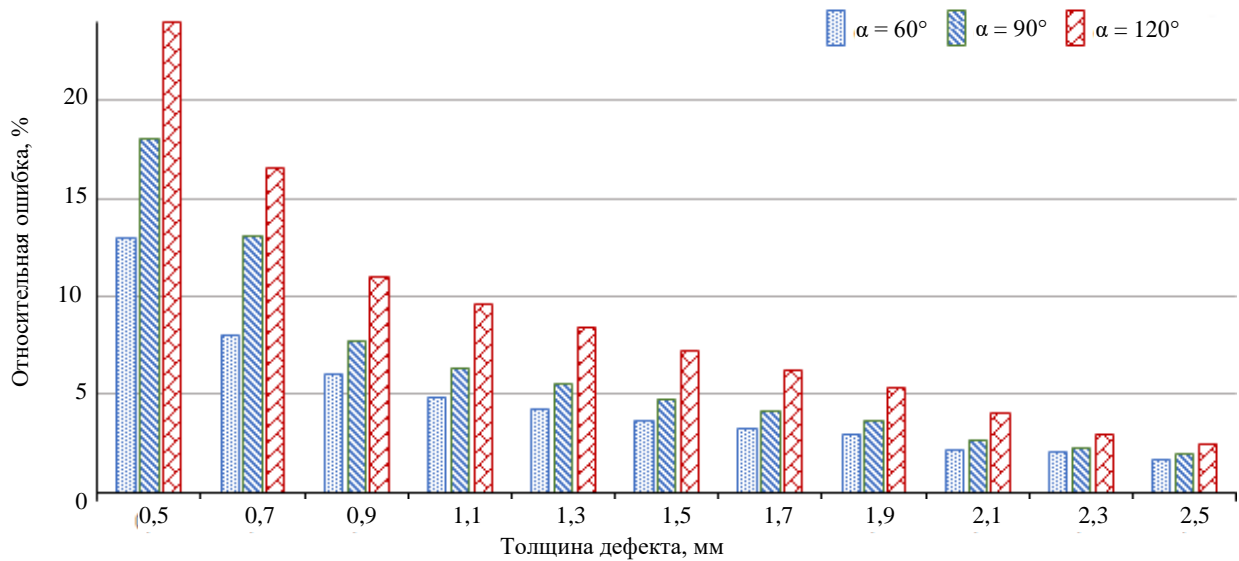


Рис. 4. Ошибка определения толщины дефекта при $\alpha = 60^\circ$, $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 120^\circ$

Проведенный анализ демонстрирует ограниченное влияние угла раскрытия контролируемой области (α) на точность нейросетевой модели (рис. 5).

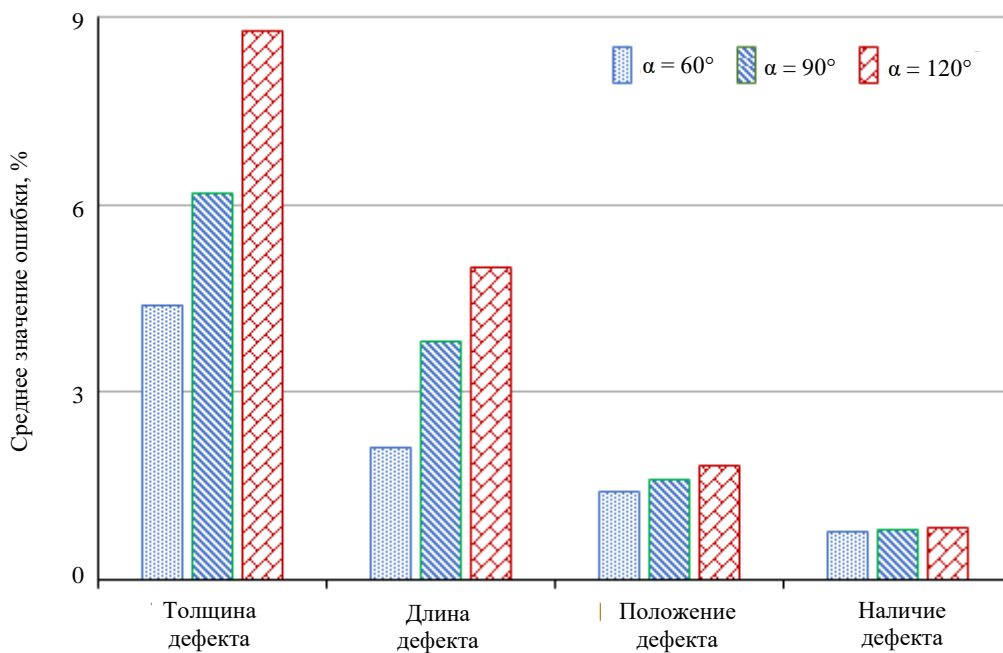


Рис. 5. Средние ошибки СНС определения характеристик дефекта для разных углов раскрытия области (60° , 90° и 120°)

Проведенный статистический анализ позволил установить, что изменение угла α не является доминирующим источником погрешности. Его вклад в суммарную ошибку определения координат дефекта относительно вершины угла существенно ниже по сравнению с другими учитываемыми факторами. Наибольшая точность методики достигается для малых значений α , что подтверждает ее эффективность и высокую надежность при контроле элементов конструкций с угловой точкой.

Повышение точности нейромодели достигнуто через обработку входных данных и ее дообучение на синтезированных численных экспериментах [10–12]. Разработанный метод демонстрирует высокую надежность в обнаружении дефектов в областях с угловой точкой с покрытиями, обладая способностью к непрерывному улучшению диагностических характеристик. Сочетая теневой метод ультразвукового сканирования с технологиями глубокого машинного обучения, методика обеспечивает более быстрое и надежное средство выявления дефектов и имеет перспективы для широкого спектра применений [7].

Список литературы/References

1. Александров В.М., Сметанин Б.И., Соболев Б.В. *Тонкие концентраторы напряжений в упругих телах*. М.: Наука; 1993. 224 с.
Alexandrov VM, Smetanin BI, Sobol BV *Thin Stress Concentrators in Elastic Bodies*. Moscow: Nauka, 1993. 224 p. (In Russ.)
2. Соболев Б.В., Рашидова Е.В., Иващенко В.В. Равновесное состояние прямолинейной внутренней трещины вблизи угловой точки упругой области, подкрепленной по контуру. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2025;2:100–110. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2025.2.09>
3. Sobol BV, Rashidova EV, Ivashchenko VV Equilibrium State of a Straight-Line Internal Crack Near the Corner Point of an Elastic Region Reinforced along the Contour. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 2025; 2:100–110. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2025.2.09>
3. Ватульян А.О., Беляк О.А., Сухов Д.Ю., Явруян О.В. Обратные и некорректные задачи. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета; 2011. 232 с.
Vatulyan AO, Belyak OA, Sukhov DYU, Yavruyan OV *Inverse and Ill-Posed Problems: Textbook*. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University; 2011. 232 p. (In Russ.)
4. Liu S., Wang Y., Yang X., Lei B., Liu L., Xiang L.S. et al. Deep Learning in Medical Ultrasound Analysis: A Review. *Engineering*. 2019;5(2):261–275. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.020>
5. Van Sloun R.J.G., Cohen R., Eldar Y.C. Deep Learning in Ultrasound Imaging. *Proceedings of the IEEE*. 2020;108(1):11–29. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2932116>
6. Алешин Н.П., Крысько Н.В., Кусый А.Г., Скрынников С.В., Могильнер Л.Ю. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем. *Дефектоскопия*. 2021;6:26–34. <https://doi.org/10.31857/S0130308221060038>
7. Aleshin NP, Krysko NV, Kusyy AG, Skrynnikov SV Studying the Detectability of Place Surface Defects by Ultrasonic Method Using Rayleigh Waves. *Defectoscopy*. 2021; 5:22-30. 2021;6:26–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0130308221060038>
7. Dung C.V., Anh L.D. Autonomous concrete crack detection using deep fully convolutional neural network. *Automation in Construction*. 2019;99(3):52–58. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.028>
8. Ioffe S., Szegedy C. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. *ArXiv. Computer Science*. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.03167>
9. Turco E. Tools for the numerical solution of inverse problems in structural mechanics: review and research perspectives. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2017;21(5):509–554. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1134673>
10. Васильев П.В., Сеничев А.В. Применение нейросетевых технологий в задаче контроля поверхностных дефектов. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2020;1:33–40. <http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2020-1-33-40>
11. Vasiliev PV, Senichev AV Application of Neural Network Technologies in the Problem of Surface Defect Inspection. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*. 2020;1:33–40. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2020-1-33-40>
11. Soloviev A., Sobol B., Vasiliev P. Identification of Defects in Pavement Images Using Deep Convolutional Neural Networks. In: *Advanced Materials*. Cham: Springer; 2019. Pp. 615–626. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19894-7_46

12. Jiang L.L., Maskell D.L. Automatic fault detection and diagnosis for photovoltaic systems using combined artificial neural network and analytical based methods. In: *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. Killarney: IEEE; 2015. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2015.7280498>

Об авторах:

Соболь Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), b.sobol@mail.ru

Рашидова Елена Викторовна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), el.rash@mail.ru

Васильев Павел Владимирович, кандидат технических наук, заместитель руководителя по IT направлению ООО «ДонНовоТех» (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. М. Горького 205), [ScopusID](#), [ORCID](#), lyftzeigen@mail.ru

Ивашенко Валерия Валерьевна, ассистент кафедры информационных технологий Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), valeria_ivashchenko@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Б.В. Соболь: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Е.В. Рашидова: формирование основной концепции, проведение расчетов, анализ результатов исследований, подготовка текста, формирование выводов.

П.В. Васильев: формирование концепции, проведение расчетов, анализ результатов исследований.

В.В. Ивашенко: проведение расчетов, анализ результатов исследований, формирование выводов, подготовка текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Boris V. Sobol, D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Information Technology, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), b.sobol@mail.ru

Elena V. Rashidova, Cand.Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technology, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), el.rash@mail.ru

Pavel V. Vasiliev, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of IT Department, Donnovotech LLC (205 M. Gorky Str., Rostov-on-Don, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), lyftzeigen@mail.ru

Valeria V. Ivashchenko, Assistant Professor at the Department of Information Technology, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), valeria_ivashchenko@mail.ru

Claimed contributorship:

BV Sobol: scientific supervision, formation of the basic concept, aims of the research, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

EV Rashidova: formation of the basic concept, carrying out the calculations, analysis of the research results, preparation of the manuscript, formation of the conclusions.

PV Vasiliev: formation of the concept, calculations, analysis of the research results.

VV Ivashchenko: carrying out the calculations, analyzing the research results, drawing the conclusions, preparing 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 10.01.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 24.01.2026

Принята к публикации / Accepted 12.02.2026

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 692.21

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-32-40>

Применимость неразрушающих методов для оценки прочности каменной кладки существующих конструкций

В.Н. Деркач  , И.Е. Демчук , П.И. Матяс 

Филиал НТЦ РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», г. Брест, Республика Беларусь

 v-derkach@yadex.ru



EDN: VPWKMX

Аннотация

Введение. Прочность каменной кладки на сжатие является важнейшей механической характеристикой, оцениваемой при обследовании зданий, которая определяется на основании прямых испытаний отобранного из стен кирпича и раствора. Однако действующие нормативные документы также рекомендуют использовать неразрушающие методы контроля, особенно при обследовании объектов культурного наследия. Но неразрушающие методы не учитывают различия в прочности кирпича и растворных швов в поверхностных слоях и их основном объеме, взаимодействие кирпича и кладочного раствора, а также анизотропию механических характеристик кладки. В статье приведены результаты исследования анизотропии прочности на сжатие керамического кирпича и анализ ее влияния на результаты оценки прочности каменной кладки косвенными методами.

Материалы и методы. Объектом исследований является два типа кирпича: исторический кирпич из стен здания казармы Брестской крепости, построенного в 1933 г., и современный кирпич, произведенный в Республике Беларусь. Прочность кирпича определялась при действии сжимающей нагрузки в направлении лицевой, опорной и торцевой поверхностей на кубах с размером ребра, равным высоте кирпича.

Результаты исследования. Приведены графики отношения полученных значений прочности опытных образцов-кубов при сжатии перпендикулярно лицевой и торцевой поверхностям кирпича к прочности на сжатие перпендикулярно его опорной поверхности. Проведен анализ подобных исследований других авторов, в том числе на керамических образцах-цилиндрах. Установлено, что прочность исторического кирпича при сжатии перпендикулярно его лицевой и торцевой поверхностям оказалась выше прочности при сжатии перпендикулярно опорной поверхности. Для современного кирпича наблюдалась обратная закономерность. Однако из-за высокого разброса полученных результатов невозможно установить корреляционную зависимость прочности на сжатие от направления сжимающего усилия.

Обсуждение и заключение. Приведены результаты исследований, которые показали, что керамический кирпич является анизотропным материалом. Выполнена оценка возможности применения неразрушающих методов контроля прочности кирпича, а также возможность построения градуировочной зависимости, связывающей прочность на сжатие кирпича с результатами косвенного испытания лицевой поверхности.

Ключевые слова: каменная кладка, кирпич, прочность на сжатие, неразрушающие методы контроля, градуировочная зависимость

Для цитирования. Деркач В.Н., Демчук И.Е., Матяс П.И. Применимость неразрушающих методов для оценки прочности каменной кладки существующих конструкций. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(2):32–40. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-32-40>

Applicability of Non-Destructive Methods for Assessing the Strength of Masonry of Existing Structures

Valery N. Derkach ✉, Igor E. Demchuk , Pavel I. Matyas 

Branch "Scientific and Technical Center" RUE "STROYTECHNORM", Brest, Republic of Belarus

✉ v-derkach@yadex.ru

Abstract

Introduction. The compressive strength of masonry is the most important mechanical characteristic assessed during inspections of buildings and is determined based on direct testing of bricks and mortar selected from the walls. However, current regulatory documents also recommend the use of non-destructive testing methods, particularly while examining cultural heritage buildings. However, non-destructive methods fail to take into account differences in the strength of bricks and mortar joints in the surface layers and their main volume, interaction of bricks and mortar, as well as anisotropy of the mechanical characteristics of masonry. The article presents the results of a study of the anisotropy of the compressive strength of ceramic bricks and an analysis of its influence on the results of assessing the strength of masonry using indirect methods.

Materials and Methods. The object of the research are two types of bricks: historical bricks from the walls of the barracks of the Brest Fortress built in 1933, as well as modern bricks produced in the Republic of Belarus. The strength of the brick was identified under a compressive load in the direction of the front, support and end surfaces on cubes with an edge size equal to the height of the brick.

Research Results. Graphs of the ratio between the obtained strength values of experimental cube samples under compression perpendicular to the front and end surfaces of the brick to the compressive strength perpendicular to its supporting surface are presented. Similar studies by other authors, including on ceramic cylinder samples, are analyzed. It was found that the compressive strength of the historical bricks perpendicular to its front and end surfaces was higher than their compressive strength perpendicular to the supporting surface. The opposite pattern was observed for modern bricks. However, due to the high variation of the results, it is not possible to establish a correlation between the compressive strength and the direction of the compressive force.

Discussion and Conclusion. The results of some studies that have shown that ceramic bricks are an anisotropic material are presented. A possibility of using non-destructive testing methods for brick strength has been evaluated, as well as that of designing a calibration ratio linking the compressive strength of a brick with the results of indirect testing of the front surface.

Keywords: masonry, brick, compressive strength, non-destructive testing methods, calibration ratio

For citation. Derkach VN, Demchuk IE, Matyas PI Applicability of Non-Destructive Methods for Assessing the Strength of Masonry of Existing Structures. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):32–40. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-32-40>

Введение. Важнейшей механической характеристикой каменной кладки, которую оценивают при обследовании каменных зданий, является ее прочность на сжатие. Прочность на сжатие каменной кладки обычно определяют расчетом по результатам испытаний отобранного из стен здания кирпича и раствора, которые выполняют соответственно по ГОСТ 8462 «Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе» и ГОСТ 5802 «Растворы строительные. Методы испытаний» [1–5]. Данный метод является достаточно трудоемким, поэтому многие специалисты при обследовании каменных конструкций для определения прочности кирпича и раствора часто прибегают к неразрушающим (косвенным) методам, к которым относят склерометрические методы упругого отскока, ударного импульса или метод измерения скорости распространения ультразвукового импульса. При использовании склерометрических методов прочность на сжатие кирпича и раствора устанавливают с помощью склерометров типа ИПС МГ-4 или молотков Шмидта, в которых заводом-изготовителем заложена градуировочная зависимость «кирпич керамический». Следует отметить, что для оценки прочностных характеристик кирпичной кладки объектов культурного наследия ГОСТ Р 55567 «Порядок организации и ведения инженерно-технических исследований на объектах культурного наследия. Памятники истории и культуры. Общие требования» напрямую рекомендует отдавать предпочтение неразрушающему контролю с применением приборов, основанных на методе упругого отскока по ГОСТ 24332 «Кирпич и камни силикатные. Ультразвуковой метод определения прочности при сжатии» или других специализированных и тарированных приборов для определения прочностных характеристик кирпича и раствора. Уточнение корреляционной зависимости между

показателями приборов неразрушающего контроля и прочностными характеристиками материалов кладки допускается осуществлять путем сравнения средних показателей указанных характеристик, полученных методом неразрушающего контроля, и лабораторными испытаниями не менее трех образцов для каждого типа кладки. Лабораторные испытания проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 8462, ГОСТ 5802.

Известно, что неразрушающие методы оценки прочности эксплуатирующейся длительное время каменной кладки имеют недостатки, которые связаны с неопределенностями, обусловленными различием в прочности кирпича и растворных швов в поверхностных слоях и их основном объеме, взаимодействием кирпича и кладочного раствора, а также анизотропией механических характеристик кладки [1, 3, 7, 9]. Игнорирование данных факторов может приводить к существенным погрешностям при оценке прочности на сжатие каменной кладки, и, как следствие, к недооценке или переоценке несущей способности каменных конструкций. В настоящей статье приведен анализ влияния анизотропии прочности на сжатие керамического кирпича на прочность каменной кладки, определенную косвенными методами.

Материалы и методы. Исследовалась анизотропия прочности на сжатие керамического полнотелого кирпича. Испытаниям были подвергнуты два типа кирпича: исторический кирпич, который отбирался из стен здания казармы Брестской крепости, построенного в 1933 г., и современный кирпич, произведенный в Республике Беларусь. Исторический кирпич имел следующие размеры: длина — 265 мм, ширина — 130 мм, высота — 60 мм. Таким размерам соответствует кирпич, производимый в Польше во второй половине XIX века [5]. Размеры современного кирпича: длина — 250 мм, ширина — 120 мм, высота — 65 мм. Первоначально были определены средние значения пределов прочности кирпича при сжатии и изгибе в соответствии с ГОСТ 8462 (рис. 1).



а) б)

Рис. 1. Испытания кирпича: а — сжатие; б — изгиб

На основании испытаний установлено, что среднее значение предела прочности исторического кирпича при сжатии составляет 16,9 МПа, при изгибе — 5,1 МПа, современного кирпича — соответственно 17,3 МПа и 5,3 МПа.

С целью определения прочности керамического кирпича при действии сжимающей нагрузки в направлении его лицевой, опорной и торцевой поверхностей (рис. 2) из кирпичей были выпилены кубы с размером ребра, равным высоте кирпича.

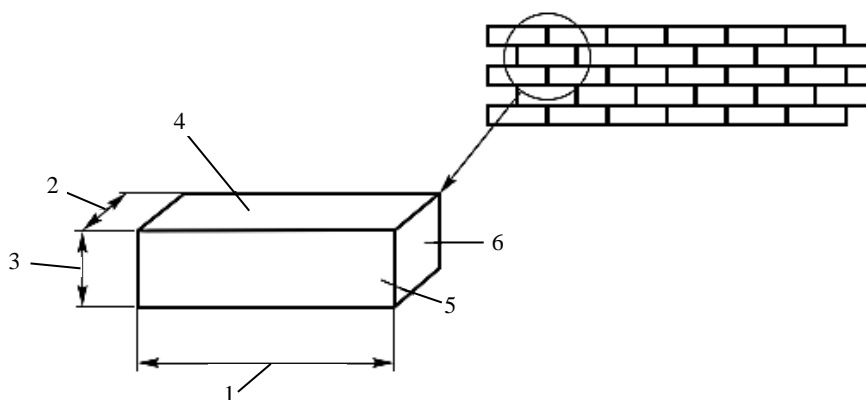


Рис. 2. Размеры и поверхности кирпича: 1 — длина; 2 — ширина; 3 — высота; 4 — опорная поверхность; 5 — лицевая поверхность; 6 — торцевая/тычковая поверхность

Для каждого направления сжимающей нагрузки из разных видов кирпича было изготовлено по 5–6 керамических образцов-кубов. Поверхность кубов, контактирующая с плитами пресса, выравнивалась тонким слоем гипсового раствора. Общий вид керамических образцов-кубов, подготовленных к испытаниям, приведен на рис. 3.



Рис. 3. Керамические образцы-кубы, подготовленные к испытаниям

Нагружение керамических кубов производилось при помощи испытательной машины ТП-1-500. Образцы-кубы устанавливались одной из выбранных граней на нижнюю опорную плиту испытательной машины центрально относительно ее продольной оси.

После установки образца на опорную плиту верхняя плита машины совмещалась с верхней опорной гранью образца так, чтобы их плоскости полностью прилегали одна к другой. Нагружение образца производилось непрерывно со скоростью, обеспечивающей его разрушение в пределах 30 секунд. Общий вид керамического образца-куба в испытательной установке и характер его разрушения показаны на рис. 4.

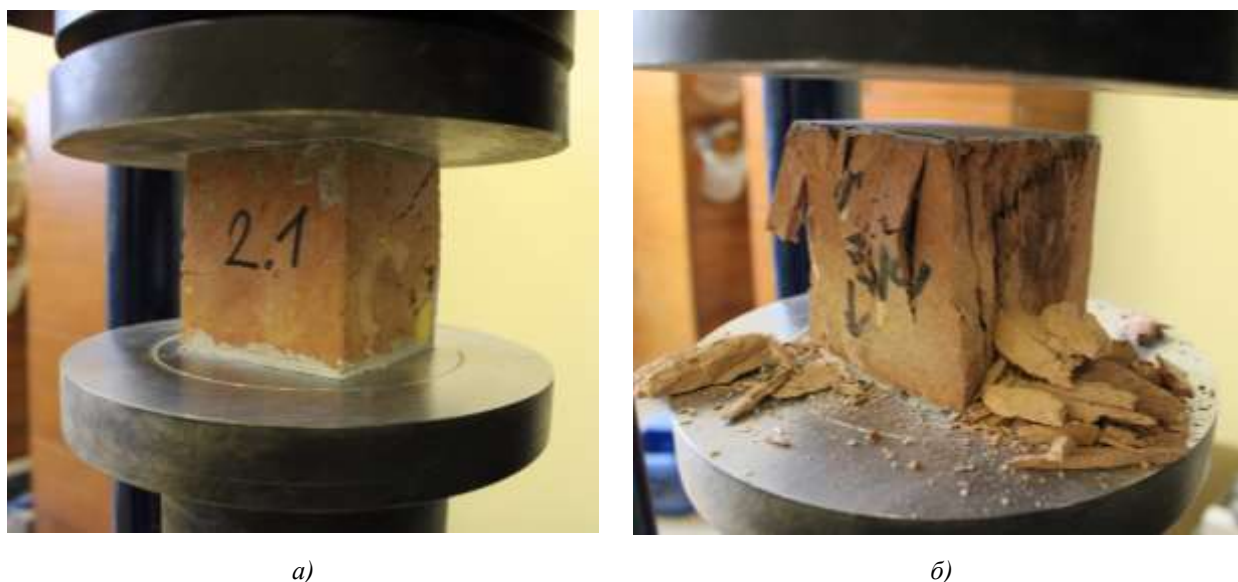
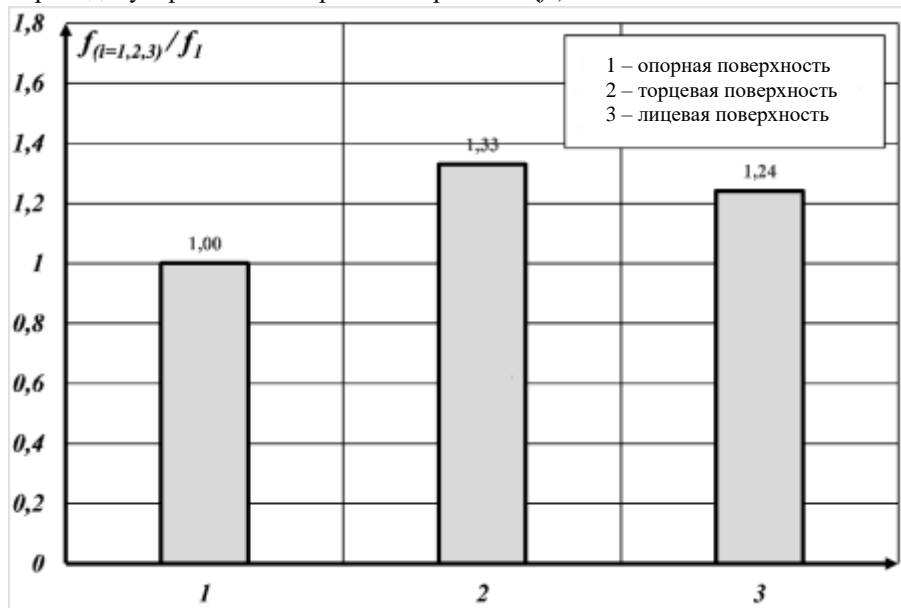


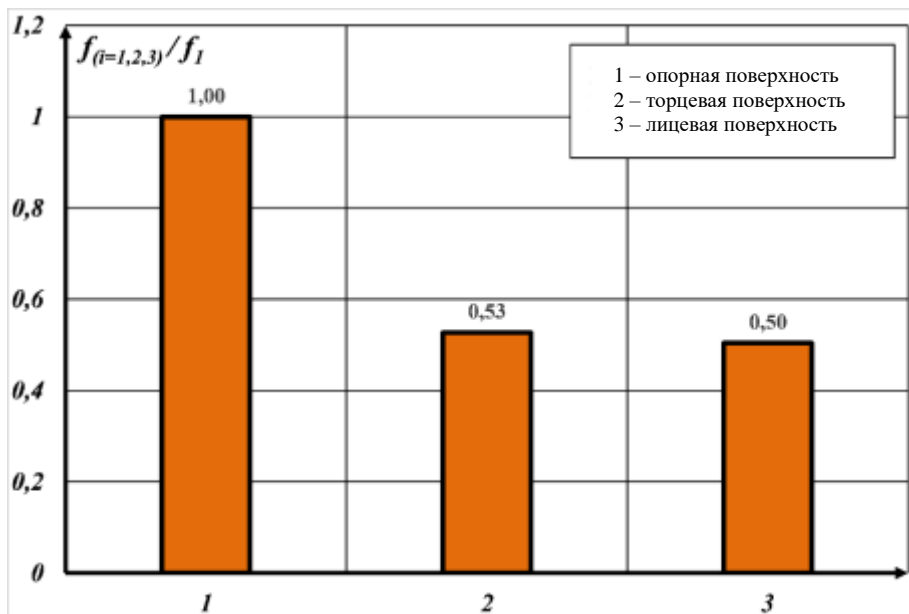
Рис. 4. Испытание керамических кубов: *а* — общий вид образца; *б* — характер разрушения

Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытаний, принималось за разрушающую нагрузку. Прочность на сжатие образца определялась как частное от деления разрушающей нагрузки на рабочую площадь его поперечного сечения. По результатам испытаний образцов-кубов определялись средние значения прочности образцов при действии сжимающего усилия в направлении лицевой, опорной и торцевой поверхностей кирпича.

Результаты исследования. На рис. 5, 6 приведены графики отношения полученных значений прочности опытных образцов-кубов при сжатии перпендикулярно лицевой (f_3) и торцевой (f_2) поверхностям кирпича к прочности на сжатие перпендикулярно к его опорной поверхности (f_1).



а)



б)

Рис. 5. Результаты определения прочности керамических образцов кубов:
а — исторический кирпич; б — современный кирпич

Из рис. 5 следует, что прочность керамических образцов-кубов, выпиленных из исторического кирпича, при сжатии перпендикулярно его лицевой и торцевой поверхностям оказалась соответственно на 24 % и 33 % выше прочности, полученной при действии сжимающего усилия перпендикулярно опорной поверхности.

Для современного кирпича наблюдалась обратная закономерность. Прочность керамических кубов, испытанных сжимающей нагрузкой перпендикулярно лицевой и торцевой поверхностям кирпича, была ниже прочности при сжатии перпендикулярно опорной поверхности соответственно на 50 % и 47 %.

При испытании керамических образцов-кубов коэффициент вариации прочности на сжатие составил 25–40 % для исторического кирпича и 10–15 % для современного кирпича.

Результаты исследований анизотропии прочности на сжатие современного кирпича удовлетворительно согласуются с приведенными в [7] результатами испытаний керамических образцов-цилиндров. Образцы-цилин-

дры диаметром 56 мм отбирались из полнотелого керамического кирпича марок М150 (Новгород), М200 (Витебск) и М250 (Санкт-Петербург) перпендикулярно его лицевой и опорной поверхностям. Установлено, что отношение прочности на сжатие цилиндрических образцов, отобранных ортогонально лицевой и опорной поверхности кирпича, примерно равно 0,6.

Результаты испытания цилиндрических образцов, отобранных из исторического кирпича, характеризовались значительным разбросом значений, (коэффициент вариации 30–45 %) [8]. Установить для них корреляционную зависимость между прочностью на сжатие ортогонально лицевой и опорной поверхностям кирпича не удалось. Объясняется это высокой неоднородностью материала в пределах одного кирпича, а также применением в кладке разных видов кирпичей.

В работе [9] приведены результаты исследований анизотропии прочности на сжатие исторического керамического кирпича австрийского формата длиной 290 мм, шириной 150 мм и высотой 65 мм, нормализованной прочностью на сжатие 19,28 МПа и современного немецкого кирпича формата NF (длина — 250 мм, ширина — 120 мм, высота — 65 мм) нормализованной прочностью на сжатие 28 МПа. Анизотропия прочности на сжатие кирпича определялась на основании испытаний кернов диаметром 45 мм, которые отбирались под разными углами к опорной поверхности кирпича (рис. 6 а).

Исследования показали, что для современного кирпича при направлении сжимающего усилия под углом к опорной плоскости $0^\circ < \varphi \leq 60^\circ$ прочность на сжатие близка к прочности на сжатие перпендикулярно опорной плоскости, $\varphi = 0^\circ$ (рис. 6 в). Минимальные значения прочности на сжатие имели место при $\varphi = 90^\circ$ ($f_0/f_{90} = 1,3$).

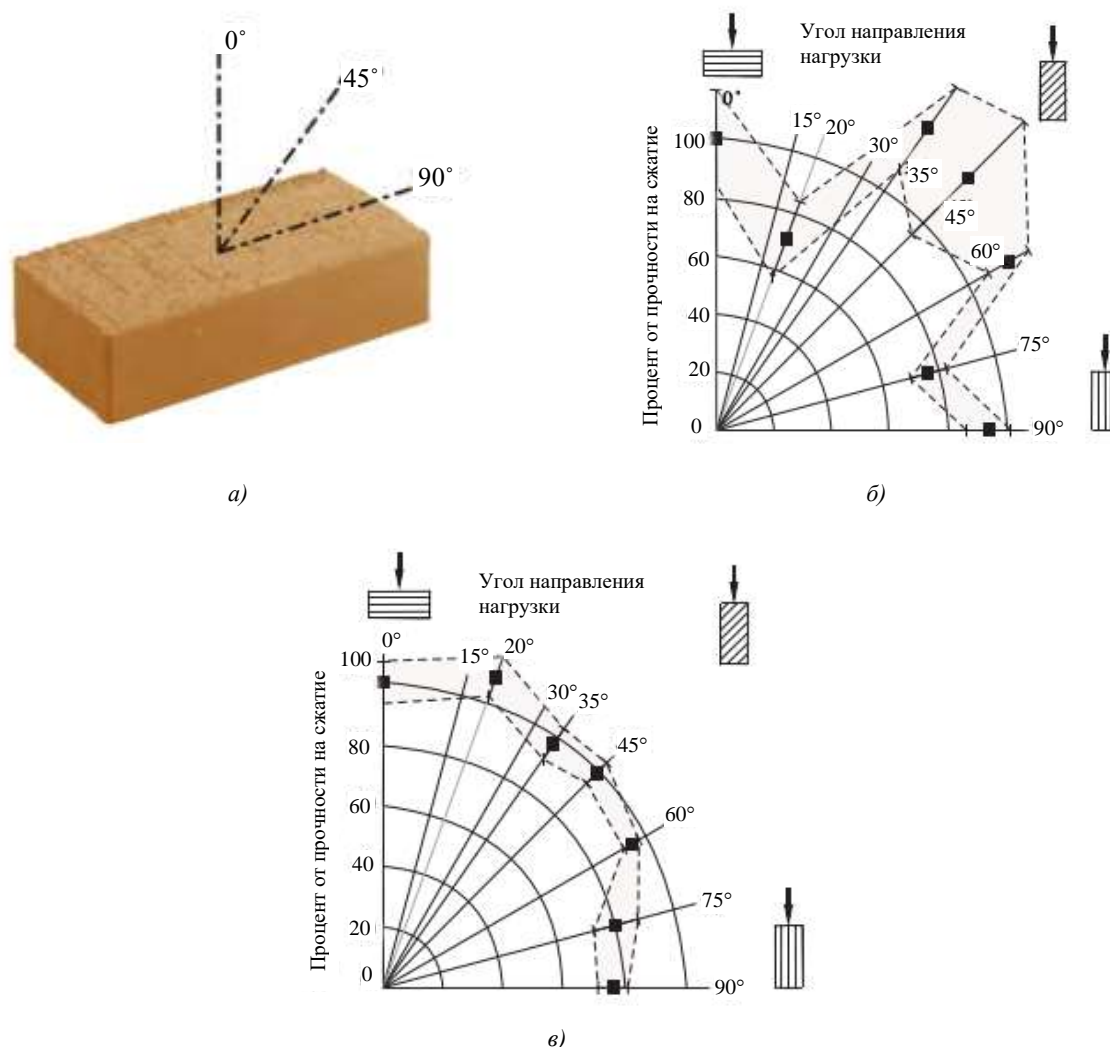


Рис. 6. Результаты определения прочности на сжатие образцов-цилиндров: а — направления отбора образцов; б — исторический кирпич; в — современный кирпич [6]

Для исторического кирпича при действии сжимающего усилия под углами $35^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ прочность на сжатие оказалась на 20–25 % выше прочности на сжатие под углом $\varphi = 0^\circ$ (рис. 6 б). Минимальное значение прочности на сжатие было получено при углах $\varphi = 20^\circ$ и 75° . При направлении сжимающего усилия перпендикулярно торцевой поверхности кирпича $\varphi = 90^\circ$ прочность на сжатие была на 23 % ниже прочности на сжатие под углом $\varphi = 0^\circ$.

По результатам испытаний сделан вывод о том, что из-за высокого разброса полученных результатов для исторического кирпича невозможно установить корреляционную зависимость прочности на сжатие от направления сжимающего усилия.

В исследованиях [6] показано, что при испытании кирпича в каменной кладке на величину упругого отскока оказывает влияние не только направление удара, но и качество заделки кирпича в каменной кладке, которое во многом определяется видом и состоянием растворных швов. Это объясняется влиянием указанных факторов на степень поглощения энергии удара тестового молотка по поверхности кирпича.

Обсуждение и заключение. Результаты собственных исследований, а также исследований [7–9] показали, что керамический кирпич является анизотропным материалом. Степень анизотропии прочностных характеристик кирпича определяется рядом факторов, основными из которых являются технология его изготовления и применяемое сырье. При этом для исторического кирпича сложно установить какие-либо закономерности прочности на сжатие от направления действия сжимающего усилия ввиду высоких значений коэффициентов вариации результатов испытаний. Построение градуировочной зависимости, связывающей прочность на сжатие такого кирпича в направлении опорной поверхности с результатами косвенного испытания лицевой поверхности кирпича методом упругого отскока или измерением скорости распространения ультразвукового импульса, не представляется возможным.

При обследовании каменных конструкций испытания по определению упругого отскока молотка позволяют измерить поверхностную твердость лицевой поверхности кирпича, но не оценить его качество по всему сечению и, тем более, получить значения прочности на сжатие в направлении сжимающего усилия, действующего в сечении каменной конструкции.

На скорость распространения ультразвукового импульса в каменной кладке влияет множество значимых факторов: неоднородность структуры кирпичей и растворных швов, толщина швов и качество их исполнения, влажность каменной кладки, а также степень деградации кирпича и раствора [10].

Результаты методов неразрушающего контроля сложно интерпретировать, поскольку материал в поверхностных зонах кирпича и раствора может отличаться от их более глубоких слоёв. В качестве примера на рис. 7 показан срез керамического современного кирпича, на котором отчетливо различим разный цвет его наружных и внутреннего слоев, что свидетельствует об отличии их прочностных характеристик. Особенно актуальным это является для исторического кирпича, степень обжига и прочность в сечении которого может значительно различаться.



Рис. 7. Керамический кирпич в разрезе: различный цвет наружных и внутреннего слоев

Косвенные методы оценки прочности на сжатие кирпича существующих конструкций рекомендуется применять для оценки однородности каменной кладки и определения мест отбора кирпича и раствора. Данные методы могут быть также использованы при контроле прочности кирпича заводского изготовления, для которого имеется возможность построения частных градуировочных зависимостей для каждой совокупности параметров (вид материала для сырца, способ формования, температура и длительность обжига, вид кирпича и другие) [7]. При этом, как отмечено в исследовании [6], применение склерометрических методов оценки прочности керамических изделий возможно только в том случае, если объем их пустот не превышает 10 %. При испытании кладочных изделий с большим объемом пустот происходит существенное поглощение энергии удара, что не позволяет достоверно оценить прочность изделий.

Следует отметить, что результаты оценки прочности кладки, полученные на основании испытаний отобранных из ее тела отдельных кирпичей и затвердевшего раствора, имеют низкую достоверность, поскольку не учи-

тывают взаимодействие кирпича и раствора в каменной кладке. Единственными методами, позволяющими получить достоверные данные о прочности на сжатие каменной кладки существующих конструкций, являются ее испытания в конструкции или лабораторные испытания отобранных из обследуемой конструкции образцов кладки^{1,2} [2, 3, 5, 9–14].

Список литературы/References

1. Орлович Р.Б., Деркач В.Н. Оценка прочности кладочных растворов при обследовании каменных зданий. *Инженерно-строительный журнал*. 2011;7(25):3–10. URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/7\(25\)/derkach_rastvor.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/7(25)/derkach_rastvor.pdf) (дата обращения: 10.04.2026).
- Orlovich RB, Derkach VN Estimation of Masonry Mortars Strength during Stone Buildings Investigation. *Magazine of Civil Engineering*. 2011;7(25):3–10. (In Russ.) URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/7\(25\)/derkach_rastvor.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2011/7(25)/derkach_rastvor.pdf) (accessed: 10.04.2026)
2. Деркач В.Н., Жерносок Н.М. Методы оценки прочности каменной кладки в отечественной и зарубежной практике обследования зданий и сооружений. *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2010;3(28):135–143. URL: <http://e.biblio.bru.by/handle/1212121212/1873> (дата обращения: 10.04.2026).
- Derkach VN, Zhernosek NM Methods of Estimating the Durability of Stone Masonry in Domestic and Foreign Practices of Inspection of Buildings and Structures. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2010;3(28):135–143. (In Russ.) URL: <http://e.biblio.bru.by/handle/1212121212/1873> (accessed: 10.04.2026)
3. Белов В.В., Деркач В.Н. Экспертиза и технология усиления каменных конструкций. *Инженерно-строительный журнал*. 2010;7:14–20. URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2010/7\(17\)/derkach_kamen.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2010/7(17)/derkach_kamen.pdf) (дата обращения: 10.04.2026).
- Belov VV, Derkach VN Expertise and Technology for Strengthening Stone Structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2010;7:14–20. (In Russ.) URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2010/7\(17\)/derkach_kamen.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2010/7(17)/derkach_kamen.pdf) (accessed: 10.04.2026)
4. Желдаков Д.Ю. Сегментный метод определения прочности ограждающей конструкции. *Строительство и реконструкция*. 2016;3(65):10–17. URL: [https://oreluniver.ru/public/file/archive/Stroitelstvo_i_rekonstruktsiya_3\(65\)_2016.pdf](https://oreluniver.ru/public/file/archive/Stroitelstvo_i_rekonstruktsiya_3(65)_2016.pdf) (дата обращения: 10.04.2026).
- Zheldakov DYU Segment Method of Definition of the Separating Building Element. *Building and Reconstruction*. 2016;3(65):10–17. (In Russ.) URL: [https://oreluniver.ru/public/file/archive/Stroitelstvo_i_rekonstruktsiya_3\(65\)_2016.pdf](https://oreluniver.ru/public/file/archive/Stroitelstvo_i_rekonstruktsiya_3(65)_2016.pdf) (accessed: 10.04.2026)
5. Matysek P. *Identyfikacja wytrzymałości na ściskanie i odkształcalności murów ceglanych w obiektach istniejących*. Kraków: Politechnika Krakowska; 2014. 167 p.
6. Tkacz P., Orłowicz R. Wybrane sposoby określania wytrzymałości muru w budynkach istniejących. In: *Materiały Konferencyjne «XXXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta WPPK»*. Gliwice; 2019. Pp. 227–242.
7. Улыбин А.В., Зубков С.В. О методах контроля прочности керамического кирпича при обследовании зданий и сооружений. *Инженерно-строительный журнал*. 2013;3:29–34. <https://www.doi.org/10.5862/MCE.29.3>
- Ulybin AV, Zubkov SV Control Methods for Strength of Ceramic Bricks in the Inspection of Buildings. *Magazine of Civil Engineering*. 2013;3:29–34. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.5862/MCE.29.3>
8. Улыбин А.В., Зубков С.В., Сударь О.Ю., Лаптев Е.А. Стандартная и альтернативная методики определения прочности кирпича при обследовании зданий и сооружений. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014;3(18):9–24. URL: <https://unistroy.spbstu.ru/article/2014.18.2/> (дата обращения: 10.04.2026).
- Ulybin AV, Zubkov SV, Sudar OYu, Laptev EA Standard and Alternative Methods of Determination of the Strength of Brick at Inspection of Buildings and Structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014;3(18):9–24. URL: <https://unistroy.spbstu.ru/article/2014.18.2/> (accessed: 10.04.2026).
9. Krawtschuk A., Zeman O., Schellander J., Zimmermann T., Strauss A., Bergmeister K. Einfluss der Belastungsrichtung auf die einaxiale Druckfestigkeit von Proben aus Vollziegeln. *Mauerwerk*. 2014;2:98–104. <https://doi.org/10.1002/dama.201400615>
10. Niedostatkiewicz M., Majewski T. Badania wytrzymałości historycznych murów ceglanych. In: *XXXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji*. Wisła; 2024. Pp. 1–40. URL: https://mostwiedzy.pl/pl/publication/download/1/badnia-wytrzymalosci-historycznych-murow-ceglanych_93750.pdf (дата обращения: 10.04.2026).
11. Деркач В.Н. *Каменные и армокаменные конструкции. Оценка технического состояния, ремонт и усиление*. Минск: СтройМедиа Проект; 2021. 256 с.

¹ UIC — International Union of Railways: UIC Code. Recommendations for the Inspection, Assessment, Reliability and Maintenance of Masonry Arch Bridges. 2008. 16 p.

² RILEM Recommendation MDT. D. 4 — In situ stress-strain behaviour tests based on the flat jack. *Materials and Structures*. 2004;37:497–501. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02481589> (дата обращения: 10.04.2026).

Derkach VN Masonry and Reinforced Masonry Structures. Assessment of Technical Condition, Repair and Strengthening. Minsk: StroyMedia Project; 2021. 256 p. (In Russ.)

12. Орлович Р.Б., Зимин С.С. *Оценка технического состояния исторических каменных зданий*. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС; 2024. 209 с.

Orlovich RB, Zimin SS *Assessment of the Technical Condition of Historical Stone Buildings*. St.Petersburg: POLITECH-PRESS; 2024. 209 p. (In Russ.)

13. Галалюк А.В., Деркач В.Н. Оценка механических характеристик каменной кладки существующих зданий. *Строительство и реконструкция*. 2023;6(110):5–14. URL: [https://oreluniver.ru/public/file/archive/sir_Stroitelstvo_i_rekonstruktsiya_6\(110\)_2023.pdf](https://oreluniver.ru/public/file/archive/sir_Stroitelstvo_i_rekonstruktsiya_6(110)_2023.pdf) (дата обращения: 10.04.2026).

Halaliuk AV, Derkach VN *Evaluation of the Mechanical Characteristics of the Masonry in Existing Buildings. Building and Reconstruction*. 2023;6(110):5–14. (In Russ.) URL: [https://oreluniver.ru/public/file/archive/sir_Stroitelstvo_i_rekonstruktsiya_6\(110\)_2023.pdf](https://oreluniver.ru/public/file/archive/sir_Stroitelstvo_i_rekonstruktsiya_6(110)_2023.pdf) (accessed: 10.04.2026).

14. Gaber K., Kupper R. Vorschlag für ein neues Verfahren zur Prüfung der Druckfestigkeit von bestehendem Mauerwerk. *Mauerwerk*. 2012;16(6):297–300. <https://doi.org/10.1002/dama.201202102>

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](https://orcid.org/0009-0001-9000-0001), v-derkach@yandex.ru

Демчук Игорь Евгеньевич, кандидат технических наук, начальник отдела филиала НТЦ РУП «СТРОЙТЕХНОРМ» (224023, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 267/2), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0001), 7263712@mail.ru

Матяс Павел Игоревич, ведущий инженер-конструктор филиала НТЦ РУП «СТРОЙТЕХНОРМ» (224023, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 267/2), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0001), matyas.ntc@gmail.com

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, подготовка текста.

П.И. Матяс: анализ результатов исследований, 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, D.Sc. (Eng.), Professor, Director of the Branch "Scientific and Technical Center" RUE "STROYTECHNORM" (267/2 Moskovskaya Str., Brest, Republic of Belarus), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0001), v-derkach@yandex.ru

Igor E. Demchuk, Cand.Sci. (Eng.), Head of the department of the Branch "Scientific and Technical Center" RUE "STROYTECHNORM" (267/2 Moskovskaya Str., Brest, Republic of Belarus), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0001), 7263712@mail.ru

Pavel I. Matyas, Cand.Sci. (Eng.), Leading design engineer of the Branch "Scientific and Technical Center" RUE "STROYTECHNORM" (267/2 Moskovskaya Str., Brest, Republic of Belarus), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9000-0001), matyas.ntc@gmail.com

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, preparation of the manuscript.

PI Matyas: analysis of the research results, formation of the references.

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 13.04.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 22.04.2026

Принята к публикации / Accepted 08.05.2026

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES






УДК 69.07

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-41-48>

К вопросу определения расчетных длин элементов в структурных конструкциях типа «Кисловодск»

С.В. Щуцкий  , А.А. Лиманцев 

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

 sypike1@rambler.ru



EDN: OHXFLF

Аннотация

Введение. В статье рассмотрен вопрос определения расчетных длин стержней структурной конструкции типа «Кисловодск». При обследовании существующей конструкции покрытия торгового центра в проектной документации на объект авторами статьи выявлено, что в расчетах конструкции для стержней применяется коэффициент расчетной длины, равный 0,8. Значение 0,8 обусловлено результатами проведенных испытаний в ЦНИИСК им. Кучеренко в 1987 г. Однако действующие нормативные документы предписывают использовать коэффициент расчетной длины, равный 1. Целью данной статьи является обоснование значения коэффициента расчетной длины в расчетах подобных конструкций.

Материалы и методы. Рассмотрен стандартный узел крепления стержней к узловому коннектору. Принято решение об изучении работы как отдельного узла структурной конструкции, так и стержней совместно при помощи моделирования в программном комплексе Femap with Nastran. В работе рассматривается влияние узлового соединения на устойчивость отдельного стержня. Для этого выполнено моделирование узлового элемента конструкции с опиранием при контактном соединении сжатого стержня и расчет отдельного стержня на устойчивость. Затем рассматривается система стержней для определения критической силы с учетом влияния соседних элементов. Схема представляет собой четыре стержня нижнего пояса и четыре стержня раскосов, соединенных в одном узле и нагруженных сжимающей или растягивающей нагрузкой.

Результаты исследования. Рассмотренный отдельный узел стыка стержня с коннектором, в котором сжимающие усилия передаются через плотный контакт, по характеру работы при проверке устойчивости стержня весьма близок к жесткому креплению.

Коэффициент расчетной длины для сжатых элементов находится в пределах от 0,77 до 0,88 в зависимости от значений усилий в элементах и их сечений. Из чего можно сделать однозначный вывод о том, что применение коэффициента 0,8 для всех сжатых стержней не может быть теоретически обосновано.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования покрытия показывают правильность применения требований СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции» в части определения расчетной длины сжатого стержня равной 1, а использование коэффициента равного 0,8 не может быть теоретически обосновано. Снижение металлоемкости при использовании в расчетах пониженных коэффициентов расчетной длины не приводит к значимой экономии для конструкции в целом и не является целесообразной.

Ключевые слова: пространственная решетчатая система, структурная конструкция, расчетная длина, устойчивость

Для цитирования: Щуцкий С.В., Лиманцев А.А. К вопросу определения расчетных длин элементов в структурных конструкциях типа «Кисловодск». *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(2):41–48. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-41-48>

On the Issue of Determining the Design Lengths of Elements in Structural Constructions of the Kislovodsk Type

Sergey V. Shchutsky  , Aleksey A. Limantsev 

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

 svpikel@rambler.ru

Abstract.

Introduction. The article looks at the issue of determining the design lengths of rods of the structural construction of the Kislovodsk type. While examining the existing structure of the coating of the shopping center, in the design documentation for the object, the authors found that the design length coefficient equal to 0.8 was used in the calculations of the rod structure. The value of 0.8 is due to the results of the tests performed at Kucherenko Central Research Institute in 1987. However, according to the current regulations, a coefficient of design length equal to one is to be used. The aim of the article is to justify the value of the design length coefficient in calculations of such structures.

Materials and Methods. A standard unit of attaching rods to a nodal connector is considered. It was decided to study the work of both a separate structural unit and rods together by modeling in the Femap with Nastran software package. The paper considers the effect of a nodal joint on the stability of an individual rod. To this end, a nodal structural element with a support at the contact connection of a compressed rod and a calculation of a separate rod for stability was modelled. A system of rods is then considered in order to determine the critical force, taking into account the influence of adjoining elements. The scheme consists of four rods of the lower belt and four rods of the braces connected in one node and loaded with a compressive or tensile load.

Research Results. The considered separate joint of the rod with the connector, where compressive forces are transmitted through a tight contact, is very close to rigid fastening by the nature of the work when checking the stability of the rod. The design length coefficient for compressed elements ranges from 0.77 to 0.88, depending on the force values in the elements and their cross sections. Based on this, it can be unambiguously concluded that the application of a coefficient of 0.8 for all compressed rods cannot be theoretically justified.

Discussion and Conclusion. The coating studies show that the requirements of SP 16.13330.2011 "Steel Structures" are correctly applied in terms of determining the design length of a compressed rod equal to 1, and the use of a coefficient equal to 0.8 cannot be theoretically justified. Reducing the metal consumption while using reduced design length coefficients in calculations does not lead to significant savings for the overall structure and is not feasible.

Keywords: spatial lattice system, structural design, design length, stability

For citation. Shchutsky SV, Limantsev AA On the Issue of Determining the Design Lengths of Elements in Structural Constructions of the Kislovodsk Type. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):41–48. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-41-40>

Введение. Пространственные решетчатые системы получили свое активное развитие со второй половины XX века, и за это время было построено большое количество различных зданий и сооружений, в покрытии которых использованы структурные конструкции¹ [1–3]. Одной из наиболее распространенных решетчатых конструкций покрытия из труб в России является структура типа «Кисловодск» [4–5], разработанная в рамках государственной программы и предназначенная для решения задач организации производства и комплектной поставки легких металлических конструкций промышленных зданий.

Основное свойство как плоских, так и пространственных стержневых систем заключается в том, что все элементы подвержены одноосному напряженно-деформированному состоянию (сжатию или растяжению). Растянутые элементы рассчитываются на прочность, а сжатые — на устойчивость. В свою очередь, устойчивость элемента напрямую зависит от его расчетной или приведенной длины. Нормативные документы как в текущей редакции, так и действовавшие в прошлом, предписывают в расчетах элементов пространственных структурных конструкций за расчетную длину принимать полную геометрическую длину стержня, или, другими словами, применять коэффициент расчетной длины, равный 1 (за исключением случаев, когда элементы прикрепляются в узлах сваркой впритык к шаровым или цилиндрическим узловым элементам — в этом случае коэффициент принимается равным 0,85).

¹ Дыховичный Ю.А., Жуковский Э.З. *Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы)*. М.: Высш. шк.; 1991. 543 с.

В ходе обследования покрытия торгового центра, запроектированного в 2004 году, в процессе анализа исходной документации и сбора исходных данных для выполнения поверочного расчета обследуемой структурной конструкции было обнаружено, что при ее проектировании для стержней с сечением из труб $48 \times 2,8$, $57 \times 3,2$ и 76×3 использовался коэффициент расчетной длины, равный 0,8. Такое значение коэффициента было принято разработчиками проектной документации в результате проведенных испытаний в ЦНИИСК им. Кучеренко в 1987 г. Целью данной статьи является моделирование работы узлового элемента структурной конструкции типа «Кисловодск» и обоснование значения коэффициента расчетной длины в расчетах подобных конструкций.

Материалы и методы. Рассмотрим конструкцию узла крепления элементов к узловому коннектору. В качестве соединительного элемента выступает узловой коннектор, который представляет собой стальной многогранник с резьбовыми отверстиями (рис. 1). Все стержни системы имеют одинаковую номинальную длину и состоят из электросварных или горячекатаных труб с приваренными к торцу шайбами. В отверстия шайб пропущены стержни высокопрочных болтов с закрепленными на них муфтами из шестигранника (рис. 2). Резьбовые отверстия сориентированы по направлению сходящихся в узле поясов и раскосов. Грани узлового элемента нормальны к осям отверстий и равнорасположены от центра узла. Таким образом, в случае с растянутыми стержнями усилие передается через высокопрочные болты, а при сжатом стержне усилие передается через контакт муфты с гранью коннектора².

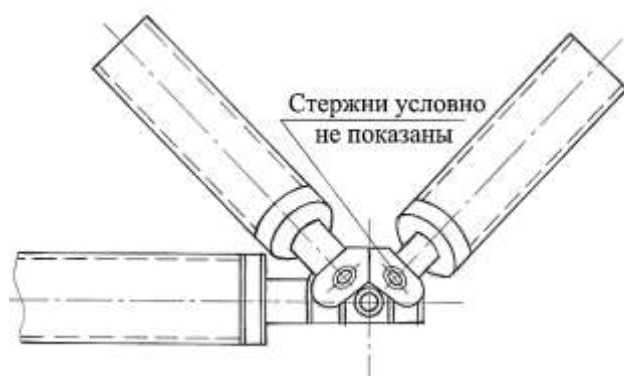


Рис. 1. Узел крепления стержневой системы «Кисловодск».

URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293830/4293830102.htm> (дата обращения: 17.04.2026)

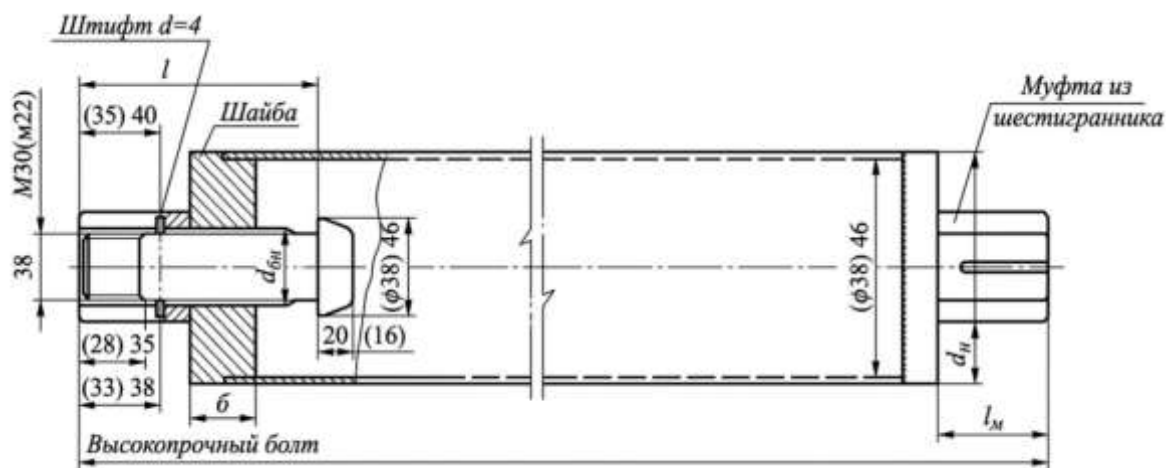


Рис. 2. Стержневой элемент системы «Кисловодск».

URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293830/4293830102.htm> (дата обращения: 17.04.2026)

На первый взгляд, такое соединение представляется скорее «шарнирным», чем «жестким». Однако коэффициент меньше 1 может быть получен только при «жестком» соединении стержней. Поэтому для проверки обоснованности применения коэффициента, равного 0,8, необходимо ответить на два вопроса: какой коэффициент устойчивости у стержневых элементов решетки при жестком соединении и насколько принятый узел соединения можно считать близким к жесткому с точки зрения устойчивости стержней.

² Пространственные решетчатые конструкции из труб типа «Кисловодск». Рабочие чертежи. Серия 1.466-2. Гипромонтажиндустрия; 1973. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293830/4293830102.htm> (дата обращения: 16.03.2026).

В рамках текущего исследования было принято решение изучить работу элементов структурной конструкции с помощью компьютерного моделирования. Современные системы инженерного анализа (или системы автоматизации инженерных расчетов) — САЕ (англ. computer-aided engineering) — обеспечивают решение большого числа разнообразных задач линейного и нелинейного статического анализа с большой точностью [6–10].

Для выполнения расчетов в рамках данной работы был выбран программный комплекс Femap with Nastran как мощный и гибкий инструмент для решения различного рода задач.

Результаты исследования. Исследовательская часть работы разбита на две отдельные задачи. Во-первых, рассматривается влияние описанного выше узлового соединения на устойчивость одного стержня. Во-вторых, рассматривается система стержней для определения критической силы с учетом влияния соседних элементов.

Задача 1. Femap with Nastran предоставляет возможность соединения двух тел из объемных конечных элементов, которые соприкасаются друг с другом, но не имеют общих узлов, с помощью соединения типа «contact» и «glued» (соответственно «контакт» и «склейка»). Соединение типа «склейка» ограничивает перемещение узлов во всех направлениях по всей области соединения, и фактически два тела становятся одним целым. Соединение типа «контакт» запрещает взаимное проникновение тел и позволяет смоделировать свободное опирание одного тела на другое без соединения.

Выполним моделирование узлового соединения в системе Femap with Nastran. Коннектор условно представлен в виде параллелепипеда, шестигранная муфта заменена на цилиндр. Основной стержень представлен в виде стержневого элемента и соединен с муфтой с помощью жесткой связи. Соединение муфты и коннектора в модели выполнено как «контакт», что наиболее близко к реальной конструкции узла. Для сравнения также выполнен расчет на устойчивость при соединении «склейка», что соответствует жесткому соединению (рис. 3).

Основной стержень в структурной конструкции имеет сечение в виде круглой трубы 80×3 и общую длину 300 см. Сила Эйлера для такого стержня составляет:

$$P_3 = \frac{\pi^2 EI_x}{l^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20600 \cdot 53,87}{300^2} = 121,7 \text{ кН.}$$

Значения усилий, при которых произошла потеря устойчивости такого стержня, составили: при соединении типа «склейка» — 240,1 кН, при соединении типа «контакт» — 216,1 кН (рис. 4). В этом случае коэффициенты расчетной длины равны 0,712 и 0,75 соответственно.

Сравнение полученных результатов однозначно показывает, что реальная работа узла с точки зрения устойчивости весьма близка к жесткому соединению стержня с коннектором. Значение коэффициента продольного изгиба при этом увеличивается на 5 %.

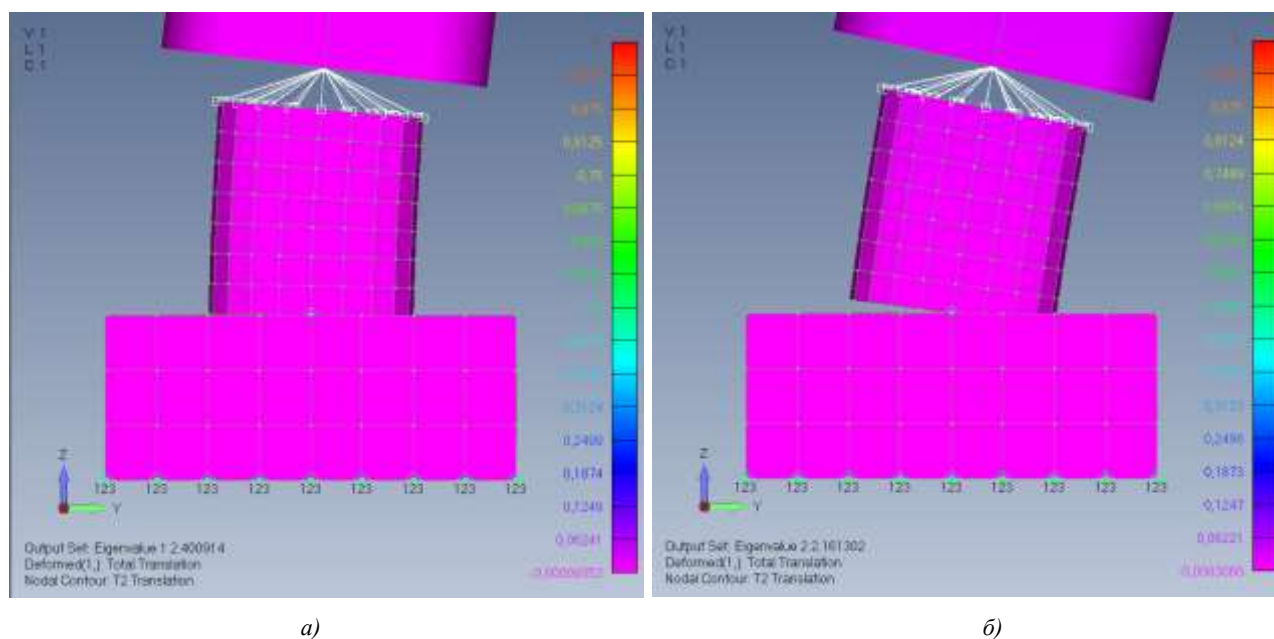


Рис. 3. Варианты моделирования узлового соединения: *a* — соединение типа «склейка»; *б* — соединение типа «контакт»

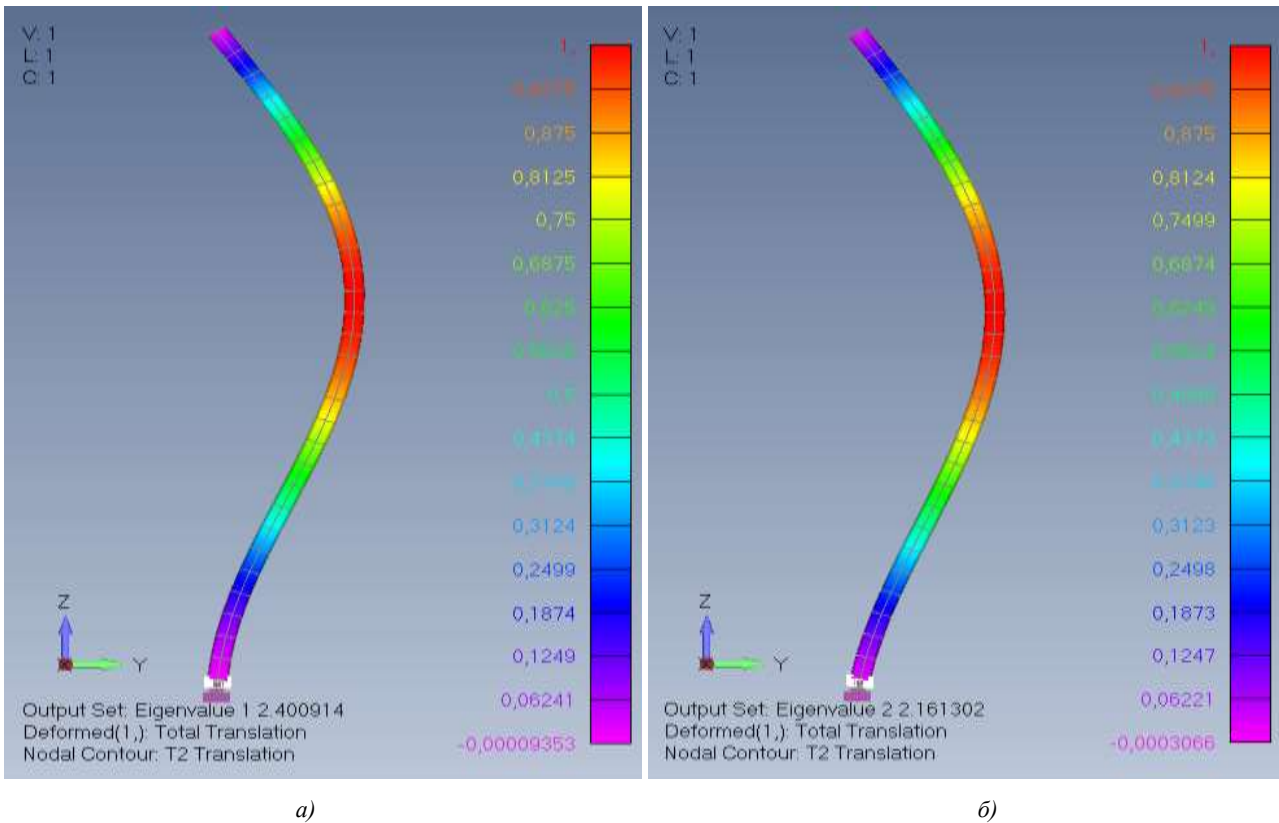


Рис. 4. Потеря устойчивости при соединении типа: *а* — «склейка»; *б* — «контакт»

Задача 2. Для определения критической силы для сжатых элементов выбрана следующая расчетная схема: рассматриваются четыре элемента нижнего пояса и четыре элемента решетки, соединенные в одном узле [11–14]. Противоположный конец каждого из элементов схемы имеет шарнирное закрепление. Длина всех стержней составляет 3 метра. Следует заметить, что при добавлении в расчетную модель элементов верхнего пояса стержень раскоса будет иметь два конца с той или иной степенью защемления от потери устойчивости. Однако предполагается, что элементы верхнего пояса преимущественно находятся в сжатом состоянии, поэтому оказывают меньший закрепляющий эффект, которым обычно пренебрегают.

Для начала приведем в качестве примера идеализированный вариант нагружения расчетной схемы, где все элементы нижнего пояса растянуты единичной силой, а элементы раскосов попарно растянуты и сжаты так же единичной силой (рис. 5). Сечение всех элементов — труба 60×3.

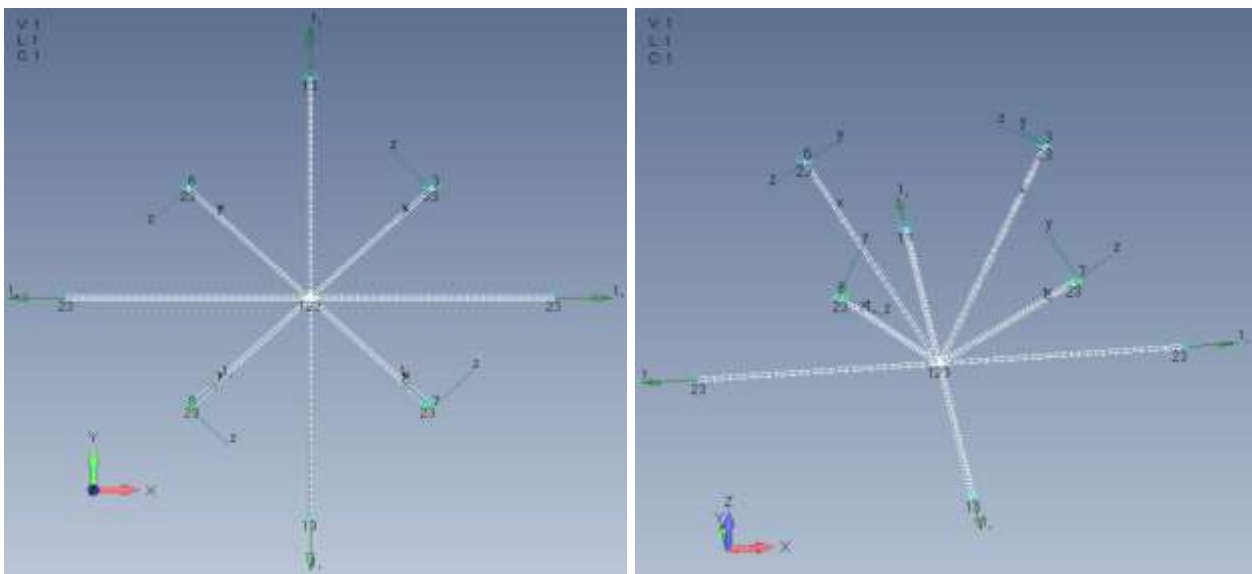


Рис. 5. Расчетная схема

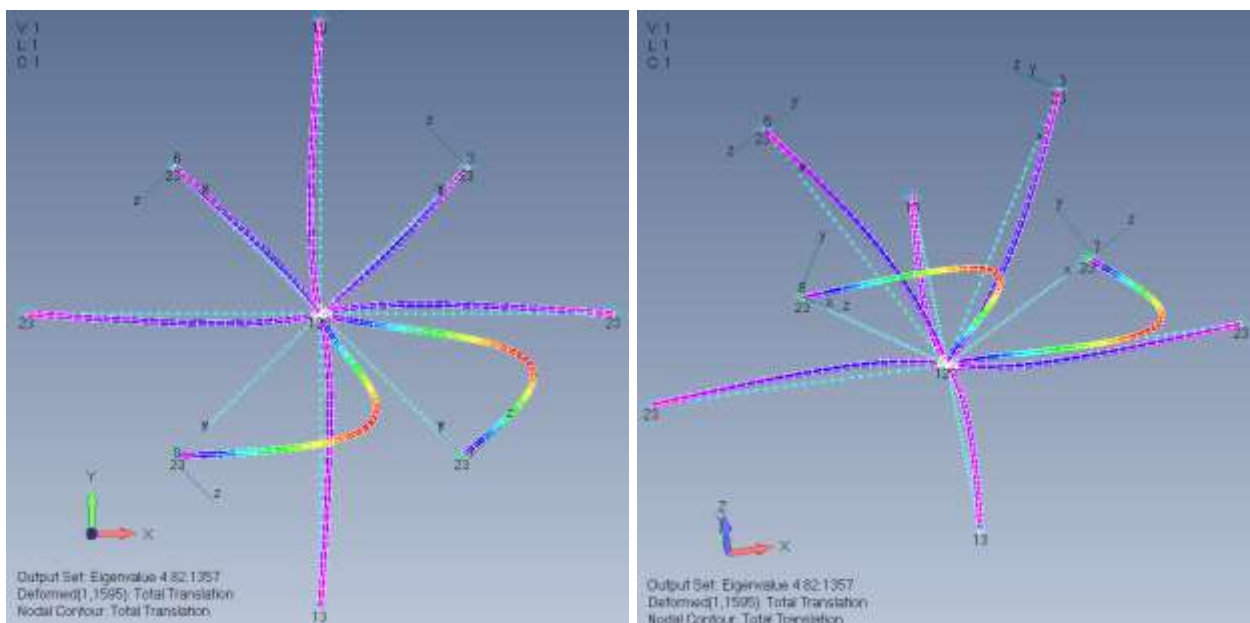


Рис. 6. Деформированная схема при потере устойчивости вариант 1

Сжатые стержни потеряли устойчивость при усилии в 82,14 кН (рис. 6), что дает коэффициент устойчивости, равный 0,776.

Далее приведен пример с расчетом при соотношениях сил, взятых из реальной конструкции. Потеря устойчивости сжатого стержня происходит при значении усилия 143,88 кН (рис. 7), что дает коэффициент устойчивости 0,849. Другие варианты сочетаний усилий и сечений элементов, которые были рассчитаны при подготовке данной работы, давали в результате коэффициент расчетной длины в пределах от 0,77 до 0,88.

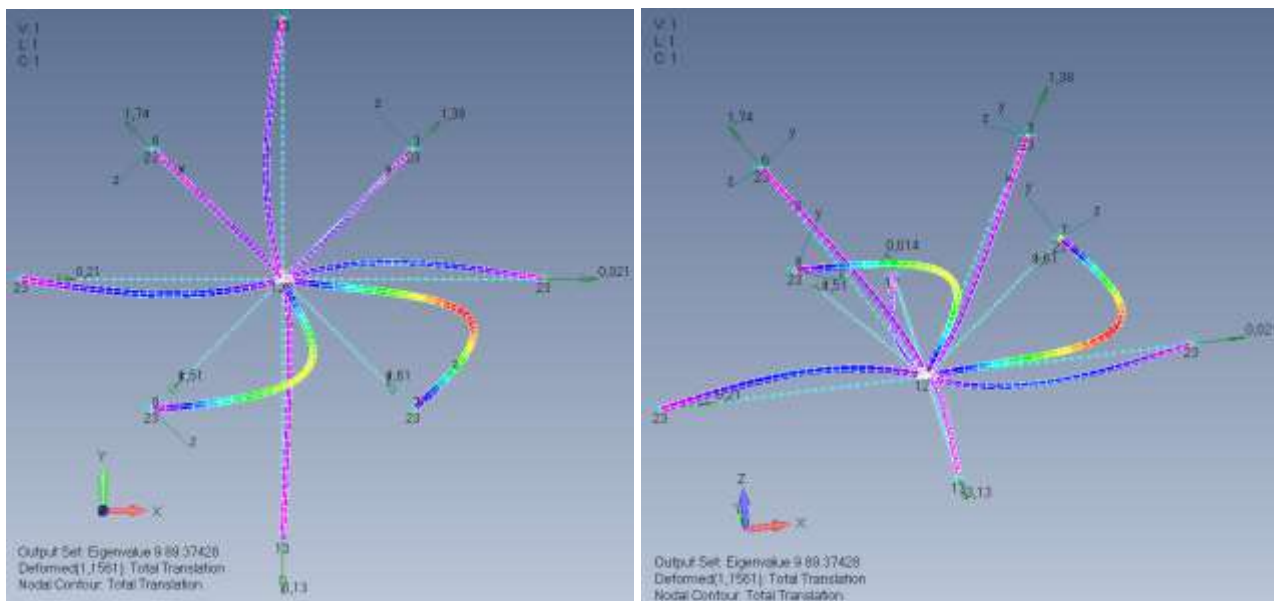


Рис. 7. Деформированная схема при потере устойчивости вариант 2

В результате проведенных вычислений можно сделать следующие выводы:

1. Узел стыка стержня с коннектором, в котором сжимающие усилия передаются через плотный контакт, по характеру работы при проверке устойчивости стержня весьма близок к жесткому закреплению.
2. Коэффициент расчетной длины для сжатых элементов находится в пределах от 0,77 до 0,88 в зависимости от значений усилий в элементах и их сечений. Из чего можно сделать однозначный вывод о том, что применение коэффициента 0,8 для всех сжатых стержней не может быть теоретически обоснованно.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования покрытия в виде структурной конструкции типа «Кисловодск» показывают правильность применения требования СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции» в части определения расчетной длины сжатого стержня равной 1, а использование коэффициента равного 0,8 не может быть теоретически обосновано. Кроме того, при расчете и конструировании подобных конструкций

следует обратить внимание на то, что в системе такого типа присутствует большое число стержней с различными усилиями, и рассмотрение всех возможных сочетаний представляет объемную и сложную задачу. При этом повышение металлоемкости при рассмотрении одного элемента и при учете только сечения трубы составляет 20–30 %, однако, если учесть металлоемкость и стоимость изготовления всей конструкции, данная экономия существенно нивелируется и не является целесообразной.

Список литературы /References

1. Abramczyk J. Building Structures Roofed with Multi-Segment Corrugated Hyperbolic Paraboloid Steel Shells. *Procedia Engineering*. 2016;161:1545–1550. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.624>
2. Joseph E. Bowles. *Structural Steel Design*. New York: McGraw-Hill; 2007. 536 p.
3. Кривошапко С.Н. Оболочки и стержневые структуры в форме аналитически задаваемых поверхностей в современной архитектуре. *Строительство и реконструкция*. 2020;3(89):20–30. URL: <https://oreluniver.ru/public/file/archive/2073-7416-2020-89-3-20-30.pdf> (дата обращения: 17.04.2026).
Krivoshapko SN Shells and Rod Structures in the Form of Analytically Non-Given Surfaces in Modern Architecture. *Building and Reconstruction*. 2020;3(89):20–30. URL: <https://oreluniver.ru/public/file/archive/2073-7416-2020-89-3-20-30.pdf> (accessed: 17.04.2026).
4. Еремеев П.Г., Ведяков И.И., Королева Е.А. Светопрозрачные крыши с использованием стекла для большепролетных покрытий. *Промышленное и гражданское строительство*. 2019;6:23–28. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.06.23-28>
5. Еремеев П.Г. *Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений*. М.: АСВ; 2009. 336 с.
Eremeev PG, Vedyakov II, Koroleva EA Translucent Roofs Using Glass for Large-Span Coverings. *Industrial and Civil Construction*. 2019;6:23–28. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.06.23-28>
6. Свентиков А.А., Кузнецов Д.Н. Автоматизированное проектирование пространственных решетчатых стальных конструкций покрытий сложной формы. *Строительство и реконструкция*. 2021;1:38–49. URL: https://oreluniver.ru/public/file/archive/sir_2073-7416-2021-93-1-38-49.pdf (дата обращения: 17.04.2026).
7. Карпунин В.Г., Голубева Е.А. Компьютерное моделирование строительных конструкций зданий и сооружений. *Архитектон: известия вузов*. 2019;4(68):1–11. URL: https://archvuz.ru/2019_4/16/ (дата обращения: 16.03.2026).
Karpunin VG, Golubeva EA Computer Modeling of Building Structures. *Architecton. Proceedings of Higher Education*. 2019;4(68):1–11. URL: https://archvuz.ru/2019_4/16/ (accessed: 16.03.2026).
8. Jirasek M., Bazant Z.P. *Inelastic analysis of structures*. Chichester: JohnWiley & Sons Ltd; 2008. 734 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/37427387_Inelastic_Analysis_of_Structures (дата обращения: 16.03.2026).
9. Thakore D. *Finite Element Analysis with Open Source Software*. Moonish Enterprises Pty Ltd; 2014. 92 p. <https://doi.org/10.13140/2.1.4322.0808>
10. Levy S. M. *Construction Calculations Manual*. Elsevier; 2012. 692 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-64499-8>
11. Пушкин Б.А. К расчету сжатого стержня пространственной фермы по СП 53-102-2004. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2010;1:34–38. URL: https://stroy-mex.narod.ru/index/2010_1/0-155 (дата обращения: 16.03.2026).
Pushkin BA The Fixed Column Calculation of Spatial Frame Using Building by-Law 53-102-2004. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2010;1:34–38. URL: https://stroy-mex.narod.ru/index/2010_1/0-155 (accessed: 16.03.2026).
12. Aghayere A., Vigil J. *Structural steel design: a practice-oriented approach*. Prentice Hall; 2009. 692 p.
13. Алфутов Н.А. *Основы расчета на устойчивость упругих систем*. М.: Машиностроение; 1978. 312 с.
Alfutov NA *Fundamentals of Calculation for the Stability of Elastic Systems*. Moscow: Mashinostroenie; 1978. 312 p.
14. Грудев И.Д. *Устойчивость стержневых элементов в составе стальных конструкций*. М.: МИК; 2005. 320 с.
Grudev ID *Stability of Core Elements in Steel Structures*. Moscow: MIK; 2005. 320 p.

Об авторах:

Щуцкий Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9152-1000), svpikel@rambler.ru

Лиманцев Алексей Алексеевич, старший преподаватель кафедры металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9152-1000), alimantsev@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

С.В. Щуцкий: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, доработка текста, корректировка выводов.

А.А. Лиманцев: подготовка текста, расчеты, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Sergey V. Shchutsky, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal, Wood and Plastic Structures, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), svpike1@rambler.ru

Aleksey A. Limantsev, Senior Lecturer at the Department of Metal, Wood and Plastic Structures, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), alimantsev@gmail.com

Claimed contributorship:

SV Shchutsky: formation of the basic concept, aims of the study, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

AA Limantsev: preparation of the manuscript, calculations, 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 20.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 02.04.2026

Принята к публикации / Accepted 16.04.2026

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION



УДК 711.1/.2:69.05

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-49-55>

Методологические основы проекта организации строительства развития территорий в системе комплексного развития территорий



EDN: BWVTBA

С.А. Алиев  

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, г. Грозный, Российская Федерация

 asa-fenix@mail.ru

Аннотация

Введение. Настоящее исследование посвящено разработке методологических основ проекта организации строительства развития территорий (ПОСРТ) как инструмента управления комплексным развитием территорий (КРТ). В условиях масштабного территориального развития существующие подходы к организации строительства, основанные на традиционном пообъектном проекте организации строительства (ПОС), не обеспечивают необходимой координации ресурсов и логистических процессов. Цель работы — разработка теоретических основ и структуры ПОСРТ, обеспечивающих эффективное управление строительными процессами в рамках проектов КРТ и мастер-планов.

Материалы и методы. Исследование основано на анализе теоретических подходов к организации строительства, систематизации опыта реализации проектов комплексного развития территорий и выявлении недостатков существующих методологий. Используются методы системного анализа, сравнительного анализа, структурно-функционального моделирования и обобщения теоретических положений.

Результаты исследования. Разработана структура ПОСРТ, включающая внешний контур (транспортная доступность, инженерная инфраструктура, инженерная защита территории, логистические связи, природно-территориальные условия, институциональная среда) и внутренний контур (производственные объекты, временная инфраструктура, внутренние инженерные сети, транспортные сети, трудовые ресурсы, этапность строительства). Обоснован механизм трансляции ограничений внешнего контура во внутренний и компенсационные меры, обеспечивающие устойчивость реализации проекта.

Обсуждение и заключение. Разработанная методология ПОСРТ формирует теоретическую основу для организации строительства в рамках проектов комплексного развития территорий. Введение концепции внешнего и внутреннего контуров позволяет системно учитывать ограничения и возможности территории, обеспечивая эффективное распределение ресурсов и координацию строительных процессов.

Ключевые слова: проект организации строительства развития территорий, комплексное развитие территорий, внешний контур, внутренний контур, организация строительства, ресурсная координация, логистика, территориальное планирование

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту доктору технических наук, профессору Азарию Абрамовичу Лапидусу, а также руководителю научной школы «Ресурсо- и энергосбережение в строительстве» доктору технических наук, профессору Муртазаеву Сайд-Альви Юсуповичу за ценные рекомендации и помощь в подготовке данной статьи. Автор благодарит рецензентов за внимательное отношение к статье и конструктивные замечания, способствующие повышению её качества.

Для цитирования: Алиев С.А. Методологические основы проекта организации строительства развития территорий в системе комплексного развития территорий. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(2):49–55. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-49-55>

Methodological Foundations of a Project of Organizing Construction and Development of Territories in a System of Integrated Territorial Development

Salambek A. Aliev  

Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov, Grozny, Russian Federation

 asa-fenix@mail.ru

Abstract

Introduction. This study is dedicated to development of methodological foundations of territorial development construction project (TDCP) as a tool for managing integrated territorial development (ITD). The existing approaches to construction organization based on the traditional object-by-object construction organization project (COP) fail to provide necessary coordination of resources and logistics. The aim of the study is to develop the theoretical foundations and structure of TDCP and structure of ITD, ensuring effective management of construction processes within the framework of ITD projects and master plans.

Materials and Methods. The research is based on the analysis of theoretical approaches to construction organization, systematization of experience in implementing integrated territorial development projects and identification of the drawbacks of the existing methodologies. Methods of system analysis, comparative analysis, structural and functional modeling and generalization of the theoretical provisions were used.

Research Results. The structure of TDCP has been developed, including the external contour (transport accessibility, engineering infrastructure, engineering protection of a territory, logistics links, natural and territorial conditions, institutional environment) and an internal contour (production facilities, temporary infrastructure, internal engineering networks, transport networks, labor resources, stages of construction). The mechanism of converting the constraints of the external contour into the internal one and compensatory measures ensuring the sustainability of the project is substantiated.

Discussion and Conclusion. The developed TDCP methodology serves as the theoretical foundation for organizing construction within integrated territorial development projects. The introduction of the concept of external and internal contours enables one to systematically account for the limitations and capabilities of a territory, ensuring efficient allocation of resources and coordination of construction processes.

Keywords: territorial development construction project, integrated territorial development, external contour, internal contour, construction organization, resource coordination, logistics, territorial planning

Acknowledgments. The author extends his deepest gratitude to the scientific advisor, Doctor of Sciences in Engineering, Professor Azari Abramovich Lapidus, as well as to the head of the scientific school "Resource and Energy Conservation in Construction", Doctor of Sciences in Engineering, Professor Murtazaev Sayd-Alvi Yusupovich for valuable recommendations and assistance in preparing the article. The author would like to thank the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the above comments making it possible to improve its quality.

For citation. Aliev SA Methodological Foundations of a Project of Organizing Construction and Development of Territories in a System of Integrated Territorial Development. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):49–55. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-49-55>

Введение. В последние десятилетия вопросы комплексного развития территорий (КРТ) приобрели особую значимость в контексте устойчивого развития городских и сельских поселений [1]. Реализация федерального закона № 494-ФЗ «О комплексном развитии территорий» и национальных проектов, направленных на улучшение качества городской среды, требует совершенствования методологии организации строительства [2]. Это особенно актуально для регионов с активным экономическим и демографическим ростом, таких как Чеченская Республика, где реализуется масштабная программа территориального развития [3].

Существующие подходы к организации строительства, основанные на традиционном пообъектном проекте организации строительства (ПОС), разработанном в соответствии с СП 48.13330.2019 «Организация строительства» [4], не обеспечивают необходимой координации ресурсов и логистических процессов при реализации проектов КРТ [5]. Традиционный ПОС, разрабатываемый в соответствии с требованиями Градостроительного кодекса РФ от 29.12.2004 г. № 190-ФЗ, ориентирован на отдельное здание или сооружение и не учитывает специфику массового строительства на территории с комплексом взаимосвязанных объектов.

В работах Азария Абрамовича Липидуса обоснована необходимость разработки проекта организации территории (ПОТ) как элемента комплексного развития территорий. Дальнейшее развитие этой концепции привело к

формированию идеи проекта организации строительства развития территорий (ПОСРТ) — комплексного документа, интегрирующего решения по инженерной подготовке, логистике и управлению строительными потоками на уровне территории [1, 6].

Анализ научной литературы показывает, что вопросам организации строительства в рамках КРТ посвящены работы как отечественных [5, 6], так и зарубежных исследователей [7–10]. Однако комплексная методология, объединяющая теоретические основы и практические инструменты организации строительства для проектов КРТ, требует дальнейшей разработки.

Целью настоящего исследования является разработка методологических основ проекта организации строительства развития территорий, обеспечивающих эффективное управление строительными процессами в рамках проектов комплексного развития территорий.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проанализированы теоретические подходы к организации строительства, выявлены недостатки существующих методологий применительно к проектам КРТ;
- разработана структура ПОСРТ, включающая внешний и внутренний контуры организации строительства;
- обоснован механизм взаимосвязи контуров и трансляции ограничений;
- проведено сравнение традиционного ПОС и ПОСРТ.

Материалы и методы. Исследование основано на анализе нормативной документации, научной литературы и практики реализации проектов комплексного развития территорий. Используются следующие методы:

1. Метод системного анализа применен для выявления взаимосвязей между элементами организации строительства в рамках КРТ и формирования структуры ПОСРТ. Данный метод позволил рассмотреть организацию строительства как сложную систему, включающую внешние и внутренние элементы, находящиеся в постоянном взаимодействии.

2. Метод сравнительного анализа использован для сопоставления традиционного ПОС и предлагаемого ПОСРТ по ключевым параметрам: объект планирования, масштаб, подход к логистике, инженерное обеспечение, планирование, координация участников, управление ресурсами, риски и конечный результат.

3. Метод структурно-функционального моделирования применен для разработки концептуальной модели ПОСРТ, включающей внешний и внутренний контуры с детализацией их составляющих элементов и механизмов взаимодействия.

4. Метод обобщения теоретических положений использован для формирования методологических основ ПОСРТ на базе анализа существующих подходов к организации строительства и территориальному планированию.

Результаты исследования. В результате проведенного исследования разработана структура проекта организации строительства развития территорий, представляющая собой комплексный документ, объединяющий планирование развития территорий и организацию строительства.

ПОСРТ включает две основные составляющие: внешний контур и внутренний контур (рис. 1).

Внешний контур ПОСРТ охватывает элементы, находящиеся за пределами проектируемой территории, но оказывающие определяющее влияние на организацию строительства. К внешнему контуру относятся:

- транспортная доступность — включает подъездные магистрали, их пропускную способность, структуру транспортных потоков и ограничения на движение грузового транспорта. Для проектов КРТ характерна высокая интенсивность грузоперевозок, что требует специальных решений по организации транспортной логистики;
- инженерная инфраструктура — охватывает магистральные сети электроснабжения, водоснабжения, водоотведения, теплоснабжения и газоснабжения, а также источники ресурсного обеспечения. Параметры магистральных сетей определяют возможности подключения и требуют проектирования внутренних распределительных систем;
- инженерная защита территории — включает мероприятия по защите от подтоплений, оползней, селей и других природных воздействий. Для территорий со сложным рельефом данный элемент приобретает особое значение;
- логистические связи — определяют структуру поставщиков строительных материалов, маршруты доставки, наличие производственных баз и складских комплексов в регионе реализации проекта;
- природно-территориальные условия — включают рельеф местности, геологические условия, климатические факторы, гидрологические условия и экологические ограничения;
- институциональная среда — охватывает нормативно-правовую базу, административные процедуры, систему государственного регулирования и стейкхолдеров проекта.

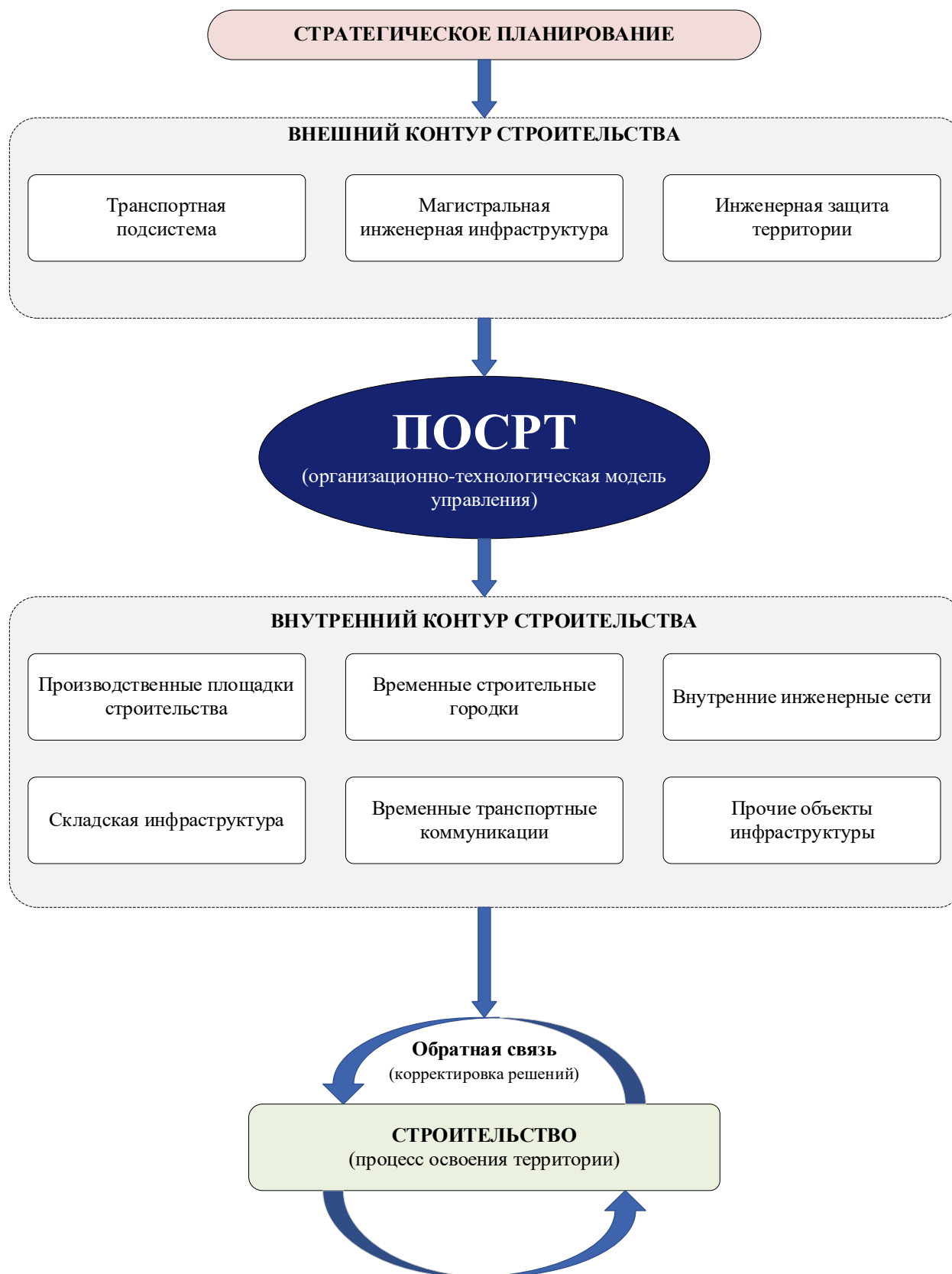


Рис. 1. Структурная модель взаимодействия внешнего и внутреннего контуров в системе проекта организации строительства развития территорий

Внутренний контур ПОСРТ включает элементы, расположенные в пределах проектируемой территории и обеспечивающие реализацию строительных процессов:

– производственные объекты — бетоносмесительные узлы, заводы железобетонных изделий, склады строительных материалов, пункты переработки отходов;

- временная инфраструктура — бытовые городки, пункты питания, санитарно-бытовые помещения, административные зоны для персонала;
- внутренние инженерные сети — распределительные сети электроснабжения, водоснабжения, водоотведения, теплоснабжения, газоснабжения и связи;
- внутренние транспортные сети — дорожная инфраструктура для обеспечения строительных процессов, включая постоянные и временные подъездные пути;
- трудовые ресурсы — система обеспечения проекта персоналом, организация труда, бытовое обслуживание работающих;
- этапность строительства — последовательность ввода объектов, синхронизация жилой и социальной инфраструктуры, адаптивные механизмы корректировки графиков.

Механизм взаимосвязи внешнего и внутреннего контуров основан на трансляции ограничений. Параметры внешнего контура формируют ограничения и задают допустимое пространство решений для внутреннего контура. Внутренний контур, в свою очередь, реализует компенсационные меры, направленные на нивелирование дефицитов внешнего контура.

Эффективность взаимосвязи контуров оценивается через показатель интегральной согласованности:

$$K_c = \sum (w_i \times k_i),$$

где w_i — весовой коэффициент i -й подсистемы; k_i — коэффициент согласованности i -й подсистемы, определяемый как отношение фактических параметров к требуемым.

Значение $K_c \geq 1$ свидетельствует о достаточной согласованности контуров.

Проведенное сравнение традиционного ПОС и ПОСРТ показало существенные различия в подходах к организации строительства (таблица 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ традиционного ПОС и проекта организации строительства развития территории

Критерий	Традиционный ПОС	ПОСРТ
Уровень объекта управления	Один объект (здание / сооружение)	Территория КРТ / район (система объектов)
Целевой результат	Организация производства работ на объекте	Координация освоения территории и синхронизация потоков между объектами
Контур управления	Преимущественно внутренний (стройплощадка)	Два контура: внешний (инфраструктура / ограничения) + внутренний (стройпроизводство)
Связь с территориальным планированием	Косвенная (через исходные данные проекта)	Прямая интеграция с генпланом / мастер-планом / КРТ и программами развития
Горизонт планирования	Срок строительства объекта	Многолетняя этапность освоения (очереди 4–10 лет и более)
Масштаб инженерной инфраструктуры	Внутриплощадочные временные / постоянные сети	Магистральные сети + поэтапное подключение и внутренняя инфраструктура территории
Транспорт и доступность	Подъезды к площадке, локальная схема	Территориальная транспортная подсистема: пропускная способность, узлы, внешние связи
Логистика материалов	Поставки «на объект»	Территориальная логистика: источники–маршруты–узлы–точки приемки, межобъектная координация
Ресурсная координация	Ресурсы в пределах объекта / подрядчика	Баланс ресурсов на территории: предотвращение конкуренции подрядчиков за мощности и поставки
Управление дефицитами	Реактивно (по факту сбоев)	Проактивно: выявление дефицитов внешнего контура и их компенсация решениями внутреннего контура
Риски и неопределенность	Анализ рисков объекта	Риски жизненного цикла территории: инфраструктурные, логистические, институциональные, экологические
Институциональные условия	Обычно вне модели (фон)	Учитываются как подсистема: согласования, регламенты, интерфейсы участников, ограничения сроков
Методы моделирования	Сетевое / календарное планирование объекта	Системно-техническая модель территории: показатели обеспеченности, дефициты, сценарии, оптимизация потоков
Цифровая основа	ВМ-модель объекта (частично)	ВМ + СИМ + ГИС / цифровые платформы территории, данные для мониторинга и корректировки решений
Критерий реализуемости	Выполнимость графика объекта	Реализуемость этапов жизненного цикла территории при соблюдении порогов обеспеченности внешнего контура
Практический эффект	Оптимизация сроков / ресурсов объекта	Устойчивость КРТ: снижение срывов этапов, согласованность инфраструктуры и графиков, управляемость ЖЦ

Традиционный ПОС ориентирован на отдельное здание или сооружение, обеспечивает точечное строительство и использует пообъектный подход. Логистика строится на принципе поставок к точке строительства, инже-

нерное обеспечение — на подключении к существующим сетям. Планирование характеризуется жесткими сроками и объемами, координация ограничена взаимодействием заказчика и подрядчика, управление ресурсами носит локальный характер. Риски остаются высокими из-за отсутствия резервов, результатом является изолированный объект.

ПОСРТ ориентирован на территорию с комплексом объектов, обеспечивает массовое строительство и использует территориальный подход. Логистика строится как интегрированная система поставок, инженерное обеспечение — на проектировании распределительных сетей. Планирование характеризуется адаптивной этапностью, координация осуществляется на многоуровневой основе со всеми участниками, управление ресурсами носит территориальный характер. Риски снижены за счет буферных механизмов, результатом является комплексно развивающаяся территория.

Практическая реализация ПОСРТ позволяет достичь следующих эффектов:

- снижение транспортно-логистических издержек на 15–25 % за счет оптимизации маршрутов и создания буферных складов;
- сокращение сроков строительства на 10–20 % благодаря согласованной этапности и параллельному выполнению работ;
- повышение устойчивости проекта к внешним воздействиям через резервирование критических ресурсов;
- комплексное развитие территории с синхронным вводом жилой и социальной инфраструктуры.

Обсуждение и заключение. Разработанная методология ПОСРТ расширяет существующие представления об организации строительства, вводя территориальный уровень управления и объединяя логистические и ресурсные аспекты в единую модель. Разграничение внешнего и внутреннего контуров дает возможность для системного анализа взаимосвязей между инфраструктурными ограничениями, логистическими потоками и организацией строительного производства.

Ключевым отличием ПОСРТ от традиционного ПОС является территориальный подход, при котором объектом планирования становится не отдельное здание, а территория с комплексом взаимосвязанных объектов. Это требует принципиально иного подхода к логистике, инженерному обеспечению и управлению ресурсами.

Механизм трансляции ограничений внешнего контура во внутренний и обратная связь через компенсационные меры обеспечивают адаптивность системы организации строительства к изменяющимся условиям. Показатель интегральной согласованности K_c позволяет количественно оценить степень согласованности контуров и выявить узкие места системы.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности применения разработанной методологии при реализации проектов КРТ в различных регионах Российской Федерации. Методология ПОСРТ может быть интегрирована в региональные программы развития и использована органами государственной власти, проектными организациями и строительными компаниями.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой математических моделей оптимизации параметров ПОСРТ, созданием программного обеспечения для поддержки принятия решений при формировании ПОСРТ, апробацией методологии на конкретных проектах КРТ и разработкой типовых решений для различных категорий территорий.

Таким образом, разработанные методологические основы ПОСРТ создают научную базу для совершенствования организации строительства в рамках проектов комплексного развития территорий и способствуют повышению эффективности градостроительной деятельности.

Список литературы / References

1. Лapidус А.А. Проект организации территории (ПОТ) — необходимый элемент комплексного развития территорий (КРТ). *Строительное производство*. 2024;3(51):2–6. https://doi.org/10.54950/26585340_2024_3_2
Lapidus AA Territory Organization Project (TOP) as an Essential Element of Integrated Territorial Development (ITD). *Construction Production*. 2024;3(51):2–6. (In Russ.) https://doi.org/10.54950/26585340_2024_3_2
2. Лapidус А.А., Сафарян Г.Б. Организационно-технологическая надёжность производственно-логистических процессов в строительстве. *Наука и бизнес: пути развития*. 2019;3(93):121–125. URL: [http://globaljournals.ru/assets/files/journals/science-and-business/93/sb-3\(93\)-2019-main.pdf](http://globaljournals.ru/assets/files/journals/science-and-business/93/sb-3(93)-2019-main.pdf) (дата обращения: 10.04.2026).
Lapidus AA, Safaryan GB Organizational and Technological Reliability of Production and Logistics Processes in Construction. *Science and Business: Development Ways*. 2019;3(93):121–125. (In Russ.) URL: [http://globaljournals.ru/assets/files/journals/science-and-business/93/sb-3\(93\)-2019-main.pdf](http://globaljournals.ru/assets/files/journals/science-and-business/93/sb-3(93)-2019-main.pdf) (accessed: 10.04.2026)
3. Лapidус А.А., Олейник П.П. Обоснование процесса выбора организационно-технологических решений. *Промышленное и гражданское строительство*. 2024;4:70–74. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2024.04.70-74>

Lapidus AA, Oleynik PP Justification of the Process for Selecting Organizational and Technological Solutions. *Industrial and Civil Engineering*. 2024;4:70–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2024.04.70-74>

4. Агеева Я.Д., Иконникова А.В., Лapidus А.А. Совершенствование систем материально-технического снабжения на строительной площадке. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2023;4:58–74. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-772-4-58-74>

Ageeva YaD, Ikonnikova AV, Lapidus AA Improvement of Material and Technical Supply Systems at the Construction Site. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023;4:58–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-772-4-58-74>

5. Попкова А.А., Конев Ю.М., Канюков М.В. Комплексное развитие территорий: современное состояние и проблемы реализации. *Известия высших учебных заведений. Социология. Экономика. Политика*. 2023;16(2):38–53. <https://doi.org/10.31660/1993-1824-2023-2-38-53>

Popkova AA, Konev YuM, Kanyukov MV Integrated Development of Territories: Current State and Problems of Implementation. *News of Higher Educational Institutions. Sociology. Economics. Politics*. 2023;16(2):38–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/1993-1824-2023-2-38-53>

6. Lapidus A.A., Adamtsevich L.A. Digital transformation of life cycle management processes for residential and engineering infrastructure facilities in complex development of territories. *Real Estate: Economics, Management*. 2025;(2):6–12. <https://doi.org/10.22337/2073-8412-2025-2-6-12>

7. Muerza V., Guerlain C. Sustainable Construction Logistics in Urban Areas: A Framework for Assessing the Suitability of the Implementation of Construction Consolidation Centres. *Sustainability*. 2021;13(13):7349. <https://doi.org/10.3390/su13137349>

8. Saif W., RazaviAlavi S., Kassem M. Construction digital twin: a taxonomy and analysis of the application-technology-data triad. *Automation in Construction*. 2024;167:105715. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105715>

9. Bibri S.E., Krogstie J., Kärrholm M. Compact city planning and development: Emerging practices and strategies for achieving the goals of sustainability. *Developments in the Built Environment*. 2020;4:100021. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100021>

10. Buzasi A., Palvolgyi T., Cséte M.S. Assessment of climate change performance of urban development projects — Case of Budapest, Hungary. *Cities*. 2021;114:103215. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103215>

Об авторе:

Алиев Саламбек Алимбекович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектуры и дизайна Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова (364051, Российская Федерация, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100), [ResearcherID](#), [Scopus](#), [ORCID](#), asa-fenix@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Salambek A. Aliev, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Architecture and Design of the Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov (100 Isaev Ave., Grozny, 364051, Chechen Republic, Russian Federation), [ResearcherID](#), [Scopus](#), [ORCID](#), asa-fenix@mail.ru

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

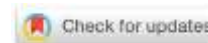
The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 12.04.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 26.04.2026

Принята к публикации / Accepted 10.05.2026

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION



УДК 69.059.4

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-56-65>

Корреляции поврежденности основных конструкций промышленных зданий от сроков их эксплуатации



EDN: LNFHGY

Д.А. Байбурина  , А.Н. Потапов 

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

 baiburinda@susu.ru

Аннотация

Введение. В известных исследованиях по теме статьи не указываются объемы выборки и типы цехов по их технологическим признакам, что не позволяет обобщить многочисленные данные о повреждениях. Недостатком ранее проведенных исследований является отсутствие обобщений с построением регрессионных зависимостей повреждаемости несущих элементов зданий от сроков их эксплуатации. Предметом исследования являются корреляции поврежденности основных конструкций промышленных зданий от сроков их эксплуатации. Для построения указанных зависимостей исследована значимая выборка цехов (не менее 100 цехов), и изучена частотность повреждений их основных конструкций. Частотность повреждений была изучена ранее и опубликована авторами. Целью настоящего исследования является построение корреляций между степенью поврежденности и сроками эксплуатации конструкций.

Материалы и методы. В качестве объектов исследования рассматривались одноэтажные промышленные здания металлургической, машиностроительной, энергетической отраслей, а также производства строительных материалов. Обследование цехов производилось по стандартным методикам, утвержденным в национальных стандартах и нормах. Для анализа дефектов и повреждений была создана электронная база в табличном процессоре, в которой фиксировалась вся основная информация по типам цехов, материалам и конструкциям, дефектам и повреждениям.

Результаты исследования. Анализ данных по большой выборке промышленных зданий позволил установить корреляции между поврежденностью и сроками эксплуатации конструкций. Установлено, что скорость повреждений стальных колонн больше, чем у железобетонных. Интенсивность повреждений стальных колонн описывается экспоненциальной зависимостью, а железобетонных — линейной. Кирпичные и железобетонные стены повреждаются по линейной зависимости от сроков эксплуатации. Зависимость «повреждаемость — сроки эксплуатации» железобетонных перекрытий и покрытий аппроксимируется полиномом второй степени, близким к линейной зависимости. Подобная линейная повреждаемость характерна и для стальных ферм. Повреждаемость стальных подкрановых балок прямо не зависит от сроков эксплуатации самого здания, так как балки заменяют по мере их повреждений.

Обсуждение и заключение. В результате исследования частотности повреждений были получены математические модели «поврежденность — срок эксплуатации» конструкций промышленных зданий, которые могут быть использованы для оптимизации технического обслуживания, планирования экспертиз, периодических осмотров, текущих и капитальных ремонтов зданий, разработки стратегии предприятий по замене основных производственных фондов. Отмечены отличительные особенности накопления со временем повреждений и дефектов для металлических каркасов промышленных зданий, связанные с человеческими ошибками. Для снижения аварийности и оптимизации затрат на протяжении жизненного здания предлагается применять риск-ориентированный подход, оценивать вероятность возникновения ошибок и стоимость восстановительных мероприятий на стадиях проектирования, возведения и эксплуатации.

Ключевые слова: промышленные здания, эксплуатация зданий, строительные аварии, дефекты и повреждения, надежность и безопасность

Для цитирования. Байбурин Д.А., Потапов А.Н. Корреляции поврежденности основных конструкций промышленных зданий от сроков их эксплуатации. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(2):56–65. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-56-65>

Original Empirical Research

Correlations of Damage to the Main Structures of Industrial Buildings from their Service Life

Denis A. Baiburin  , Alexander N. Potapov 

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

 baiburinda@susu.ru

Abstract

Introduction. Well-known studies on the research subject have failed to specify sample sizes and types of workshops based on their technological characteristics, which prevents us from summarizing the numerous damage data. The downside of the previous studies is the lack of generalizations with designing regression dependences of damage to the bearing elements of buildings on their service life. The subject of the study is the correlation of damage to the main structures of industrial buildings from their service life. In order to design these dependencies, a significant sample of workshops (at least 100 workshops) has been investigated and the frequency of damage to their main structures has been examined. The frequency of damage has been previously studied and published by the authors. The aim of the study is to establish correlations between the degree of damage and the service life of structures.

Materials and Methods. The objects of the study were single-storey industrial buildings of the metallurgical, machine-building, energy industries, as well as production of building materials. The workshops were inspected by means of the standard methods endorsed in the national standards and norms. In order to analyze defects and damages, an electronic database was designed in a tabular processor that recorded all the basic information on types of workshops, materials and structures, defects and damages.

Research Results. The analysis of data on a large sample of industrial buildings made it possible to establish correlations between damage and the service life of structures. It was found that the rate of damage to steel columns is higher than that of reinforced concrete columns. The intensity of damage to steel columns is described by means of an exponential dependence, while that of reinforced concrete columns is a linear one. Brick and reinforced concrete walls are damaged linearly depending on the service life. The dependence "damage - service life" of reinforced concrete floors and coatings is approximated by a polynomial of the second degree, close to a linear relationship. Similar linear damage is typical of steel trusses. The damage rate of steel crane beams does not directly depend on the service life of the building itself, as the beams are replaced if damaged.

Discussion and Conclusion. As a result of the study of the frequency of damage, mathematical models of "damage - service life" of industrial building structures were obtained that can be used in order to optimize maintenance and repairs of buildings. The distinctive features of the accumulation of damages and defects over time for metal frames of industrial buildings associated with human mistakes are noted. In order to reduce accidents and optimize costs throughout the life cycle of buildings, it is suggested that a risk-based approach is applied, the likelihood of errors and cost of restoration measures at the stages of design, construction and operation are assessed.

Keywords: industrial buildings, building maintenance, construction accidents, defects and damages, reliability and safety

For citation. Baiburin DA, Potapov AN Correlations of Damage to the Main Structures of Industrial Buildings from their Service Life. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):56–65. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-56-65>

Введение. По оценкам Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) [1] существует необходимость развития нормативной базы на основе обеспечения комплексной безопасности объектов на протяжении их полного жизненного цикла. Для этого необходимы научно-исследовательские работы, в том числе по изучению долговечности строительных материалов, конструкций и изделий, изучению живучести строительных объектов.

По данным исследований [2–4] причины дефектов и повреждений промышленных зданий: недостатки строительных работ — 28 %; нарушение правил эксплуатации — 26 %; низкое качество материалов — 28 %; ошибки проекта — 10 %; недостатки норм проектирования, правил изготовления и монтажа конструкций — 8 %. Наблюдаемая частота дефектов при монтаже стальных и железобетонных конструкций [5] подтверждает эти выводы. Количество дефектов в сопряжениях и узлах для стальных конструкций равно 56,5 %, железобетонных — 57,7 %.

По данным [2, 3] доля аварий, связанных со стадией эксплуатации, возросла с 11 до 35 %, что связано с износом основных фондов страны (зданий и сооружений промышленности и инфраструктуры). Эта тенденция особенно очевидна для промышленных зданий, для которых характерны большие пролеты и тяжелые режимы эксплуатации, связанные с наличием агрессивных сред, грузоподъемного оборудования, динамических нагрузок и пр.

К наиболее повторяемым следует отнести аварии покрытий производственных зданий. Анализ аварий показывает, что около 53 % всех обрушений происходит в результате перегрузки снегом и пылью [6]. По данным [7, 8] для главных корпусов теплоэлектростанций имеют место следующие повреждения стропильных ферм: местные погибы стержней — 28 %; износ антикоррозионного покрытия и коррозия металла — 23 %; общие изгибы стержней ферм — 24%; скопления агрессивной технологической пыли на конструкциях — 9 %; внеузловое опирание плит на верхний пояс ферм — 6 %.

Повреждаемость конструкций зависит от сроков эксплуатации [7, 8] (сравнение при 20 и 80 годах эксплуатации): железобетонных и стальных колонн — рост с 10 до 20 %; железобетонных и стальных подкрановых балок — с 10 до 70 %; стальных стропильных ферм — с 15 до 40 %; плит покрытия — с 20 до 60 %; второстепенных железобетонных балок площадок — с 15 до 80 %; главных железобетонных балок площадок — с 10 до 25 %.

Обнаружено закономерное снижение количества повреждений сверху вниз, начиная от плит покрытий и ферм до колонн, а также быстрый усталостный износ подкрановых балок. По данным [9] количество поврежденных подкрановых балок вырастает от 14 до 73 % при увеличении сроков эксплуатации с 3 до 22 лет. Наиболее частое повреждение балок — усталостные трещины в поясных швах верхнего пояса.

В исследованиях [10, 11] описаны типичные дефекты стальных колонн: изгибы и вырезы элементов решетки, локальные погибы и кривизна шатровой и подкрановых ветвей, разрушение мест креплений подкрановых балок, изменение типового конструктивного решения соединений. Наиболее частые повреждения используются в компьютерном моделировании для оценки степени эксплуатационной пригодности металлоконструкций промышленных зданий [12].

Авторы [13] выделили пять характерных зон дефектов и повреждений стен зданий. Предлагается объединять их по группам при проведении обследований или мониторинга состояния фасада. Это позволяет отслеживать динамику развития негативных процессов и своевременно проводить капитальный ремонт фасадов. В [14] проведен анализ повреждений с указанием их причин. Частота повреждений и дефектов определяется типами конструкций, значимостью дефектов, а также их причинами.

В исследовании [15] предлагаются способы повышения надежности каркасов промышленных зданий: повышение резерва прочности посредством увеличения сечений, прочности материалов, применения более эффективных сечений; использование статически неопределимых систем с перераспределением усилий в момент локальных разрушений; включение в работу связевых (несиловых) элементов.

Обзор показал, что повреждения промышленных зданий изучаются постоянно, но в исследованиях часто не указываются объемы выборки и типы цехов по их технологическим признакам, что не позволяет обобщить многочисленные данные. Недостатком ранее проведенных исследований является отсутствие обобщений с построением регрессионных зависимостей повреждаемости несущих элементов зданий от сроков их эксплуатации, что не позволяет обосновать и спланировать рациональную программу их эксплуатационного контроля.

Материалы и методы. Объектами исследований являлись 100 цехов — одноэтажные промышленные здания металлургической, машиностроительной, энергетической отраслей, а также производства строительных материалов. Годы ввода в эксплуатацию цехов варьировались от 1902 до 2016 гг.: 1902–1940 гг. — 10 объектов; 1941–1970 гг. — 61 объект; 1971–1990 гг. — 21 объект; 1991–2016 гг. — 9 объектов.

По конструктивной схеме исследованные здания подразделялись на каркасные, стеновые и каркасно-стеновые. По конструктивному исполнению и примененным материалам: полный железобетонный каркас; полный металлокаркас; смешанный каркас (железобетон и сталь); каменные несущие стены с различными вариантами покрытия.

Практически все обследованные здания имели грузоподъемное оборудование в виде мостовых кранов и кран-балок грузоподъемностью от 2 до 280 тонн с различными режимами работы: от ремонтных до тяжелых (от 1К до 8К). Степень агрессивности среды классифицировалась главным образом как неагрессивная либо слабоагрессивная.

В качестве однотипных групп обследованных конструкций рассматривались: фундаменты, колонны, стены, подкрановые балки и фермы, подстропильные и стропильные фермы, фонари, плиты перекрытий и покрытий, связи по колоннам и покрытию. В материальном исполнении указанные конструкции подразделялись на каменные (кирпич, шлакоблок, бут), железобетонные монолитные и сборные, стальные, деревянные. Кровля обследованных зданий в большинстве случаев была рулонной, реже — металлической.

Обследование цехов производилось по стандартным методикам, утвержденным в национальных стандартах и нормах. Согласно нормам ГОСТ 31937-2024 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» и СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» работы включали: определение геометрических параметров конструкций и узлов, их соответствия проектной и нормативной документации; освидетельствование выявленных дефектов и повреждений, выявление их причин; инструментальный контроль прочностных характеристик материалов; уточнение нагрузок на несущие конструкции; поверочные расчеты поврежденных (дефектных) несущих и ограждающих конструкций; определение их технического состояния; разработку рекомендаций по ремонту и усилению конструкций здания.

Для анализа дефектов и повреждений была создана электронная база, в которой фиксировалась информация: название объекта; конструктивный тип здания; год ввода в эксплуатацию и год обследования; краткое описание конструкции здания; характеристика грузоподъемного оборудования; агрессивность цеховой среды; тип конструкции, элемент и материал конструкции; проектная и фактическая прочность материала; вид и величина повреждения (дефекта); частота повреждения в виде отношения поврежденных элементов к общему числу элементов в здании; локализация и краткое описание повреждения; причина повреждения (дефекта); значимость дефектов по категориям А, Б и В; коэффициент снижения прочности поврежденного элемента; категория технического состояния конструкции; основная рекомендация по восстановлению.

Результаты исследования. Из данных рис. 1 следует, что по степени сохраняемости, характеризуемой частотой повреждений и категориями технического состояния, стальные и железобетонные конструкции превосходят каменные.

Это напрямую связано с однородностью материала, что влияет на его сопротивляемость и долговечность, а также с тем, что каменные стены больше подвержены атмосферной эрозии. Кроме того, быстрое повреждение антикоррозионной защиты металла при малой массивности сечений объясняет частый переход в ограниченно работоспособное состояние стальных конструкции (45,3 %). Конструкции кровли и деревянной крыши («другие» на рис. 1) очень часто переходят в ограниченно работоспособное и неработоспособное состояние (92,5 % повреждений) в виду относительной недолговечности применяемых материалов и интенсивного износа.

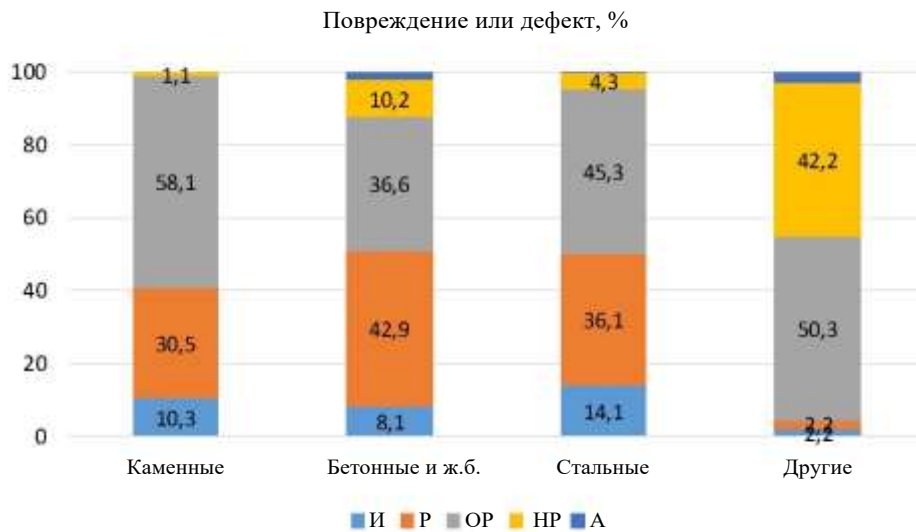


Рис. 1. Сравнение категорий технического состояния типов конструкций в %:

И — исправное; Р — работоспособное; ОР — ограниченно работоспособное; НР — неработоспособное; А — аварийное

Таким образом, наибольшая степень поврежденности наблюдается у конструкций, образующих оболочку здания: кровля и покрытие, наружные стены, а также конструкции, близко расположенные к оболочке. Исследования показали, что частота повреждений конструкций снижается в направлении «сверху-вниз»: кровля, покрытие, фермы, колонны и т.д.

Главными причинами повреждений являются протечки кровли и водосточков, износные явления (коррозия, увлажнение и размораживание, разрушение защитных покрытий и т.д.), а также воздействия технологии различных производств (крановые циклические нагрузки, случайные удары грузами и цеховым транспортом, вырезы элементов, агрессивная среда, скопления пыли и окалины и пр.).

Далее изложены результаты изучения зависимости повреждений от времени эксплуатации. Из графиков (рис. 2) видно, что железобетонные колонны повреждаются менее интенсивно, чем стальные. Через 60 лет эксплуатации оказываются поврежденными около 20 % железобетонных колонн и 30 % стальных. К 100 годам эксплуатации поврежденными будут практически все стальные колонны.

Более интенсивное повреждение стальных колонн связано, прежде всего, с коррозией металла (свыше 40 % поврежденных колонн). Интенсивность повреждений стальных колонн описывается экспоненциальной зависимостью (рис. 2). Достоверность аппроксимации при этом удовлетворительная: коэффициент детерминации $R^2 = 0,788$, коэффициент корреляции статистически значимый.

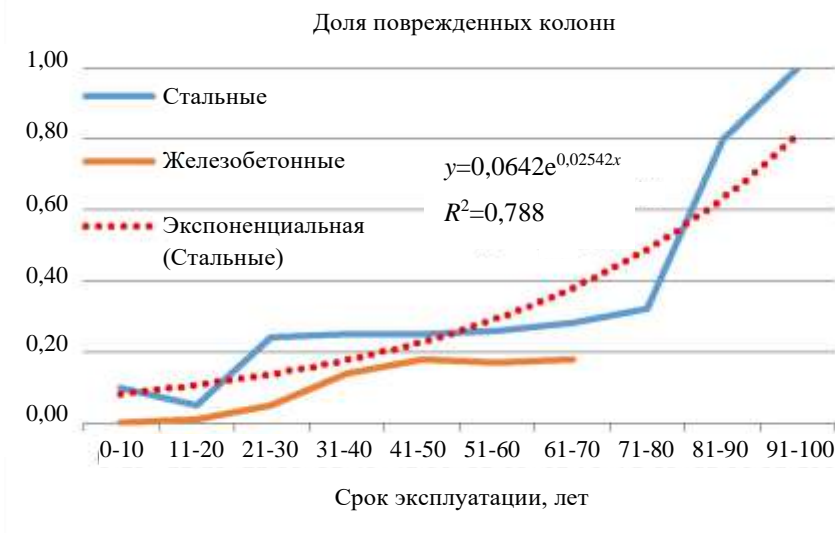


Рис. 2. Зависимость поврежденности колонн от сроков эксплуатации

Коэффициент детерминации рассчитывается как отношение суммы квадратов остатков регрессии к общей сумме квадратов:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

При значении $R^2 \geq 0,95$ точность аппроксимации высокая, при $0,8-0,95$ — удовлетворительная, при $0,6-0,8$ — слабая, а при $R^2 < 0,6$ — недостаточная.

Средняя ошибка аппроксимации — среднее относительное отклонение расчетных значений от фактических значений y_i :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100$$

При ошибке не более 10–15 % модель считается адекватной.

Кирпичные и железобетонные панельные стены повреждаются по линейной зависимости от сроков эксплуатации и примерно с равной интенсивностью 0,7 % в год (рис. 3). К 60-му году эксплуатации повреждаются около половины стен. Интенсивность повреждений кирпичных стен описывается линейной зависимостью. Достоверность аппроксимации при этом высокая ($R^2 = 0,967$).

Зависимость «повреждаемость — сроки» железобетонных перекрытий и покрытий аппроксимируется полиномом второй степени, близким к линейной зависимости 1 % в год (рис. 4). При этом значение коэффициента детерминации $R_2 = 0,95$ показывает высокую точность модели.

Более половины повреждений плит связано с замачиванием при протечках кровли и износом внутренних коммуникаций. К 50-ти годам эксплуатации поврежденными оказываются около 40 % плит, а к 100 годам — практически все плиты.

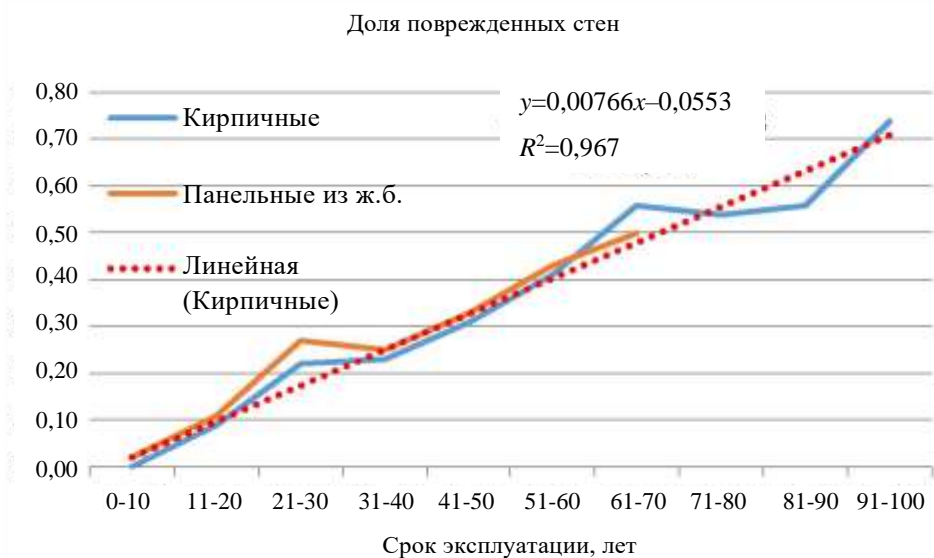


Рис. 3. Зависимость поврежденности стен от сроков эксплуатации

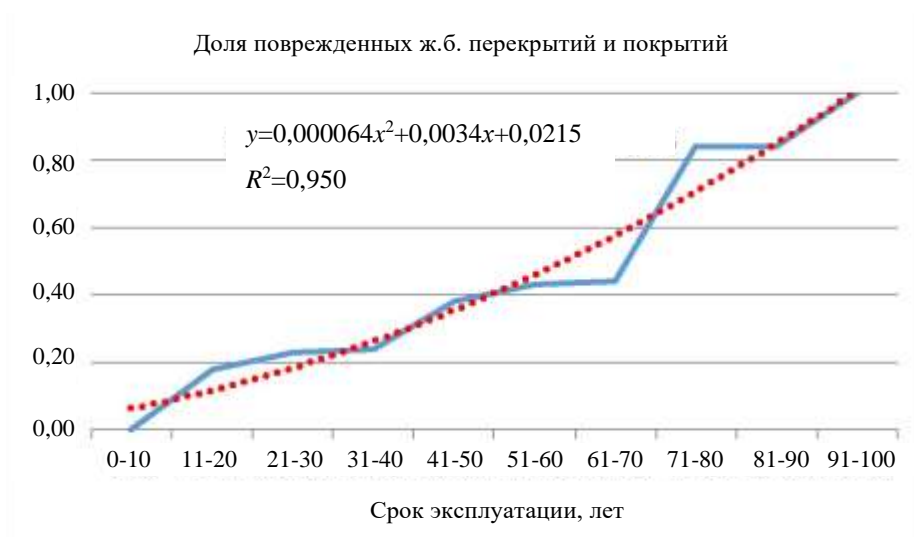


Рис. 4. Зависимость поврежденности перекрытий от сроков эксплуатации

Фактическая зависимость доли поврежденных стальных ферм (учитывая связи по фермам, но не учитывая коррозию) наилучшим образом моделируется линейной зависимостью (рис. 5). Значение коэффициента детерминации $R_2 = 0,939$ показывает высокую точность аппроксимации.

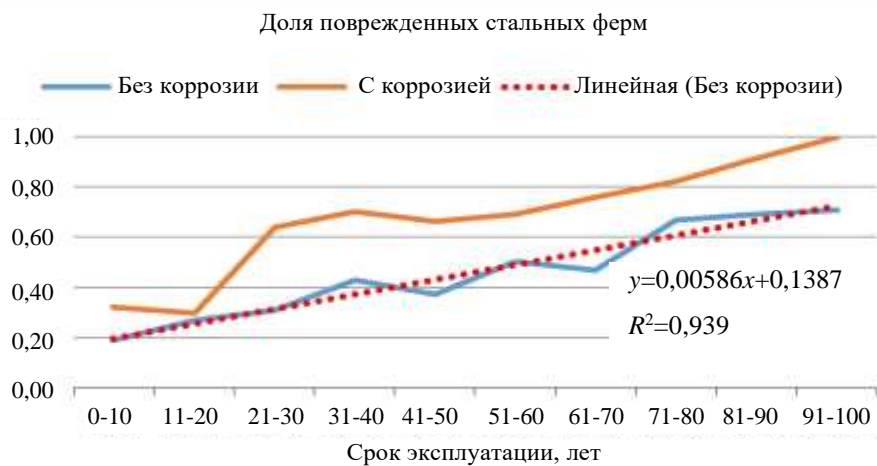


Рис. 5. Зависимость поврежденности стальных ферм от сроков эксплуатации

Как видим, если не учитывать коррозию, примерно половина стальных ферм повреждается к 55-ти годам эксплуатации. С учетом коррозионных повреждений к 50–60-ти годам эксплуатации будут повреждены 70 % стальных ферм, а к 100 годам — практически все фермы. Половина повреждений стальных ферм связана с коррозией при протечках кровли и водостоков. Местные погибы элементов имеют частоту 9,8 %, общий изгиб стержней — 5,9 %.

Из полученных зависимостей повреждаемости основных несущих конструкций (рис. 2–5) можно сделать вывод, что предельный срок эксплуатации производственных зданий составляет 70–80 лет. К этому сроку износ несущих конструкций достигает значений 60–70 %. За это время технология производства значительно прогрессирует, что чаще всего требует значительной модернизации производственных цехов.

Повреждаемость стальных подкрановых балок прямо не зависит от сроков эксплуатации самого здания, так как подкрановые балки являются самыми повреждаемыми конструкциями и подлежат периодической замене. Наиболее частыми повреждениями балок являются коррозия металла (25,7 %), расстройство креплений (19,6 %) и местные погибы полков и ребер жесткости (4,3 %).

После усреднения данных о повреждаемости по 10 годам (рис. 6) установлено, что балки менялись с периодичностью около 20 лет.

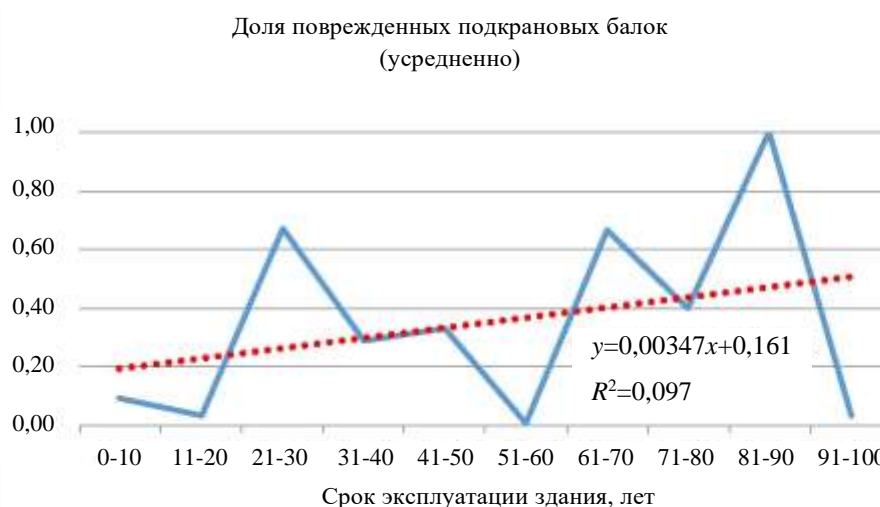


Рис. 6. Зависимость усредненной поврежденности подкрановых балок от сроков эксплуатации здания (с учетом замены)

Из ломаного графика следует, что минимальные значения поврежденности соответствуют 20, 40, 60, 80 годам эксплуатации зданий. Временной тренд показывает, что с увеличением сроков эксплуатации интенсивность повреждений подкрановых балок возрастает, что, вероятно, связано со снижением общей жесткости каркаса со временем [8, 16].

Такая периодичность замены балок подтверждается исследованиями [17, 18], в которых было установлено появление трещин в первые 20 лет эксплуатации балок. При эксплуатации 25–50 лет количество балок с трещинами увеличивается до четверти. При подстановке в линейную модель (рис. 6) времени эксплуатации 25 лет получим повреждаемость подкрановых балок 24,8 %, что практически совпадает с данными [17].

Анализ показал, что срок эксплуатации подкрановых балок можно разбить на условно-постоянные временные периоды: при эксплуатации до 25 лет средняя повреждаемость балок достигает 30 %, следствием чего является выполнение ремонтно-восстановительных работ, приводящих к снижению количества поврежденных конструкций в два раза [6]. Как видно из графика, такие условно-постоянные временные периоды составляют около 20 лет. Вместе с тем при интенсивной работе кранов периоды ремонта и замены подкрановых балок сокращаются до 5–10 лет [9].

Обсуждение и заключение. Результаты исследования корреляций поврежденности и сроков эксплуатации основываются на ранее проведенных и опубликованных авторских исследованиях частотности повреждений конструкций промышленных зданий [14]. Скорость повреждений стальных колонн промышленных зданий больше, чем у железобетонных. Интенсивность повреждений стальных колонн описывается экспоненциальной зависимостью, а железобетонных — линейной. Зависимость «повреждаемость — сроки эксплуатации» железобетонных перекрытий и покрытий аппроксимируется полиномом второй степени, близким к линейной зависимости 1 % в год. Такая же линейная повреждаемость характерна и для стальных ферм. Кирпичные и железобетонные стены

повреждаются по линейной зависимости от сроков эксплуатации и примерно с равной интенсивностью — 0,7 % в год. Подкрановые балки являются самыми повреждаемыми конструкциями каркаса и подлежат периодической замене усредненно через 20 лет эксплуатации (конкретная периодичность зависит от режима работы кранов). Повреждаемость подкрановых балок прямо не зависит от сроков эксплуатации самого здания. Временной тренд показал, что с увеличением сроков эксплуатации здания интенсивность повреждений подкрановых балок возрастает, что, вероятно, связано со снижением со временем общей жесткости каркаса и износом грузоподъемного оборудования.

По результатам исследования выборки промышленных зданий установлены неявные особенности накопления повреждаемости. Так для получивших распространение стальных колонн и ферм покрытия, в сравнении железобетонными, отмечено наличие дефектов и повреждений уже на начальном этапе эксплуатации. Поврежденность на интервале периода эксплуатации от 0 до 10 лет для колонн составляет 10 % от общего количества колонн, поврежденность ферм покрытия составляет 19–32% от общего количества ферм. Более того, поврежденность стальных колонн зданий в возрасте до 10 лет оказалась больше, чем для зданий эксплуатируемых 10–20 лет. Очевидно, что наличие дефектов и повреждений на начальном этапе эксплуатации связано ошибками исполнителей при выполнении СМР и приемочного контроля. Металлические конструкции на стадиях складирования, монтажа и при устройстве инженерных систем получают повреждения и накапливают дефекты (погибы полок, повреждения защитной грунтовки, огнезащиты, дефекты болтовых и сварных соединений), не устраняемые своевременно до ввода объекта в эксплуатацию. Анализом обследований и экспертиз отмечено влияние качества устройства фундаментов под колонны на каркас здания — отклонения приводят к нестыковкам отверстий, зазорам в соединяемых элементах металлического каркаса, появляющиеся на стадии сборки ввиду отсутствия разработанных в составе ПД рекомендаций по их устранению, отсутствия дополнительных плоских и клиновидных прокладок и удлиненных болтов в составе нормоконплектов.

Для увеличения срока безопасной эксплуатации и интервалов между ремонтами для вновь возводимых промышленных зданий с металлическим каркасом необходимо заблаговременно проектом или в рамках сопровождения предусматривать меры по снижению количества дефектов и повреждений. Целесообразно применять риск-ориентированный подход к определению таких мер, учитывающий прогнозируемую вероятность возникновения ошибок исполнителей, частотность дефектов и повреждений и стоимость восстановительных мероприятий [19].

В результате исследования частотности повреждений были получены математические модели «поврежденность — срок эксплуатации», которые могут быть использованы для оптимизации технического обслуживания, планирования экспертиз, периодических осмотров, текущих и капитальных ремонтов зданий, разработки стратегии предприятий по замене основных производственных фондов.

Список литературы/ References

1. Травуш В.И., Гурьев В.В., Дмитриев А.Н., Дорофеев В.М., Волков Ю.С. О концепции развития нормативно-технической базы строительных объектов в период их эксплуатации. *Academia. Архитектура и строительство*. 2021;1:121–133. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2021-1-121-133>
- Travush VI, Guriev VV, Dmitriev AN, Dorofeev VN, Volkov YuS. On the Concept of Development of the Regulatory and Technical Base of Construction Objects during their Operation. *Academia. Architecture and Construction*. 2021;(1):121–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2021-1-121-133>
2. Махутов Н.А., Лобов О.И., Ерёмин К.И. *Безопасность России. Безопасность строительного комплекса*. М.: Знание; 2012. 798 с.
- Mahutov NA, Lobov OI, Eremin KI *Safety of Russia. Construction Industry Safety*. Moscow: MGOF Znanie 2012. 798 p. (In Russ.)
3. Ерёмин К.И. (ред.) *Предотвращение аварий зданий и сооружений*. Вып. 7. М.: МДП; 2008. 360 с.
- Eryomin KI (ed.) *Prevention of Accidents of Buildings and Structures. Issue 7*. Moscow: MDP; 2008. 360 p. (In Russ.)
4. Ерёмин К.И. (ред.) *Предотвращение аварий зданий и сооружений*. Вып. 8. М.: МДП; 2009. 580 с.
- Eryomin KI (ed.) *Prevention of Accidents of Buildings and Structures. Issue 8*. Moscow: MDP; 2009. 580 p. (In Russ.)
5. Перельмутер А.В. *Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций*. М.: АСВ; 2007. 256 с.
- Perel'muter AV *Problems of Reliability and Safety of Buildings*. М.: ASV; 2007. 256 с. (In Russ.)
6. Коротеев Д.В., Новак А.П. *Предупреждение характерных аварий и несчастных случаев в строительстве*. М.: Стройиздат; 1974. 263 с.
- Koroteev DV *Prevention of Typical Accidents and Incidents in Construction*. Moscow: Stroyizdat; 1974. 263 p. (In Russ.)
7. Алексеева Е.Л. *Оценка технического состояния строительных конструкций на основе закономерностей повреждаемости главных корпусов предприятий теплоэнергетики*. Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: МГСУ; 2012. 20 с.

Alekseeva EL *Building Structures Technical Assessment Based on the Characteristics of Damage to the Main Buildings of Thermal Power Plants*. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Moscow: MSUCE; 2012. 20 p. (In Russ.)

8. Ерёмин К.И. (ред.) *Предотвращение аварий зданий и сооружений*. Вып. 9. М.: МДП; 2009. 704 с.

Eryomin KI (ed.) *Prevention of Accidents of Buildings and Structures. Issue 9*. Moscow: MDP; 2009. 704 p. (In Russ.)

9. Кикин А.И., Васильев А.А., Кошутин Б.Н., Уваров Б.Ю. *Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий*. М.: Стройиздат, 1984. 303 с.

Kikin AI, Vasil'yev AA, Koshchitin BN *Increasing the Durability of Steel Structures of Industrial Buildings*. Moscow: Stroyizdat, 1984. 303 p. (In Russ.)

10. Krahmalny T.A., Evtushenko S.I. Damage to the Vertical Braces of Industrial Buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1079(5):052086. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/5/052086>

11. Евтушенко С.И., Крахмальный Т.А. Дефекты и повреждения металлических колонн производственных зданий. *Строительство и архитектура*. 2021;9(2):11–15. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2021-9-2-11-15>

Evtushenko SI, Krahmalnyu TA Defects and Damages of Metal Columns of Industrial Buildings. *Construction and Architecture*. 2021;9(2):11–15 (In Russ.) <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2021-9-2-11-15>

12. Buzalo N., Gontarenko I., Chernikhovski B. Force resistance of steel columns of industrial buildings with corrosion damage. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;896(1):012044 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012044>

13. Krahmalny T.A., Evtushenko S.I. Typical defects and damage to the industrial buildings' facades. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;775(1):012135 <http://doi.org/10.1088/1757-899X/775/1/012135>

14. Байбурин Д.А., Тупицына Д.С. Частотность дефектов и повреждений промышленных зданий. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. 2022;22(1):23–32. <https://vestnik.susu.ru/building/article/view/11753> (дата обращения: 08.04.2026).

Bayburin D.A., Tupitsyna D.S. Frequency of Defects and Damages of Industrial Buildings. *Bulletin of South Ural State University. Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2022;22(1):23–32. (in Russ.) URL: <https://vestnik.susu.ru/building/article/view/11753> (accessed: 08.04.2026).

15. Веселов В.В., Абу-Хасан М.С. Повреждаемость и резервы несущей способности каркасов промышленных зданий. *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2022;1051(3):56–58. URL: <http://bstmag.ru/archive/view?id=265> (дата обращения: 08.04.2026).

Veselov VV, Abu-Hasan VS Damageability and Bearing Capacity Reserves of Industrial Building Frames. *Construction Technics Bulletin*. 2022;1051(3):56–58. (In Russ.) URL: <http://bstmag.ru/archive/view?id=265> (accessed: 08.04.2026)

16. Шишов К.А. Промышленные сооружения В.Г. Шухова на Урале. В кн.: *Металлические конструкции академика В.Г. Шухова*. М.: Наука; 1990. 112 с.

Shishov KA, Shuhov's VG Industrial Constructions of Ural. *Steel Constructions of Academic V.G. Shuhov*. Moscow: Nauka; 1990. 112 p. (In Russ.)

17. Ерёмин К.И. (ред.) *Особенности эксплуатации металлических конструкций промышленных зданий*. М.: МГСУ; 2012. 248 с.

Eryomin KI (ed.) *Steel Structures of Industrial Buildings Operation Features*. Moscow: MSUCE; 2012. 248 p. (In Russ.)

18. Ерёмин К.И., Кунин Ю.С., Матвеюшкин С.А., Алексеева Е.Л. *Атлас дефектов и повреждений эксплуатируемых строительных конструкций*. Магнитогорск: ВЕЛД; 2010. 162 с.

Eryomin KI, Kunin YuS, Matveyushkin SA, Alekseyeva EL *Atlas of Defects and Damages of Exploited Building Structures: Educational and Methodical Manual*. Magnitogorsk: VELD; 2010. 162 p. (In Russ.)

19. Байбурин Д.А., Потапов А.Н. Риск-ориентированный метод обследования технического состояния промышленных зданий. *Известия вузов. Строительство*. 2026;(3);112–127. <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2026-807-3-112-127>

Baiburin DA, Potapov NA Risk-Based Technical Condition Inspection Method for the Industrial Buildings. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2026;(3);112–127. (In Russ.) <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2026-807-3-112-127>

Об авторах:

Байбурин Денис Альбертович, старший преподаватель кафедры строительного производства и теории сооружений Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), baiburinda@susu.ru

Потапов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного производства и теории сооружений Южно-Уральского государственного университета (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), potapovan@susu.ru

Заявленный вклад соавторов:

Д.А. Байбурин: поиск и анализ литературы, разработка цели и задачи исследования, подготовка и обработка статистического материала, подготовка основного текста, формирование выводов.

А.Н. Потапов: научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Denis A. Baiburin, Senior Lecturer of the Department of Building Technologies and Structural Engineering, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), baiburinda@susu.ru

Alexander N. Potapov, D.Sc.(Eng.), Professor, Professor of the Department of Building Technologies and Structural Engineering, South Ural State University (76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), potapovan@susu.ru

Claimed contributorship:

DA Baiburin: search and analysis of the literature, development of the aims of the research, preparation and processing of the statistical material, preparation of the main manuscript, formation of the conclusions.

AN Potapov: scientific supervision, 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 09.04.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 29.04.2026

Принята к публикации / Accepted 18.05.2026

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 666.972

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-66-72>

Оригинальное эмпирическое исследование

Инновационная технология приготовления бетонных смесей

Е.А. Шляхова  

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

 shlyahovae@list.ru



EDN: SOAUYF

Аннотация

Введение. В статье на примере производства дорожного бетона в Ростовской области рассмотрены вопросы повышения эффективности технологии приготовления бетонных смесей, обеспечивающей нормативные показатели физико-механических свойств бетона без увеличения расхода цемента и дополнительных затрат на реконструкцию действующих предприятий строительной индустрии.

Цель проведенных исследований — разработка эффективных рецептурно-технологических мероприятий, обеспечивающих нормативные требования к прочностным показателям бетона, изготавливаемого на основе местной сырьевой базы без технического перевооружения действующих бетоносмесительных заводов.

Материалы и методы. Для достижения поставленной в работе цели при проведении экспериментальных исследований использована местная сырьевая база, доступная для широкого применения на предприятиях строительной индустрии. Исследования, направленные на разработку рецептурно-технологических мероприятий по повышению эффективности производства исследуемого дорожного бетона, выполнены с применением стандартных методик оценки нормируемых показателей свойств сходных материалов, бетонных смесей и затвердевшего бетона. Для оптимизации параметров разработанных рецептурно-технологических решений применены методы математического моделирования исследуемой стохастической системы на основе теории планирования эксперимента.

Результаты исследования. Разработанная инновационная технология приготовления бетонных смесей обеспечивает возможность на 15–20 % повысить прочностные показатели исследуемого бетона, либо на 10–12 % уменьшить расход цемента без снижения прочности получаемого материала.

Полученные результаты достигнуты за счет разработки комплекса рецептурно-технологических мероприятий, включающего введение в бетонную смесь предложенного карбонатного микронаполнителя и поликарбоксилатного суперпластификатора в сочетании с разработанным двухстадийным способом приготовления бетонной смеси.

Обсуждение и заключение. Инновационная новизна разработанной технологии приготовления бетонных смесей защищена патентом на изобретение. Полученные результаты достигнуты за счет совместного введения в бетонную смесь разработанного микронаполнителя на основе известняка-ракушечника и суперпластификатора ST 5.0 в сочетании с инновационной двухстадийной технологией приготовления бетонной смеси.

Исходя из общетеоретического представления о структурообразовании цементных бетонов и формировании их прочностных свойств, можно распространить результаты данных исследований на производство широкого круга монолитных и сборных изделий и конструкций, которые должны удовлетворять нормативным требованиям по прочности не только на сжатие, но и на растяжение. Естественно, в каждом конкретном случае потребуются дополнительные исследования с учетом специфики региональной сырьевой базы и специфики того или иного предприятия строительной индустрии и номенклатуры выпускаемой продукции.

Ключевые слова: дорожный бетон, технология приготовления бетонной смеси, карбонатный микронаполнитель, суперпластификатор

Для цитирования. Шляхова Е.А. Инновационная технология приготовления бетонных смесей. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2026;5(2):66–72. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-66-72>

Innovative Technology of Preparation of Concrete Mixtures

Elena A. Shlyakhova  

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

 shlyahovae@list.ru

Abstract

Introduction. Using the example of the production of road concrete in the Rostov region, the article looks at the issues of increasing the efficiency of the technology for preparation of concrete mixtures to ensure the normative indicators of the physical and mechanical properties of concrete without increasing cement consumption and additional costs for reconstruction of existing enterprises in the construction industry.

The aim of the study is to develop a set of prescription and technological measures to ensure regulatory requirements for strength characteristics of concrete produced with the use of local raw materials with no technical re-equipment of existing concrete mixing plants.

Materials and Methods. To this end, while conducting the experimental research, a local raw material base was used that is widely available in the construction industry. The study aimed at developing prescription and technological measures for improving the production efficiency of the road concrete under study was performed using standard methods for assessing the normalized properties of similar materials, concrete mixtures and hardened concrete. In order to optimize the parameters of the developed formulation and technological solutions, mathematical modeling methods of the stochastic system under study based on the theory of experimental planning were applied.

Research Results. The developed innovative technology for preparing concrete mixtures enables an increase in the strength of the concrete under study by 15–20%, or reduce cement consumption by 10–12% without a reduction in the strength of the resulting material.

The results were achieved by means of developing a set of prescription and technological measures including introduction of the suggested carbonate micronutrient and polycarboxylate superplasticizer into the concrete mixture in combination with the developed two-stage method for preparing the concrete mixture.

Discussion and Conclusion. The novelty of the developed technology for preparing concrete mixtures is protected by an invention patent. The results were achieved by means of the combined introduction of the developed limestone-shell filler and superplasticizer ST 5.0 into the concrete mixture in combination with an innovative two-stage technology for preparing concrete mixtures.

Based on the general theoretical understanding of the structure formation of cement concretes as well as of their strength properties, it is possible to extend the results of these studies to production of a broad range of monolithic and prefabricated products as well as structures that are to comply with the regulatory requirements for not only compressive strength, but also for tensile strength. Naturally, in each specific case, additional research will be required that would take into consideration the specifics of the regional raw material base as well as the specifics of a particular enterprise in the construction industry and its product range.

Keywords: road cement concrete, technology of concrete mix preparation, carbonate microfiller, superplasticizer

For citation. Shlyakhova EA Innovative Technology of Preparation of Concrete Mixtures. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):66–72. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-66-72>

Введение. В статье применительно к условиям производства дорожного бетона рассмотрены актуальные вопросы повышения эффективности технологии приготовления бетонных смесей, обеспечивающей нормативные показатели физико-механических свойств бетона без увеличения расхода цемента и инвестиционных затрат на реновацию действующих предприятий стройиндустрии. Актуальность рассматриваемых вопросов обусловлена тем, что бетонные дорожные покрытия находят все более широкое применение в большинстве развитых стран мира. Эта тенденция обусловлена ежегодным увеличением количества автотранспортных средств на дорожном полотне, повышением их грузоподъемности и скоростного режима грузопотоков на автомагистралях.

С учетом изложенного вопросы качества исходных материалов для получения дорожного бетона с надлежащими физико-механическими свойствами приобретают особую остроту [1].

Вместе с тем во многих регионах преобладают месторождения мелких песков, использование которых в составе бетона обуславливает повышенный расход цемента. В результате многочисленных предшествующих исследований [2–5] разработаны способы снижения расхода цемента в бетонах на мелких песках за счет введения в бетонную смесь микронаполнителей, таких как тонкоизмельченный песок, молотые металлургические шлаки

и другие природные или техногенные минеральные компоненты. Однако процесс помола указанного сырья для получения микронаполнителя является весьма энергоемким, что удорожает в конечном счете стоимость бетона.

Известны также способы снижения расхода цемента за счет интенсификации процесса перемешивания бетонной смеси [6–9], однако эти способы требуют замены в большинстве случаев существующих бетоносмесителей на высокоскоростные, что требует больших инвестиционных затрат.

Целью данных исследований была поставлена разработка комплексных рецептурно-технологических решений, которые обеспечивают производство бетонных смесей для дорожного бетона на действующих предприятиях строительной индустрии без необходимости дополнительных инвестиций на их модернизацию и техническое перевооружение, а также без увеличения расхода цемента.

На основе анализа предшествующих исследований [10–15] была выдвинута рабочая гипотеза о том, что достижение поставленной цели возможно за счет использования в составе дорожного бетона добавки микронаполнителя в сочетании с оптимизацией способа приготовления бетонной смеси для дорожного бетона на действующих бетоносмесительных заводах. В этой связи при проведении исследований поэтапно решались задачи:

1. Выбор модифицирующих добавок отечественного производства в бетонную смесь.
2. Изыскание эффективного микронаполнителя на основе местной сырьевой базы.
3. Разработка инновационной технологии приготовления бетонных смесей без технического перевооружения действующих бетоносмесительных узлов.

Материалы и методы. В качестве объекта исследований был принят дорожный бетон проектного класса по прочности на сжатие В35 и на растяжение при изгибе В_{из} 4.0.

При проведении исследований использовали следующие материалы.

В качестве вяжущего применяли портландцемент производства АО «Себряковцемент» ЦЕМ I 42,5 Н с нормальной плотностью НГ равной 26,75 и фактической активностью в возрасте 2 суток 29,2 МПа, в возрасте 28 суток — 54,8 МПа.

В качестве крупного заполнителя для изготовления исследуемого дорожного бетона использовали щебень из песчаника с размерами фракции 5–20 мм производства ООО «Донской камень», соответствующий требованиям ГОСТ 26633-2015.

Нормативными документами для дорожного бетона рекомендуется использовать пески с модулем крупности $M_k = 1,5–3,0$. В Ростовской области песков с высоким модулем не производят. Доставка же таких песков из других регионов приводит к значительному удорожанию бетонных смесей. Наиболее подходящим по характеристикам из местных песков является песок Каяльского карьера с M_k равным 1,57, который и был использован в качестве мелкого заполнителя.

Для пластификации бетонной смеси на основе априорной информации был выбран суперпластификатор на поликарбоксилатной основе ST 5.0 производства ООО «БСР», г. Санкт-Петербург. По информации производителя, указанный суперпластификатор характеризуется данными, представленными в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика добавки ST 5.0

Показатели, единицы измерения	Значения
Внешний вид	Жидкость коричневого цвета
Запах	Слабый
Общее содержание твердой фазы, %	25
Плотность раствора, г/см ³	1,070 ± 0,03
Значение pH (неразбавленный продукт)	9 ± 1,5

Разрабатываемый микронаполнитель для исследуемого дорожного бетона получали на основе понтического известняка-ракушечника Каменского месторождения Ростовской области, измельченного до порошкообразного состояния.

Исходный известняк-ракушечник представляет собой горную породу желто-бурого цвета, состоящую в основном из слабосцементированных обломков ракушек различной крупности. Содержание карбоната кальция в породе находится в пределах 87–97 %. Средняя плотность кусков породы — в диапазоне 1,5–2,2 т/м³ в зависимости от глубины залегания. Прочность при сжатии — до 25 МПа, пористость породы — 15–40 % по объему.

Методические исследования, направленные на достижение поставленной цели, проводили поэтапно в соответствии с рабочей гипотезой и выдвинутыми задачами исследования. При этом сочетали использование стандартных методов определения нормируемых свойств исходных материалов, характеристики получаемых бетонных смесей и прочностных показателей затвердевшего бетона с математическими методами теории планирования эксперимента, полиномиального моделирования и интерпретации получаемых функций отклика.



Рис. 1. Внешний вид известняка-ракушечника

На первом этапе экспериментальных исследований изучали влияние степени измельчения порошкообразного известняка-ракушечника и его содержания в смеси на прочностные свойства растворной части бетона. Опыты проводили на цементно-песчаных образцах — балочках размером $40 \times 40 \times 160$ мм, вещественные составы которых моделировали растворную часть исследуемого бетона.

После твердения образцов в нормальных условиях в возрасте 28 суток их подвергали прочностным испытаниям общепринятыми методами на изгиб и сжатие.

По результатам прочностных испытаний и соответствующей математической обработки опытных данных методами теории планирования эксперимента [16] получали полиномиальные модели, адекватно на 5 %-ном уровне значимости описывающие изучаемые зависимости, по которым были установлены рациональные диапазоны дозирования получаемого карбонатного микронаполнителя на основе измельченного известняка-ракушечника.

На втором этапе исследований, с учетом полученных на первом этапе результатов, для оптимизации технологических параметров приготовления бетонных смесей эксперименты проводили на бетонных образцах-призмах размером $100 \times 100 \times 400$ мм, которые в заданные сроки подвергали испытаниям стандартными методами определения прочности исследуемого бетона на сжатие и растяжение при изгибе.

Результаты исследования. На первом этапе исследования, проведенного на цементно-песчаном растворе при соотношении Ц:П = 1:1,7, соответствующем растворной части изучаемого дорожного бетона, с использованием методов теории планирования эксперимента получены квадратичные полиномиальные модели влияния степени измельчения карбонатного микронаполнителя и его количественного содержания в смеси на показатели прочности при изгибе и сжатии получаемого материала. В результате интерпретации полученных моделей установлено, что оптимальная дозировка изучаемого микронаполнителя находится в пределах $60\text{--}100$ кг/м³ при измельчении исходного известняка-ракушечника до удельной поверхности не ниже 2000 см²/г.

В результате дальнейших исследований разработана инновационная двухстадийная технология приготовления бетонных смесей с микронаполнителем на основе известняка-ракушечника. Приоритетная новизна данной разработки защищена патентом РФ на изобретение [17].

Сущность разработанной двухстадийной технологии заключается в следующем. На первой стадии приготовления бетонной смеси в бетоносмеситель загружали мелкий и крупный заполнитель, а также микронаполнитель в заданных дозировках.

Указанные компоненты перемешивали в сухом состоянии до получения однородной сухой смеси.

На второй стадии к полученной сухой смеси добавляли портландцемент, воду, а также суперпластификатор, после чего перемешивали все компоненты до получения бетонной смеси требуемой удобоукладываемости.

В качестве исходного был принят состав бетонной смеси с расходом портландцемента 420 кг/м³ при следующем соотношении между компонентами (по массе) Ц:П:Щ = 1:1,69:2,71.

Расход добавки суперпластификатора ST 5.0 (водный раствор 25 %-ной концентрации) составлял 1 % от массы портландцемента. Расход добавки микронаполнителя варьировали от 40 до 120 кг/м³ и вводили в смесь за счет соответствующего сокращения расхода песка. Количество воды затворения в каждом случае подбирали из условия получения равноподвижных смесей марки П2 (5–9 см).

Составы бетонных смесей, способы их приготовления и результаты прочностных испытаний бетона в возрасте 28 суток нормального твердения представлены в таблице 2.

Таблица 2

Составы бетонных смесей, технология их приготовления и прочность бетона в возрасте 28 суток нормального твердения

№ опыта	Способ приготовления смеси	Расход материалов, кг/м ³						Прочность бетона, МПа	
		цемент	вода	щебень	песок	ST 5.0	микро-наполнитель	R _{изг}	R _{сж}
1	Одностадийный	420	168	1140	710	4,2	0	5,1	45,2
2	Двухстадийный	420	172	1140	650	4,2	60	6,0	51,8
3		420	174	1140	630	4,2	80	6,3	53,9
4		420	176	1140	610	4,2	100	5,8	49,7
5	Двухстадийный со сниженным расходом цемента	370	170	1140	680	3,7	80	5,2	45,6

В результате проведенных исследований установлено, что разработанная инновационная технология приготовления бетонных смесей повышает прочность бетона на 15–20 % (составы №№ 2, 3, 4) или позволяет на 12 % снизить расход цемента (состав № 5) по сравнению с одностадийной технологией (состав № 1) без ухудшения прочностных свойств дорожного бетона. Наглядно эти результаты представлены на рис. 2.

Способы приготовления бетонной смеси

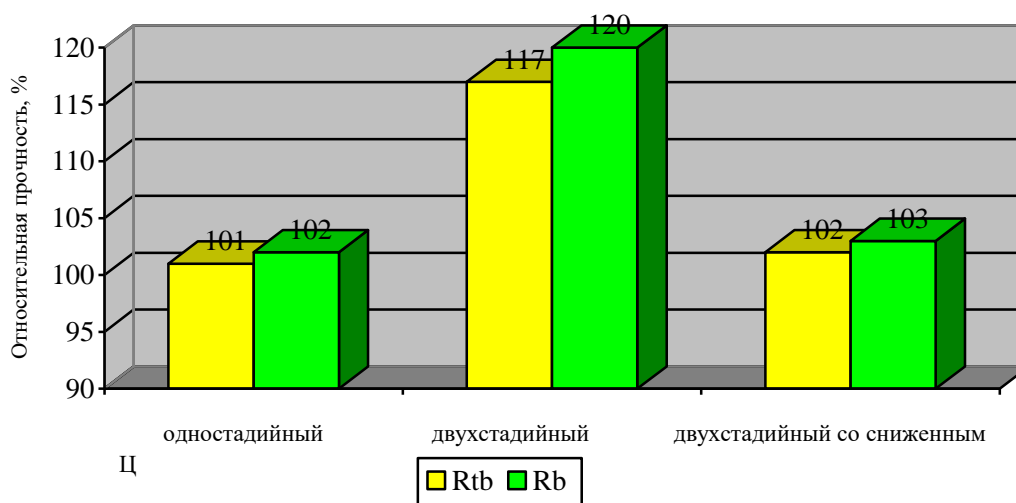


Рис. 2. Зависимость прочностных показателей бетона от технологии приготовления бетонной смеси

Обсуждение и заключение. Полученные результаты проведенных исследований обеспечивают получение бетонов для дорожных покрытий, отвечающих нормативным требованиям к их прочностным показателям, без дополнительных затрат на техническое перевооружение действующих бетоносмесительных узлов и на основе местной сырьевой базы.

Результаты достигнуты за счет совместного применения разработанного на основе измельченного известняка-ракушечника микронаполнителя и суперпластификатора ST 5.0 в сочетании с инновационной двухстадийной технологией приготовления бетонной смеси.

Разработанная в соответствии с поставленной целью исследований инновационная технология изготовления бетонных смесей для дорожного бетона позволяет на действующих предприятиях стройиндустрии без дополнительных затрат на реконструкцию и техническое перевооружение снизить расход цемента, уменьшить расход суперпластификатора без ухудшения качества продукции.

Предложенный комплекс рецептурно-технологических мероприятий повышения эффективности технологии производства бетонных смесей может быть распространен на массовое изготовление бетонных смесей общестроительного назначения. При этом для внедрения в производство требуется корректировка рецептурно-технологических решений с учетом требований к продукции, местной сырьевой базы и специфики действующего предприятия. Корректировка может выполняться силами и средствами заводской лаборатории.

Список литературы/References

1. Быков Д.Н., Хомкалов Г.В. Рынок строительных материалов в условиях конкуренции. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2018;8(3):26–31. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2018-3-26-31>
Bykov DN, Khomkalov GV Building Materials Market under Competitive Conditions. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate*. 2018;8(3):26–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2018-3-26-31>
2. Тольпина Н.М., Хахалева Е.Н., Данилов Д.Ю., Чашин Д.Ю. Влияние микронаполнителей на эффективность суперпластификаторов и прочность бетонов с низким содержанием цемента. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2023;8:8–15. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2023-8-8-8-15>
Tolypina NM, Nahaleva EN, Danilov DYu, Chashin DYu The Effect of Micro-Fillers on the Effectiveness of Superplasticizers and the Strength of Low-Cement Concretes. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2023;8:8–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2023-8-8-8-15>
3. Тараканов О.В., Фишер Х.Б. Принципы получения высокопрочных бетонов с использованием местных сырьевых ресурсов. *Эксперт: теория и практика*. 2024;3(26):112–117. https://doi.org/10.51608/26867818_2024_3_112
Tarakanov OV, Fischer HB Principles of Obtaining High-Strength Concrete Using Local Raw Materials. *Expert: Theory and Practice*. 2024;3(26):112–117. (In Russ.) https://doi.org/10.51608/26867818_2024_3_112
4. Тараканов О.В., Иващенко Ю.Г., Ерофеева И.В. Влияние карбонатных минеральных добавок на формирование микроструктуры и прочность минеральных вяжущих веществ. *Региональная архитектура и строительство*. 2024;1(58):47–58. https://doi.org/10.54734/20722958_2024_1_47
Tarakanov OV, Ivashchenko YuG, Erofeeva IV Influence of Carbonate Mineral Additives on the Formation of Microstructure and Strength of Mineral Binders. *Regional Architecture and Construction*. 2024;1(58):47–58. (In Russ.) https://doi.org/10.54734/20722958_2024_1_47
5. Саламанова М.Ш., Муртазаев С.А.Ю., Бисултанов Р.Г., Муртазаев И.С.А. Регулирование свойств строительных композитов различными минеральными наполнителями. *Вестник КНИИ РАН. Серия: Естественные и технические науки*. 2024;2(17):94–109. <https://doi.org/10.34824/VKNIIRAN.2024.17.2.007>
Salamanova MSh, Murtazaev SAYu, Bisultanov RG, Murtazaev ISA Regulation of the Properties of Building Composites by Various Mineral Fillers. *Bulletin of the KNIIRAS. Series: Natural and Technical Sciences*. 2024;2(17):94–109. (In Russ.) <https://doi.org/10.34824/VKNIIRAN.2024.17.2.007>
6. Erofeev V, Vatin N, Maksimova I, Tarakanov O, Sanyagina Y, Erofeeva I et al. Powder-Activated Concrete with a Granular Surface Texture. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022;18(4):49–61. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-4-49-61>
7. Паймухин В.И., Копаница Н.О., Рылская К.А. Механическая активация компонентов бетонной смеси. В: *Сборник научных статей VII международной конференции «Современные строительные материалы и технологии — 2024»*. Санкт-Петербург: Балтийский федеральный университет им. И. Канта; 2025. С. 25–33.
Paimukhin VI, Kopanitsa NO, Rylskaya KA Mechanical Activation of Concrete Mix Components. *Modern Building Materials and Technologies: Collection of Scientific Articles of the 7th International Conference, Kaliningrad, May 22–24, 2024*. Saint Petersburg: Immanuel Kant Baltic Federal University; 2025. P. 25–33. (In Russ.)
8. Самченко С.В., Агафонова Н.З. Активация сырьевых компонентов бетона. В: *Сборник докладов V Национальной научной конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования — 2024»*. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 2025. С. 101–104. URL: https://os.mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2025/Sbornik_Aktual-problemy-stroitelnoy-otrasli_2_2024.pdf (дата обращения: 03.04.2026).
Samchenko SV, Agafonova NZ Activation of Concrete Raw Materials. *Collection of Reports of the V National Scientific Conference "Actual Problems of the Construction Industry and Education — 2024"*. Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering; 2025. P. 101–104. (In Russ.) URL: https://os.mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2025/Sbornik_Aktual-problemy-stroitelnoy-otrasli_2_2024.pdf (accessed: 03.04.2026).
9. Лотов В.А., Сударев Е.А., Кутугин В.А. Предварительная активация цементно-песчаной смеси с целью повышения прочности бетона. *Химия и химическая технология*. 2022;65(8):94–101. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226508.6595>
Lotov VA, Sudarev EA, Kutugin VA Preliminary Activation of Cement-Sand Mixture in Order to Increase the Strength of Concrete. *Chemistry and Chemical Technology*. 2022;65(8):94–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226508.6595>
10. Сайрахмонов Р.Х., Рахматзода А.С., Назиров Я.Г. Тонкодисперсные минеральные материалы в комплексе с химическими добавками для дорожного бетона. *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. 2024;1(65):229–238.

Sairakhmonov RKh, Rakhmatzoda AS, Nazirov YaG Fine-Grained Mineral Materials in Combination with Chemical Additives for Road Concrete. *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*. 2024;1(65):229–238. (In Russ.)

11. Леонтьев С.В., Талейко А.А. Перспективы использования техногенных горных пород и кристаллических затравок в технологии LC3 вяжущих. *Construction and Geotechnics*. 2024;15(2):31–48. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2024.2.03>

11. Leontiev SV, Taleiko AA Prospects for the Use of Technogenic Rocks and Crystalline Seeding in LC3 Binder Technology. *Construction and Geotechnics*. 2024;15(2):31–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2024.2.03>

12. Тараканов О.В., Ерофеева И.В., Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Санягина Я.А., Кристофорова И.А. Моделирование процессов раннего структурообразования и твердения цементных материалов с органоминеральными добавками. *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;16(6):510–524. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-510-524>

Tarakanov OV, Erofeeva IV, Belyakova EA et al. Modeling the Processes of Early Structure Formation and Hardening of Cement Materials with Organomineral Additives. *Nanotechnology in Construction: Scientific Online Journal*. 2024;16(6):510–524. (In Russ.) <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-510-524>

13. Артамонов П.А. Влияние суперпластификаторов на свойства мелкозернистого бетона с опал-кристобалит-тридимитовым микронаполнителем. В: *Сборник научных трудов национальной конференции «Актуальные вопросы техники, науки, технологии»*. Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет; 2024. С. 465–468. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67310645> (дата обращения: 03.04.2026).

Artamonov PA Influence of Superplasticizers on the Properties of Fine-Grained Concrete with Opal-Cristobalite-Tridimite Microfillers. *Actual Issues of Engineering, Science, and Technology: Collection of Scientific Papers from the National Conference*. Bryansk: Bryansk State Engineering and Technology University; 2024. P. 465–468. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67310645> (accessed: 03.04.2026).

14. Шляхова Е.А. Способ приготовления бетонной смеси. Патент РФ № RU2780905C1. 2022. 6 с.

14. Shlyakhova EA *Method of Preparation of Concrete Mix*. Patent RF № RU2780905C1. 2022. 6 p. (In Russ.)

15. Shlyakhova E., Egorochkina I. Complex Organomineral Admixture for Cement Saving. *Journal of Architectural and Engineering Research*. 2022;3:93–95. <https://doi.org/10.54338/27382656-2022.3.011>

16. Shlyakhova E., Serebryanaya I., Egorochkina I., Matrosov A., Odinets M., Knyazhichenko M. Repair compositions for restoration of operated reinforced concrete structures. *E3S Web of Conferences*. 2021;273:04017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127304017>

17. Шляхова Е.А., Чэнь Я. Способ приготовления бетонной смеси. Патент РФ № 2833755 Рос. Федерация : С04В 40/00 № 2008151532/02, заявл. 26.12.2008 ; опубли. 28.01.25, Бюл. № 4. 2025. 6 с.

17. Shlyakhova EA, Chen Ya *Method of Preparation of Concrete Mix*. Patent RF № 2833755 Russian Federation: S04V 40/00 № 2008151532/02, submitted on 26.12.2008; published on 28.01.25, Bulletin № 4. 2025. 6 p. (In Russ.)

Об авторе:

Шляхова Елена Альбертовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в стройиндустрии Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), [ScopusID](#), [ORCID](#), shlyahovae@list.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Elena A. Shlyakhova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry at the Don State Technical University (162 Sotsialisticheskaya Str., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), shlyahovae@list.ru

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

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 05.04.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 20.04.2026

Принята к публикации / Accepted 06.05.2026

ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

URBAN PLANNING, PLANNING OF RURAL SETTLEMENTS



УДК 628.477:69:658.7:004.9

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-73-82>

Организационно-технологическая модель управления строительными отходами в условиях плотной городской застройки



EDN: KXGVJY

Н.В. Розанцева ✉, М.Р. Сагитдинов 

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

✉ nrozanceva@lan.spbgasu.ru

Аннотация

Введение. Исследование посвящено разработке эффективных методик управления строительными отходами на площадках жилой застройки в условиях плотной городской застройки. Предложены инновационные подходы к обращению с отходами, включающие отдельный сбор, цифровизацию процессов и современные технологии первичной обработки, соответствующие требованиям экологии и ресурсосбережения.

Материалы и методы. Исследование проведено методом укрупнённых расчётов объёма отходов на примере реального объекта жилищного строительства площадью 20 тыс. м². Оценка проведена на основе распределения отходов по категориям и стадиям производства (земляные работы, монолит, монтаж, инженерные сети, отделка, благоустройство). Используются усреднённые коэффициенты образования отходов и плотности материалов, позволяющие рассчитать итоговую массу каждой фракции. Проведен сравнительный анализ двух сценариев логистики: традиционного (сбор всех отходов вместе и отправка на полигон) и инновационного (отдельный сбор, предобработка на площадке, приоритет переработки и цифровой учёт).

Результаты исследования. Показан существенный экономический и экологический эффект от внедрения инновационного подхода к управлению строительными отходами. По сравнению с базовым сценарием («смешанный сбор → полигон»), инновационная схема («отдельный сбор + обработка на площадке + приоритет переработки + цифровая регистрация») обеспечивает снижение объёмов захоронения на 51 %, уменьшение транспортного трафика на 50 %. Ключевым параметром успеха являются объёмы повторного использования грунта, что снижает массу перерабатываемых отходов и количество рейсов самосвалов почти вдвое. Финансовая выгода дополняется возможностью коммерческой реализации вторичных ресурсов и внедрением цифровых инструментов контроля. Результаты представлены в таблицах, демонстрирующих месячную динамику образования отходов. Даны рекомендации по контейнеризации и оценке влияния допущений на итоговые показатели.

Обсуждение и заключение. Разработана методика управления строительными отходами, сокращающая объём захоронения, транспортную нагрузку и обеспечивающая экономию за счёт оптимизации переработки на месте. Обеспечено повышение уровня вторичного использования и эффективной первичной обработки отходов.

Ключевые слова: строительные отходы, управление отходами, сортировка отходов, переработка, цифровые платформы, мобильные сортировочные комплексы

Для цитирования. Розанцева Н.В., Сагитдинов М.Р. Организационно-технологическая модель управления строительными отходами в условиях плотной городской застройки. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2026;5(2):73–82. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-73-82>

An Organizational and Technological Model for Construction Waste Management in Dense Urban Development

Nadezhda V. Rozantseva ✉, Maksim R. Sagitdinov 

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

✉ nrozanceva@lan.spbgasu.ru

Abstract

Introduction. The research is devoted to developing effective methods for managing construction waste on residential sites in dense urban areas. Innovative approaches to waste management are set forth, including separate collection, digitalization of processes and modern primary treatment technologies in compliance with the requirements of ecology and resource conservation.

Materials and Methods. The study was conducted using the method of aggregated calculations of waste volume using the example of an actual housing construction facility with an area of 20,000 m². The assessment was performed based on the distribution of waste by categories and stages of production (excavation, monolith, installation, engineering networks, finishing, landscaping). The average coefficients of waste generation and material density were used in order to calculate the total mass of each fraction. A comparative analysis of two logistics scenarios was carried out: a traditional one (collecting all waste together and sending it to the landfill) and an innovative one (separate collection, on-site pre-treatment, recycling priority and digital accounting).

Research Results. The significant economic and environmental effect of the introduction of an innovative approach to construction waste management is indicated. Compared to the basic scenario ("mixed collection → landfill"), the innovative scheme ("separate collection + on-site processing + recycling priority + digital registration") provides a 51% reduction in landfill volumes and a 50% reduction in traffic. The major success parameter is the volume of soil reuse, which reduces the mass of recyclable waste and the number of dump truck trips by almost a half. The financial benefit is complemented by the possibility of commercial sales of secondary resources and introducing digital control tools. The results are presented in tables displaying the monthly dynamics of waste generation. Recommendations on containerization and assessment of the impact of the assumptions on the final indicators are provided.

Discussion and Conclusion. A construction waste management methodology has been developed that reduces the volume of disposal, transport load and provides savings by optimizing on-site recycling. An increase in the level of secondary use and effective primary waste treatment has been ensured.

Keywords: construction waste, waste management, waste sorting, recycling, digital platforms, mobile sorting complexes

For citation. Rozantseva NV, Sagitdinov MR An Organizational and Technological Model of Construction Waste Management in Dense Urban Development. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):73–82. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-73-82>

Введение. Актуальность проведенного исследования определяется масштабностью проблемы образования значительных объемов строительных отходов, характерной для современного городского строительства, особенно в условиях ограниченной площади застройки крупных городов. Высокая интенсивность строительной деятельности порождает большие объемы строительного мусора, создавая значительную нагрузку на окружающую среду и инфраструктуру городов. Современные города сталкиваются с необходимостью эффективного решения вопросов рационального обращения с отходами вследствие нехватки мест для временного хранения и складирования отходов, повышения требований к охране окружающей среды и устойчивого развития [4, 5].

Современная градостроительная политика направлена на развитие экономики замкнутого цикла, предусматривающего значительное увеличение уровня переработки строительных материалов (до 40 % к 2030 г.) [4, 11]. Это ставит перед строителями серьезные задачи по разработке новых подходов к управлению отходами, включая внедрение инновационных технологий и практик [5, 12].

Таким образом, данное исследование решает проблему разработки комплексной стратегии обращения со строительными отходами, нацеленной на снижение экологической нагрузки, повышение ресурсосбережения и улучшение организационно-технологических подходов к управлению отходами на объектах строительства. [2–4].

Объектом исследования является организация процесса обращения с отходами на строительной площадке многоэтажного жилого здания в условиях плотного расположения строений в городе. Предмет исследования — инновационные методики сбора, классификации, обработки и последующей утилизации строительных отходов на конкретных объектах строительства.

Цель работы: обоснование и разработка действенных решений по оптимизации управления строительными отходами при возведении многоэтажных жилых зданий в условиях плотной городской застройки, включающих современные технологии сортировки и переработки, соответствующие экологическим нормам и ограничениям городской среды.

Для реализации указанной цели были сформулированы следующие исследовательские задачи:

1. Изучение законов и нормативов, регулирующих обращение с отходами на городских стройплощадках.
2. Анализ видов и объемов отходов, образующихся на каждом этапе строительства жилого дома.
3. Исследования современных методов сбора, сортировки и переработки строительных отходов, включая цифровое управление и мобильную первичную обработку.
4. Разработка практических рекомендаций по улучшению утилизации отходов при строительстве жилья в плотной городской застройке.

Городская застройка характеризуется значительным объемом строительных отходов, формирующихся в стесненных условиях, при строгих ограничениях по уровню шума и движения транспорта, а также дефицитом возможностей для их размещения [5, 8]. Традиционный метод вывоза несортированного мусора ведет к увеличению транспортных расходов, экологическим рискам и простоям на стройплощадках [5].

Основные типы строительных отходов включают:

- демонтажные отходы (бой кирпича, бетона, обломки конструкций);
- отходы земляных работ (лишний грунт, песчано-гравийные смеси);
- отходы возведения конструкций (бетонные крошки, куски арматуры, упаковки);
- отделочные отходы (обрезки плитки, гипсокартона, остатков лакокрасочной продукции).

Управление этими потоками усложняется особенностями городской застройки: нехваткой пространства, жесткими правилами транспортировки и ограничениями по режиму работ [5, 8]. Для соблюдения установленных норм необходим четкий регламент уборки, раздельного сбора и оперативной утилизации отходов, минимизирующей негативное воздействие на городскую среду и снижающей расходы застройщика [2].

Цифровая система учёта отходов помогает автоматизировать мониторинг и повысить прозрачность обращения с ними [5, 12]. Пример московской АИС «ОССиГ» демонстрирует эффективность автоматического трекинга рейсов самосвалов с помощью GPS-датчиков и электронного документооборота [8]. Система фиксирует движение грузов и пункт доставки, предотвращая незаконный выброс мусора и обеспечивая соблюдение экологических стандартов.

Коммерческие решения расширяют функциональность, предлагая IoT-технологии (датчики наполненности контейнеров, весовые сенсоры техники), повышая точность планирования маршрутов и сокращая затраты на логистику [10, 12]. Электронные маркетплейсы позволяют обмениваться пригодными для повторной переработки материалами между объектами, уменьшая общий объем отходов [11].

Экологическая значимость вопроса подчеркивается статистикой: строительные отходы составляют примерно 30 % от общего объема твердых коммунальных отходов, что свидетельствует о важности учета такого объема мусора. Масштабная городская реконструкция и новый жилищный фонд ежегодно требуют решения задачи по утилизации тысяч тонн стройматериалов [1, 4]. Вместе с тем переработанные строительные отходы представляют собой ценный источник вторсырья, необходимого промышленности [2, 9].

Повышенные государственные требования закреплены Федеральным законом от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», согласно которому предусмотрены нормы обращения с отходами, включая контроль над движением строительного мусора. Региональные органы активно вводят систему мониторинга перемещения отходов от площадки до полигонов, борясь с нелегальным сбросом и несанкционированными свалками [5, 8].

Таким образом, создание модели управления строительными отходами, объединяющей раздельный сбор, предварительную обработку на месте и эффективную логистику, становится необходимым условием соответствия современным экологическим стандартам, снижения нагрузки на полигоны и экономии природных ресурсов [2, 5, 9].

Исследование сосредоточено на анализе составов и объемов строительных отходов, возникающих на разных этапах строительства жилого дома в условиях плотной городской застройки [3, 5]. Рассматриваются базовые и усовершенствованные схемы обращения с отходами, разрабатываются организационно-технические процедуры (графики контейнеризации, распределение ответственности RACI, ключевые показатели KPI) и проводится технико-экономическая оценка каждого варианта [2, 7, 12].

Практическая ценность заключается в возможности применить разработанную модель на аналогичных проектах массовой городской застройки [5, 8].

Материалы и методы. Расчеты по объекту выполнены укрупненно ввиду отсутствия детальных журналов массовых объемов работ. Объем отходов оценивается исходя из приведённой площади объекта (20 тыс. м²) и типов

работ (монолит, отделка и т. д.) с последующим распределением по категориям (инертные, металл, дерево, полимеры, смешанный материал, отходы III класса опасности) [3, 5]. Логистика организована с учетом ограничений площадки (односторонний подъезд, мочный комплекс колёс, временные окна въезда тяжёлой техники) [5, 8].

Базовым вариантом является традиционный смешанный сбор всех видов строительного мусора с последующей отправкой на полигоны. Инновационная альтернатива предполагает внедрение системы раздельного сбора отходов на строительной площадке, проведение предварительной обработки и приоритетную передачу пригодных материалов на переработку с использованием цифровых технологий контроля транспортных потоков и учета массы отходов. [12].

Расчёты проведены для конкретного объекта (корпус 5 по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, 11) с применением общих исходных значений V_i , различающихся лишь организацией потока отходов и долей их последующего повторного использования.

Методика расчета универсальная: каждому виду выполняемой работы соответствует собственный удельный показатель формирования отходов (коэффициент k_i), позволяющий определить итоговую массу отходов:

$$Q_i = k_i \times V_i,$$

которую далее распределяют по основным фракциям (инертные материалы, металлы, древесина, полимеры, смесь отделочного материала, опасные отходы).

Допущения при расчетах:

- грунт сверх нормы составляет 25 % от общей выемки (плотность 1,6 т/м³);
- остаточный бетон — 0,6 % от заливаемого объема (2,4 т/м³);
- лом арматуры — 1,5 % от общего веса;
- упаковка ограждающих конструкций — 0,6 кг/м²;
- изыски инженерных поставок: упаковка — 1,5 %, технологические обрезки — 2 % от массы,
- отделочные работы: смешанная группа — 3,5 кг/м², опасные отходы (тары краски и лаков) — 0,12 кг/м²;
- благоустройство: прочие отходы — 0,8 кг/м².

Объемы работ на участке: земляные работы — 12 000 м³, монолитный бетон — 10 000 м³, арматура — 1 500 т, фасадные ограждения — 14 000 м², инженерные сети — 300 т, отделочные работы — 22 000 м², благоустройство — 5 000 м² (таблица 1).

Таблица 1

Расчёт образования отходов по этапам и фракциям

Этап → фракция	Ед. (V_i)	Исходные данные / коэф.	Масса (Q_i), т
Земляные → избыточный грунт	м ³	12 000 × 25 % × 1,6 т/м ³	4 800,00
Монолит → инертные (остатки бетона/раствора)	м ³	10 000 × 0,6 % × 2,4 т/м ³	144
Монолит → металл (лом арматуры)	т	1 500 × 1,5 %	22,5
Ограждающие/монтаж → упаковка	м ²	14 000 × 0,6 кг/м ²	8,4
Инженерные системы → упаковка	т	300 × 1,5 %	4,5
Инженерные системы → технологические обрезки	т	300 × 2,0 %	6
Отделка → смешанные	м ²	22 000 × 3,5 кг/м ²	77
Отделка → опасные (тара ЛКМ, кл. III)	м ²	22 000 × 0,12 кг/м ²	2,64
Благоустройство → прочие	м ²	5 000 × 0,8 кг/м ²	4
Итого по проекту			5 069,04

Основную массу строительных отходов составляют грунты, образующиеся при проведении земляных работ. Общий объем извлеченного грунта достигает 5069,04 тонн, что соответствует 253 кг на 1 м² застройки. Значительный удельный вес грунтов определяет стратегию их утилизации и транспортировки, оказывая ключевое влияние на ключевые показатели эффективности проектов (KPI). Анализ динамики накопления показывает интенсивный рост объема отходов в начальные месяцы вследствие землеройных работ («земляной пик»), сменяемый плавным ростом объемов, обусловленным монолитными работами, фасадными операциями и внутренней отделкой объекта (таблица 2). Это предопределяет необходимость точного планирования сроков погрузочно-разгрузочных операций и своевременного освобождения площадки для продолжения дальнейших строительного-монтажных работ.

Чтобы обеспечить возможность воспроизвести расчеты и проверить обоснованность принятых предположений, обобщаем используемые коэффициенты и плотности в отдельной таблице (таблица 3).

Таблица 2

Помесячное образование отходов по этапам (т/мес.)

Мес.	Земляные	Монолит (инертн. + лом)	Огражд. / монтаж	Инженерные	Отделка	Благоустр.	Итого
1	1600	0	0	0	0	0	1 600,00
2	1600	0	0	0	0	0	1 600,00
3	1600	16,65	0	0	0	0	1 616,65
4	0	16,65	0	0	0	0	16,65
5	0	16,65	0	0	0	0	16,65
6	0	16,65	0	0	0	0	16,65
7	0	16,65	0	0	0	0	16,65
8	0	16,65	0	0	0	0	16,65
9	0	16,65	1,05	0	0	0	17,70
10	0	16,65	1,05	0,95	0	0	18,65
11	0	16,65	1,05	0,95	0	0	18,65
12	0	16,65	1,05	0,95	7,24	0	25,89
13	0	0	1,05	0,95	7,24	0	9,24
14	0	0	1,05	0,95	7,24	0	9,24
15	0	0	1,05	0,95	7,24	0	9,24
16	0	0	1,05	0,95	7,24	0	9,24
17	0	0	0	0,95	7,24	0	8,19
18	0	0	0	0,95	7,24	0	8,19
19	0	0	0	0,95	7,24	0	8,19
20	0	0	0	1	7,24	0	8,24
21	0	0	0	0	7,24	0	7,24
22	0	0	0	0	7,24	1,33	8,57
23	0	0	0	0	0	1,33	1,33
24	0	0	0	0	0	1,34	1,34
Итого	4 800,00	166,5	8,4	10,5	79,64	4	5 069,04

Таблица 3

Принятые коэффициенты и плотности

Параметр	Принятое значение	Комментарий
Избыточный грунт	25 % от выемки; $\rho = 1,6 \text{ т/м}^3$	Учитывается только вывезенный объём
Благоустройство — прочие	0,8 кг/м ²	Срезка / тара

Переход от расчетов массы отходов к вопросам логистики наглядно иллюстрирует потребность в транспортных средствах с необходимым объемом кузова и количестве рейсов (таблица 4). Если говорить о легких фракциях (таких как упаковка и смешанные отходы), то ключевым фактором выступает не столько их масса, сколько занимаемый ими объем. Использование прессов для уплотнения картонных коробок, пленок и прочих легких материалов значительно уменьшает оборот контейнеров, позволяя эффективно экономить транспортные ресурсы и снизить число необходимых поездок.

Таблица 4

Расчет количества рейсов на вывоз грунта

Фракция	Масса, т	Оцен. плотность (насыпн.)	Объём, м ³	Бункеры 20 м ³ (всего)	Рейсы самосвалов
Грунт	4 800,0	–	–	–	≈ 423 (12 т/рейс)

Вывоз лишнего грунта с площадки осуществляется исключительно автомобильным транспортом — напрямую самосвалами на специализированные полигоны. Однако для принятия обоснованных управленческих решений важно понимать, какие именно принятые предположения оказывают наибольшее влияние на конечный результат расчетов. Именно поэтому ниже проведен краткий анализ чувствительности, выявляющий наиболее значимый фактор, влияющий на выводы исследования (таблица 5).

Таблица 5

Чувствительность результата к ключевым допущениям

Изменение допущения	Было	Стало	Δ массы, т	Влияние
Доля избыточного грунта ± 5 п. п.	25 %	20–30 %	± 960	Критично (± 19 % от итога)

Операционную готовность строительной площадки обеспечивает четкое определение классов опасности отходов и типов используемой тары (пример: таблица 6). Такая мера необходима для правильного осуществления раздельного сбора и дальнейшего согласования процедур передачи отходов специализированным организациям на основании договоров. Правильная классификация и маркировка отходов помогают избежать нарушений санитарных и экологических норм, минимизировать риски штрафов и судебных разбирательств, а также способствуют повышению качества управления отходами и соблюдению требований государственных органов надзора.

Таблица 6

Фракции, классы опасности и рекомендуемая тара

Фракция	Класс	Рекомендуемая тара / зона
Грунт (незагрязнённый)	V	Прямой вывоз; временный буфер $\leq 1-2$ суток

Приведенные данные создают надежную основу для сопоставления рассматриваемых сценариев. Основным источником неопределенности является уровень повторного использования избытков грунта. Чтобы учесть возможные варианты развития ситуации, расчет выполняется по трем сценариям повторного использования: нулевое использование (0 %), частичное использование (25 %) и умеренное использование (50 %) (таблица 7). Подобный подход позволяет выявить зависимость объема размещаемого грунта, числа рейсов и величины затрат от реальных ограничений, существующих в городском пространстве (качество извлечённого грунта, доступность пунктов приема, разрешённое время вывоза).

Таблица 7

Распределение потоков по фракциям (повторное использование / переработка и захоронение), т (вариант: повторное использование грунта 50 %)

Фракция	Масса всего	База: повторное использование / перер.	База: захоронение	Инновации: повторное использование / перер.	Инновации: захоронение
Грунт (избыточный)	4 800,00	0	4 800,00	2 400,00	2 400,00

Итоговая структура потоков отходов сильно зависит от выбранного уровня повторного использования грунта. Показатели, представленные в таблице 7, рассчитаны по оптимистичному сценарию с уровнем повторного использования 50 %. Этот случай отражает ситуацию, когда существует подтвержденная инфраструктура для приема грунта, и обеспечиваются благоприятные условия для его применения.

Однако для выработки устойчивых управленческих решений предлагается учитывать промежуточный вариант с долевым участием 25 %, который представляется более реалистичным для большинства городских площадок. Дополнительно рассматривается и консервативный сценарий с полным отсутствием повторного использования грунта (0 %).

Результаты исследования. Интерпретация результатов должна проводиться с учетом трех указанных уровней: полная утилизация (0 %), частичное использование (25%) [6] и оптимальное использование (50 %). Конкретные численные значения будут зависеть от уточняющих пересчетов (таблица 8).

Ключевые критерии оценки сценариев представлены в сжатой форме таблицы-карты, отражающей четыре главных показателя: долю вовлечения отходов в повторное использование, объем захоронения, логистические расходы и удельные затраты на единицу обработанной площади.

Для полноты дадим стоимостное сравнение на ориентировочных тарифах: транспорт — 9 000 руб./рейс (12 т), размещение грунта — 900 руб./т (таблица 9).

Таблица 8

Интегральные показатели (масса, логистика, удельные)

Показатель	База	Инновации	Эффект
Повторное использование / переработка, т	36,02	2 593,70	2 557,68
Доля переработки, %	0,71	51,2	50,5
Захоронение, т	5 033,02	2 475,34	–2 557,68 (–50,8 %)
Масса к вывозу, т	5 069,04	2 553,84	–2 515,20 (–49,6 %)
Рейсы самосвалов (12 т/рейс), шт.	≈ 423	≈ 213	–210 (–49,6 %)
Удельное захоронение, т/м ²	0,252	0,124	–0,128
Удельный реюз / переработка, кг/м ²	1,8	129,7	127,9

Таблица 9

Прямые затраты по сценариям (расчётный пример)

Статья затрат	Единица	Тариф, руб.	База (объём)	База, руб.	Инновации (объём)	Инновации, руб.
Транспорт (самосвалы, 12 т)	рейс	9 000	≈ 423	3 807 000	≈ 213	1 917 000
Размещение грунта	т	900	4 800	4 320 000	2 400	2 160 000
Итого прямые затраты				8 127 000		4 077 000

Финансовый итог варьируется в диапазоне от 8,13 до 4,08 млн. рублей (примерно 50 %-ное сокращение) в зависимости от доли повторного использования грунтов (0, 25 или 50 %). Приведённый пример ориентирован на оптимистичный уровень — 50 %; для базовой городской практики (25 %) и консервативного сценария (0 %) стоимость корректируется дополнительно, используя анализ чувствительности (подробнее см. ниже) [7]. Реальные операционные итоги следует рассматривать в указанном диапазоне, а не полагаясь на одно значение.

Операционные преимущества (нефинансовые):

- сокращение числа рейсов автомобилей почти вдвое (около минус 210 рейсов), что облегчает дорожную обстановку и разгрузку «окошек» выезда;
- уменьшение пиковых скоплений отходов на площадке, благодаря чему улучшаются санитарно-гигиенические условия;
- повышенная прозрачность операций: электронный учет перевозки, упрощенный контроль, электронная отчетность снижают вероятность административных санкций и штрафных мер;
- эффективное подавление загрязнений (пыли, шума) благодаря коротким циклам предварительного измельчения и прессования отходов.

Чувствительность итогового результата. Наиболее существенное влияние на общую экономику проекта оказывает стратегия обращения с грунтом: изменение доли повторного использования всего на 5 процентных пунктов (например, с 25 до 30 %) влечет изменения порядка 960 тонн груза и около 1 миллиона рублей экономии. Другие коэффициенты (остатки бетона, норма образования отделочных отходов) влияют менее заметно [7].

Следовательно, при уточнении начальных данных рекомендуется сначала зафиксировать точные объемы земляных работ и реальную долю возвращаемого грунта, оценить доступность мобильной дробилки, проверить тарифы на перевозку и прием отходов на полигонах [8].

Преимущества инновационного сценария. Реализация инновационной стратегии в условиях городской застройки приносит существенные выгоды:

- уменьшение объемов захоронения на 51 %;
- снижение транспортной нагрузки почти наполовину (–50 % рейсов);
- прямая экономия финансовых средств достигает практически половины первоначальной стоимости обращения с отходами.

Дополнительные меры усиления эффекта включают коммерческую реализацию вторичных ресурсов (металла, вторичного щебня) и обязательную цифровизацию отчетности, что способствует прозрачности и снижению риска ошибок [9].

Цель инновационного сценария. На строительной площадке необходимо организовать поточную работу (таблица 10) таким образом, чтобы:

- поддерживать чистоту и экологичность: проводить регулярную уборку загрязненных территорий, обеспечивать покрытие бункеров и мойку колес при выезде;
- организовывать взвешивание грузов при выходе (если имеется весовая установка) или рассчитывать массу по объему и плотности с обязательным документированием (фотофиксация);
- осуществлять планирование логистики межпиково или ночью, учитывая установленные временные «окна»;
- создать запас гибкости в графике выездов (+15 % резерва по рейсам);
- использовать технику: самосвалы грузоподъемностью 12 тонн для грунта и бункеровозы вместимостью 20 м³ для остальных фракций отходов.

Таблица 10

Недельный цикл операций (пример)

День	07:00–11:00	11:00–15:00	15:00–19:00	22:00–06:00
Пн.	Сбор / перемещение фракций	Прессование упаковки	Погрузка инертных материалов	Вывоз грунта (слоты)
Вт.	Дробление инертных материалов	Грохот / магнит	Погрузка втор. щебня	Вывоз смешанных отходов

Главным драйвером положительных изменений является эффективное управление самой крупной массой отходов — землей и инертными материалами. Их локальное повторное использование напрямую влияет на общую массу отходов и количество требуемого транспорта. Принятая доля повторного использования грунтов (0, 25 или 50 %) определяет масштабы положительного эффекта: при увеличении процента повторного использования сокращается объем захоронения и уменьшаются объемы перевозимого материала (таблица 11).

Например, при доле повторного использования 50% на площадке остается примерно 2,5 тысячи тонн переработанного грунта и вторичного щебня [6], тогда как при снижении доли этот положительный эффект закономерно ослабевает.

Таблица 11

Сводные KPI по сценариям (масса, логистика, удельные)

Показатель	База	Инновации	Эффект
Масса отходов образуется, т	5 069,0	5 069,0	–
Реюз / переработка, т	36	2 593,7	2 557,7 т
Доля реюза / переработки, %	0,71	51,2	50,5 п. п.
Захоронение, т	5 033,0	2 475,3	–2 557,7 т (–50,8 %)
Масса, подлежащая вывозу, т	5 069,0	2 553,8	–2 515,2 т (–49,6 %)
Рейсы самосвалов (12 т/рейс), шт.	≈ 423	≈ 213	–210 рейсов (–49,6 %)
Удельное захоронение, т/м ²	0,252	0,124	–0,128 т/м ²
Удельный реюз / переработка, кг/м ²	1,8	129,7	127,9 кг/м ²

Экономическая оценка. Приняты ориентировочные тарифы (заменяются фактическими): перевозка — 9 000 руб./рейс (12 т), размещение грунта — 900 руб./т, рейс (таблица 12).

Таблица 12

Прямые затраты по сценариям (расчётный пример)

Статья затрат	Единица	Тариф, руб.	База (объём)	База, руб.	Инновации (объём)	Инновации, руб.
Транспорт (самосвалы, 12 т)	рейс	9 000	≈ 423	3 807 000	≈ 213	1 917 000
Размещение грунта	т	900	4 800	4 320 000	2 400	2 160 000

Обсуждение и заключение. В результате исследования предложена эффективная методика управления строительными отходами, позволяющая сократить объёмы захоронения на 51 %, уменьшить транспортное воздействие на городскую среду на 50 % и достичь экономического эффекта: суммарная экономия порядка

4,1–4,2 млн. руб. ($\approx 50\%$ к базе), или $\approx 200\text{--}210$ руб/м² общей площади, т. е. 50% относительно традиционной модели обращения с отходами.

Полученная экономия достигается за счёт трёх основных факторов:

- сокращение числа рейсов почты почти вдвое благодаря локализации части переработки непосредственно на стройплощадке;
- уменьшение платы за размещение отходов на специализированных полигонах за счёт увеличения доли повторного использования сырья;
- эффективность недорогих операций предварительной подготовки (дробление, прессовка), обеспечивающих дополнительную выгоду в рамках комплексного подхода.

При этом важнейшую роль играют раздельный сбор отходов, мобильная первичная обработка и цифровизация логистики [13]. Особенно значимым оказался фактор повторного использования излишнего грунта: изменение его доли всего на 5% способно принести дополнительные миллионы рублей экономии. Реализация предложенной концепции предусматривает разработку интегрированной программы действий, сочетающую экологически чистые методы, цифровую регистрацию и грамотную логистику. Полученные результаты позволят возводить жилые объекты с меньшим ущербом для природы и серьёзной экономией материальных ресурсов.

Список литературы/References

1. Колодяжный С.А., Золотухин С.Н., Абраменко А.А., Артемова Е.А. Снос зданий и использование материалов, образующихся при реновации городских территорий. *Вестник МГСУ*. 2020;15(2):271–293. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.2.271-293>
Kolodyazhny SA, Zolotukhin SN, Abramenko AA, Artemova EA Destruction of Buildings and Use of Materials from Renovated Urban Territories. *Vestnik MGSU*. 2020. 15(2), 271–293. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.2.271-293>
2. Хмелевской Н.А. Эффективность переработки строительных отходов методом рециклинга. *Integral: международный журнал прикладных наук и технологий*. 2020;3:19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43086681> (дата обращения: 25.03.2026).
Khmelevskoi NA Efficiency of Construction Waste Recycling. *Integral: International Journal of Applied Sciences and Technology*. 2020;3:19. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43086681> (accessed: 25.03.2026)
3. Парамонова О.Н., Юдина Н.В. Строительные отходы с позиции теории устойчивости дисперсных систем. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территории*. 2024;3(1):48–56. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-48-56>
Paramonova ON, Yudina NV Construction Waste from Perspective of the Disperse Systems Stabilisation Theory. *Construction Materials and Products*. 2024;3(1):48–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-48-56>
4. Яковенко К.А., Искрин В.А. Состояние сферы обращения со строительными отходами за рубежом. *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2024;5(169):58–65. <https://doi.org/10.71536/vd.2024.5c169.7>
Yakovenko KA, Iskrin VA State of Construction Waste Management Abroad. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2024;5(169):58–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.71536/vd.2024.5c169.7>
5. Розина В.Е., Дагбаева Ю.Б. Управление системой переработки строительных отходов. *Universum: технические науки*. 2019;6(63). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/7430> (дата обращения: 25.03.2026).
Rozina VE, Dagbaeva YuB Managing a System for Processing Construction Waste. *Universum: Technical Sciences*. 2019;6(63). (In Russ.) URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/7430> (accessed: 25.03.2026)
6. Дементьева М.Е., Мазурин Д.М. Организация процессов обработки строительных отходов в рамках технологии «умный снос» (кейс-анализ). *Строительство и архитектура*. 2023;4:10. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2023-11-4-10-10>
Dement'eva ME, Mazurin DM Organization of Construction Waste Processes Using “Smart Demolition” Technology. *Construction and Architecture*. 2023;4:10. (In Russ.) <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2023-11-4-10-10>
7. Фёдоров М.И. Финансовые аспекты построения системы рециклинга отходов на строительном производстве. Магистерская диссертация. Красноярск: Сибирский федеральный университет; 2019. 145 с. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/112514> (дата обращения: 25.03.2026).
Fedorov MI *Financial Aspects of Building a Recycling System in Construction*. Master's Thesis. Siberian Federal University, Krasnoyarsk. 2019. 145 p. (In Russ.) URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/112514> (accessed: 25.03.2026)
8. Ахмедова Г.Т. Логистика сбора, переработки и вторичного использования строительных отходов. Автореф. дис. канд. экон. наук. Ростов-на-Дону: РГЭУ (РИНХ); 2022. 27 с. URL: <https://goo.su/O97960> (дата обращения: 25.03.2026).

Akhmedova GT Logistics of Collection, Processing and Reuse of Construction Waste. *Author's Abstract of Cand. (Econ) Thesis*. RSUE, Rostov-on-Don; 2022. 27 p. (In Russ.) URL: <https://goo.su/Q9796o> (accessed: 25.03.2026)

9. Makul N, Fediuk R, Amran M, Zeyad AM, Murali G, Vatin N et al. Use of Recycled Concrete Aggregates in Production of Green Cement-Based Concrete Composites: A Review. *Crystals*. 2021;11(3):232. <https://doi.org/10.3390/cryst11030232>

10. Dodamegama S, Hou L, Asadi E, Zhang G, Setunge S Revolutionizing Construction and Demolition Waste Sorting: Insights from Artificial Intelligence and Robotic Applications. *Resources, Conservation & Recycling*. 2024;202:107375. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107375>

11. Bao Z Developing Circularity of Construction Waste for a Sustainable Built Environment in Emerging Economies: New Insights from China. *Developments in the Built Environment*. 2023;13:100107. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100107>

12. Han D, Kalantari M, Rajabifard A BIM for Construction and Demolition Waste Management in Australia: A Research Agenda. *Sustainability*. 2021;13(23):12983. <https://doi.org/10.3390/su132312983>

13. Kaewunruen S, Lin YH, Guo Y BIM-Driven Digital Twin for Demolition Waste Management. *Scientific Reports*. 2025;15:28989. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13938-9>

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

Сагитдинов Максим Ренатович, магистрант кафедры организации строительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4), [ORCID](#), maxsag2001@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

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

М.Р. Сагитдинов: 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, Department of Construction Organization, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4 2nd Krasnoarmeyskaya Str., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), nrozanceva@lan.spbgasu.ru

Maksim R. Sagitdinov, Master's Student at the Department of Construction Organization, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4 2nd Krasnoarmeyskaya Str., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation), [ORCID](#), maxsag2001@mail.ru

Claimed contributorship:

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

MR Sagitdinov: 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.

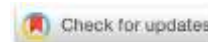
Поступила в редакцию / Received 28.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 10.04.2026

Принята к публикации / Accepted 24.04.2026

ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

URBAN PLANNING, PLANNING OF RURAL SETTLEMENTS



УДК 711.4:626.81/.85(5-012)

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-83-96>

Эволюция городской ирригации и орошаемой городской среды в Центральной Азии

А.Ю. Спирова  , Д.В. Карелин 

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

 nspiry@gmail.com



EDN: ACPSKW

Аннотация

Введение. В статье рассматривается развитие городской ирригации в Центральной Азии во взаимосвязи с эволюцией структуры городской среды. Сельскохозяйственная ирригация и история центральноазиатского градостроительства обширно исследованы, в то время как городская ирригация изучается мало. Исследований, рассматривающих ландшафтное орошение в хронологическом контексте развития города для данного региона, практически нет. В связи с этим цель настоящей работы — определение этапов развития городской ирригации и орошаемых элементов городской среды и выявление границ и характерных особенностей каждого этапа в историческом контексте.

Материалы и методы. Этапы развития городской ирригации выявлялись путём анализа исторических и археологических материалов, анализа исследований, посвящённых ландшафтной архитектуре, градостроительству и гидротехническому строительству в различные исторические периоды.

Результаты исследования. В результате работы выделены и описаны этапы развития ирригации и орошаемой городской среды; построена хронографическая прямая развития ирригации; построены схемы орошения городов в различные исторические периоды.

Обсуждение и заключение. Результаты работы могут быть использованы в обосновании культурно-исторической ценности арычного орошения в современных городах Центральной Азии, а также при проектировании мер адаптации городов, подверженных изменению климата в сторону засушливости.

Ключевые слова: городская ирригация, Центральная Азия, история градостроительства, арычное орошение, аридные города

Для цитирования. Спирова А.Ю., Карелин Д.В. Эволюция городской ирригации и орошаемой городской среды в Центральной Азии. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(2):83–96. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-83-96>

Original Empirical Research

Evolution of Urban Irrigation and Irrigated Urban Environment in Central Asia

Antonina Yu. Spirova  , Dmitriy V. Karelin 

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

 nspiry@gmail.com

Abstract

Introduction. The article examines the development of urban irrigation in Central Asia as regards the evolution of the urban environment structure. Agricultural irrigation and the history of Central Asian urban planning have been extensively investigated, while urban irrigation has not been sufficiently studied. There are barely any studies looking at landscape irrigation in the chronological context of urban development for the region. Therefore the aim of the study is to identify

the stages of development of urban irrigation and irrigated elements of the urban environment as well as the boundaries and characteristic features of each stage in the historical context.

Materials and Methods. The stages of urban irrigation development were identified by analyzing historical and archaeological materials as well as studies on landscape architecture, urban planning, and hydraulic engineering throughout a variety of historical periods.

Research Results. As a result, the stages of development of irrigation and the irrigated urban environment have been identified and described; a chronographic line of irrigation development has been designed; irrigation schemes of cities throughout various historical periods have been designed.

Discussion and Conclusion. The results can be used in order to substantiate the cultural and historical value of the open-channel irrigation in modern cities of Central Asia, as well as to design adaptation measures for cities whose climates are becoming arid.

Keywords: urban irrigation, Central Asia, history of urban planning, irrigation ditch, open-channel irrigation, arid cities

For citation. Spirova AYu, Karelin DV Evolution of Urban Irrigation and Irrigated Urban Environment in Central Asia. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):83–96. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-83-96>

Введение. Исследуемая область охватывает северо-восток современного Ирана (восточный Прикаспий, от Тегерана до Кашмера), современные Узбекистан, Туркменистан, Таджикистан, Кыргызстан, север Афганистана (включая Кабул), юг Казахстана, западное приграничье Китая. Географические границы исследования с обозначенными основными бассейнами рек приведены на рис. 1.

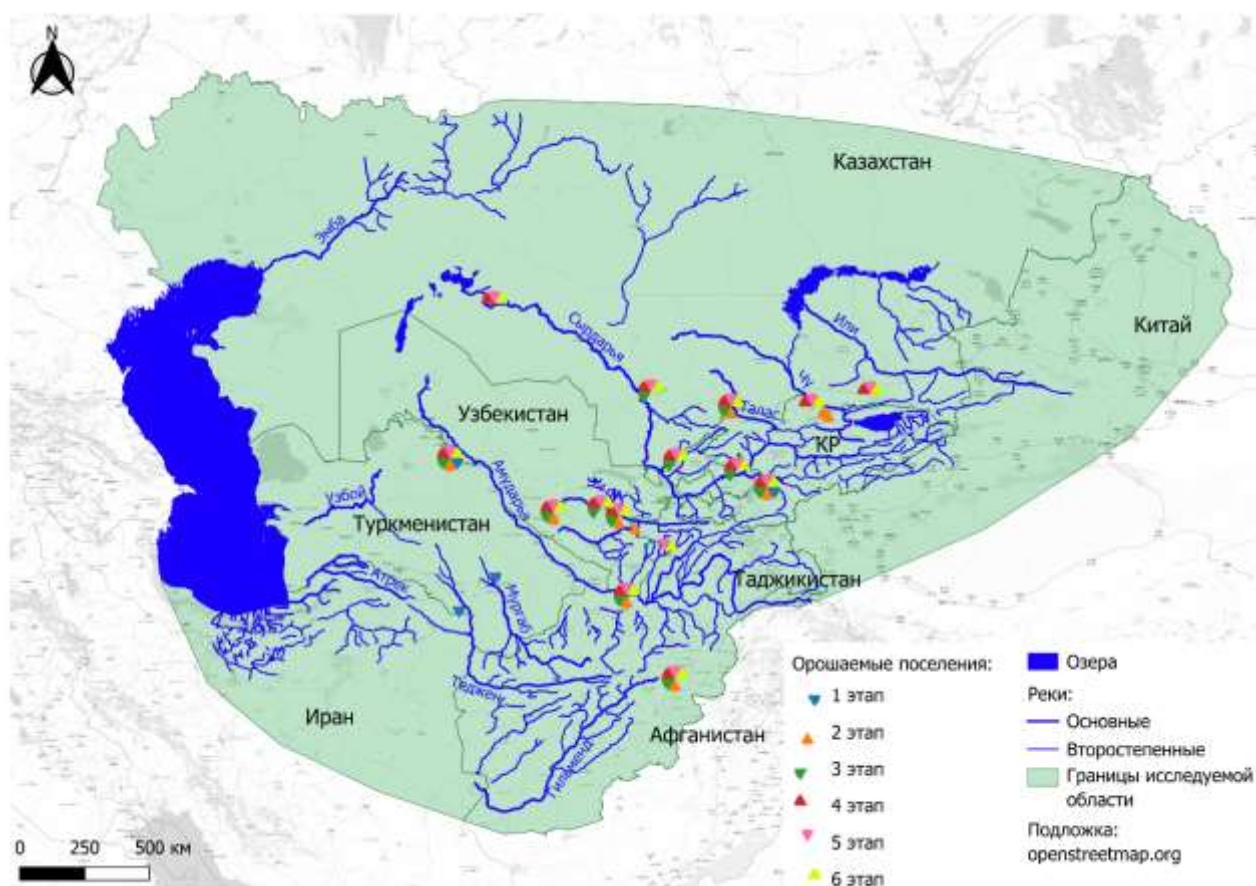


Рис. 1. Географические границы исследования

Городская ирригация этого региона как самостоятельное исследование слабо представлена в литературе. История сельскохозяйственного орошения изучена в мельчайших подробностях [1–4]. Вопросы истории центральноазиатского градостроительства нередко поднимаются в научных исследованиях авторов по всему миру. При этом городская ирригация упоминается вскользь несмотря на то, что жизнь без орошения во многих регионах Центральной Азии невозможна даже в городской среде [5]. Наиболее подробно её рассматривали Исмаилов М.И.,

посвятивший несколько публикаций ландшафтному орошению городов Таджикистана [6, 7], и Кочедамов В.И., описавший архитектуру сардоб и хаузов Самарканда и Бухары, но без выраженной привязки к историческим периодам [8]. Пугаченкова Г.А. в своих трудах по архитектуре времён династии Тимуридов уделила много внимания орошению [9, 10]. Историю гидротехнических изобретений на территории Центральной Азии рассмотрела Мамаджанова С.М., однако в её публикациях нет привязки к периодам развития городской среды [11]. Орошению садов и парков с IX века, в том числе в городской зоне, посвящена диссертация Мухиддиновой Р.К. [12].

Цель настоящей работы — выявление процесса зарождения и развития централизованной городской ирригации и орошаемых городских территорий в Центральной Азии.

Задачи работы: выявить исторические границы этапов развития городской ирригации и орошаемых городских пространств с древних времён до наших дней; определить характерные черты и составить схему орошения города для каждого этапа.

Материалы и методы. Объект исследования — городская ирригация. Предмет — взаимовлияние развития городского орошения и формирования общественного пространства в Центральной Азии.

Построение описания этапов развития городской ирригации и орошаемых городских пространств производилось при помощи историческо-логического метода. Для определения границ и характерных черт каждого этапа выполнялся поиск и анализ результатов археологических исследований городищ Центральной Азии, исторических материалов (дневников путешественников, документов), академических публикаций современных и советских авторов (поскольку исторические и археологические исследования некоторых центральноазиатских регионов в основном завершились в 80-х гг. прошлого века). Из указанных источников собраны все упоминания об орошаемых городских территориях и об ирригационных сооружениях, которые могли иметь отношение к орошению городской среды. Аналогично выполнялся поиск информации о градостроительных практиках за соответствующий период. Информация об ирригационных практиках накладывалась на информацию о градостроительных практиках.

По каждому этапу на основании выделенных характерных черт построена схема орошения города.

Результаты исследования. Городская ирригация зарождалась одновременно с азиатскими городами и реагировала на каждое изменение структуры. Этапы формирования городской ирригации неразрывно связаны с эволюцией самого города. Анализ исторических свидетельств, археологических отчётов и тематических научных публикаций позволяет выделить шесть этапов развития городской ирригации.

Следует обратить внимание, что границы каждого этапа размыты. Так, одновременно в различных местах могли существовать сценарии 1-го и 2-го этапов, или 2-го и 3-го. Хронографическая прямая развития городской ирригации представлена на рис. 2.

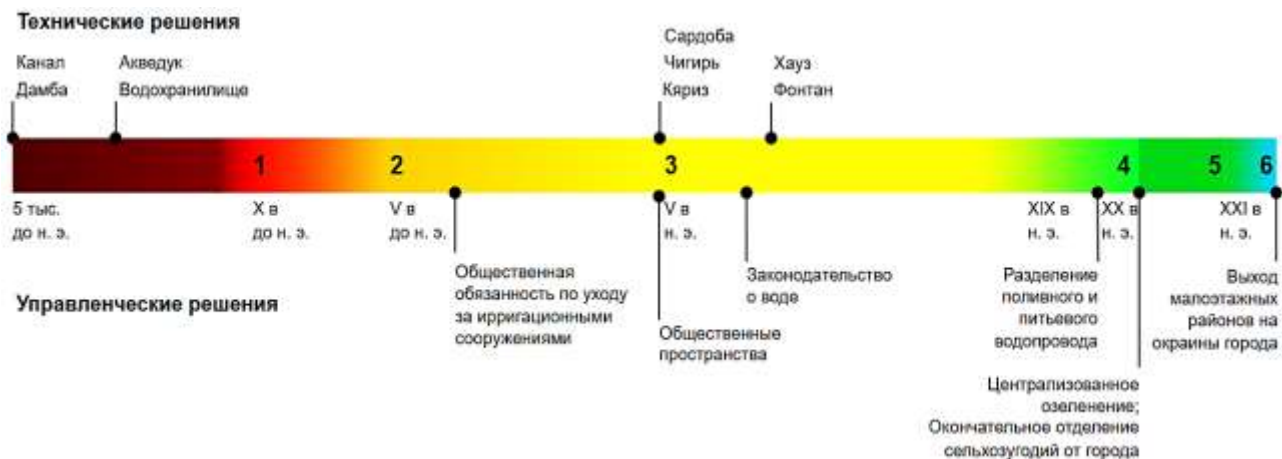


Рис. 2. Хронографическая прямая развития ирригации

Этап 1: как возникает орошаемый город.

Первый этап (кон. II тыс. до н. э. — I в. до н. э.) — этап зарождения, когда «город» представляет собой находящиеся на небольшом расстоянии орошаемые сельскохозяйственные угодья.

Искусственные ирригационные сооружения (каналы и пруды) на территории Центральной Азии известны с V тысячелетия до н. э. Примерно тогда же на юге Центральной Азии появились первые сельскохозяйственные оазисы [3]. В III тысячелетии до н. э. земледельцы, жившие на территории современных Таджикистана и северного Афганистана, строили дамбы, водораспределители и акведуки [13].

В конце II – начале I тысячелетия до н. э. в Центральной Азии стали появляться сложные ирригационные сооружения и масштабные оросительные системы, на которых возникают крупные укрепленные поселения-оазисы (Яз-Тепе, Аравали-Тепе, Елькен-Тепе и др. — территории современных Туркменистана и севера Афганистана) [14]. Поначалу оазис был совокупностью земледельческих угодий, иногда обнесённых общей крепостной стеной [2, 15]. Возникновение таких поселений на магистральных арыках обусловлено одновременно удобством орошения и необходимостью охранять ключевые гидротехнические сооружения [15]. Таким образом, с самого начала оазисы были пропитаны водой. Но в XI–IV веке до н. э. их ещё рано называть городами в современном понимании [15].

Характерные черты периода:

- обеспеченность каждого участка водой;
- отсутствует разделение водопроводных систем по методам водопользования;
- однообразие орошаемых элементов;
- однообразие способов водопользования;
- изобретение простейших гидротехнических сооружений, которые впоследствии будут использоваться и в городской ирригации: дамба, канал, акведук.

Схема орошаемого поселения-оазиса представлена на рис. 3.

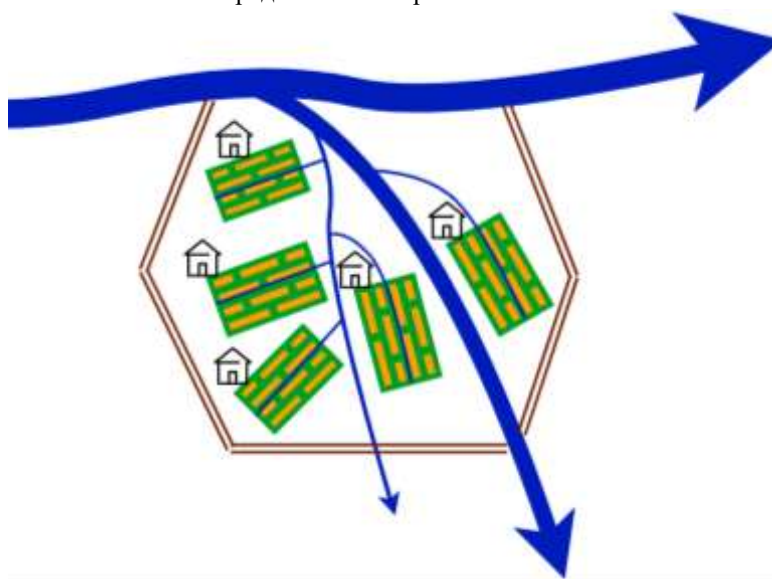


Рис. 3. Схема орошаемого укрепленного оазиса

Этап 2: город становится городом.

Второй этап — этап становления городской среды (сер. I тыс. до н. э. – XI в н. э.).

В середине I тысячелетия до н. э. Центральную Азию охватывает волна формирования государств. Они приносят в поселения настоящую городскую структуру: улицы, ремёсла, разделение труда. Отныне не все жители заняты земледелием. В оазисах появляются жилые районы, при которых нет сельскохозяйственных угодий [2].

Так появляется город-оазис и занимает главенствующее место в азиатском градостроительстве на период более тысячи лет, примерно до VIII века [16].

Технологии орошения в городе и за его пределами на этом этапе отличаются мало. Поверхностные воды подводят каналами с водозаборами выше города по течению, если же это невозможно — используются чигири для подъёма воды на высокий берег [3]. Подземные воды подводятся при помощи карызов. Освоены и применяются разнообразные методы проведения водопровода: в каких-то городах довольствуются арыками, в иных — ведут глиняный или даже свинцовый водопровод. Таким образом, изобретено большинство технологий, наиболее широко применяемых в городской ирригации сегодня.

На протяжении почти двух последующих тысячелетий принципиальных изменений в технологиях орошения не происходило. Медленно изменялась структура городской среды. В V–VIII вв. н. э. типичный центральноазиатский город состоял из следующих основных элементов [16]:

- 1) цитадель – укрепление, внутри которого обычно располагались дворцы;
- 2) шахристан — административно-ремесленная часть;
- 3) рабад — торгово-ремесленный пригород с сельскохозяйственными угодьями.

Шахристан наиболее близок в тому, что сегодня мы называем городом [17]. Он обычно имел регулярную планировку и строился планово: разбивалась сетка кварталов, возводились главные здания (религиозные, общественные), выкапывались хаузы, а затем застраивались кварталы, и переносились административные учреждения. Конструктивного разделения питьевого и оросительного водопровода не было, но вода в шахристане использовалась преимущественно для питьевых целей. От водозаборных сооружений на реках шли глиняные водопроводы или арыки, преимущественно в необлицованных каналах. От магистральных каналов или труб разветвлялась сеть по жилым районам. Археологические свидетельства не показывают, что каналы, как сегодня, шли вдоль каждой улицы, однако магистральные и главные улицы шахристанов обычно проходили вдоль каналов. Хаузы в шахристанах возводились в первую очередь для запасов питьевой воды [16].

Здесь же, в шахристане V века, а именно — в городе Пенджикенте, археологами засвидетельствовано первое озеленение общественного пространства — остатки виноградных лоз и пней вдоль арыков на территории храма [18]. Сады при религиозных сооружениях были найдены также в городищах VI–X вв. на территории современного Кыргызстана, в Чуйской долине [19].

Многие города в этот период уже имеют специализированные канализационные сооружения. Но, например, в городах Хорезма и в Бухаре арычная сеть становилась и местом сброса отходов, вследствие чего вода в каналах была непригодной для питья. Поэтому чистую питьевую воду продавали или же давали бесплатно в специальных павильонах [17]. Предположительно, следствием загрязнения арыков стал рост городов вверх по оросительным каналам, так как люди стремились селиться как можно выше по течению. Такая тенденция отмечалась А.М. Беленицким и И.Б. Бентовичем в Термезе, Бухаре и Самарканде.

Рабад на данном этапе — более сельскохозяйственная территория. Там вода в большей степени используется на орошение. Хотя плотность застройки рабада на этом этапе значительно ниже плотности застройки шахристана, сеть каналов рабада могла быть плотнее вследствие большей потребности в воде. Вода требовалась и для ремесленников, в том числе в аспекте преобразования в механическую энергию: например, она приводила в движение мельницы.

Характерные черты этапа:

- специфичность водопользования в зависимости от района города;
- постепенный выход из городской среды крупных сельскохозяйственных угодий;
- изобретение почти всех основных гидротехнических устройств и сооружений, которые будут использоваться в городской ирригации до начала XX века.

Схема орошаемого трёхчастного города представлена на рис. 4.

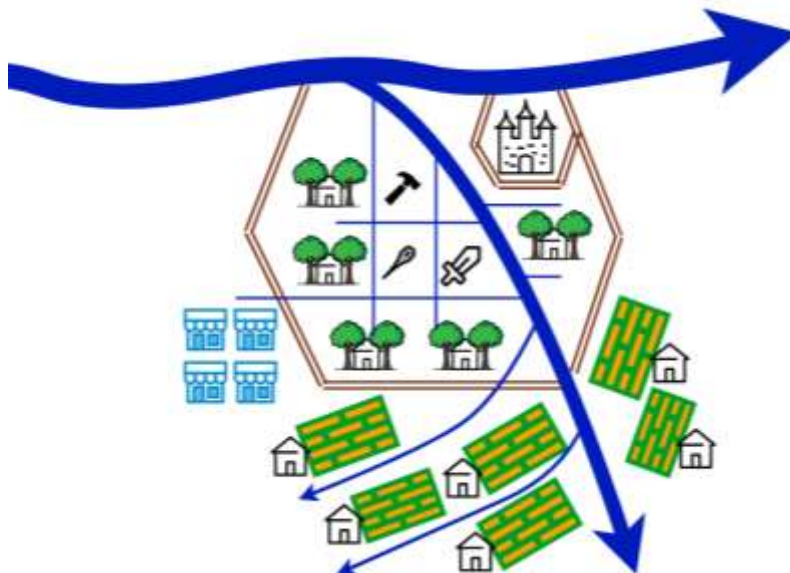


Рис. 4. Схема трёхчастного орошаемого города: цитадель, шахристан, рабад (рисунок автора, по материалам [16])

Этап 3: общественное и частное.

Третий этап (VIII — нач. XIX в.) наступает с расцветом общественного пространства — парка, общественного сада.

С VIII–IX века в Центральной Азии формируется типичный феодальный город. Рабад получает развитие — в нём сосредотачивается хозяйственная жизнь города [6, 20]. Постепенно рабад поглощает шахристаны, а сельскохозяйственные угодья образуют посёлки-спутники — рустаки [17, 19].

Мусульманская культура приводит к развитию идеи общественного здания и общественного пространства. Важным таким пространством является территория мечети: особенности мусульманских богослужений делали мечеть самым посещаемым общественным пространством. Во дворах мечетей часто устраивались хаузы, а сами дворы хорошо озеленялись и орошались [21].

Уже в золотоордынский период появились фонтаны и хаузы — водоёмы для накопления воды. В некоторых городах питьевая вода добывалась из подземных источников при помощи колодцев и карызов, тогда как техническая (поливная) поставлялась по арыкам [22]. Излишки воды могли собираться в водохранилища в нижней части города. Для канализации стараются возводить обособленные от источников воды сооружения.

Настоящий бум развития благоустройства и орошения центральноазиатский город переживает в эпоху Тимуридов с XIV по XVI вв. [7, 9]. Вопреки легендам, войска Тимуридов разрушали далеко не все города на своём пути. Многие захваченные города должны были служить свидетельством славы династии: в них разбивались сады, проводились арыки, строились общественные хаузы и сардобы — закрытые большие резервуары для накопления воды¹. Хаузы также были призваны обеспечить прохладу [9]. Их берега обсаживались деревьями [8].

Город эпохи Тимуридов — уже полностью ремесленный и торговый [9]. Даже пригороды выполняют более рекреационную функцию, нежели сельскохозяйственную [6, 10]. Разбиваются пышные загородные сады, предназначенные для спокойного отдыха и прогулок, и деревья для них подбираются скорее с декоративной целью; организуются пруды и обильное арычное орошение [10]. Хорошо известны в истории сады, разбитые Тимуром и его потомками в Самарканде, Туркестане, Кабуле²; последний был реконструирован в 2007 году. Стоит уточнить, что загородные сады Тимуридов трудно было назвать общественным пространством, так как вход туда обычно был закрыт для простых горожан [3]. Отчасти хозяйственная функция садов пока сохраняется — наряду с декоративными выращиваются и плодовые культуры, в прудах разводится рыба [23]. Тем не менее, основные сельскохозяйственные угодья отделились от города.

Технологии строительства парков, скверов, ирригационных систем, методы благоустройства переносились от города к городу и применялись по всей территории, освоенной Тимуридами. Мастеров, владеющих искусством орошения, садоводства, зодчества, строительства принудительно собирали со всех покорённых территорий, чтобы использовать их знания и опыт [9].

С конца XVII века с упадком династии Тимуридов пришло время смуты и узбекских завоеваний. Города приходили в упадок, противостояние беков и ханов в вопросах владения водой приводило к расстройству ирригационных систем [7]. Некоторые крупные города были полностью заброшены, сельскохозяйственные угодья покинуты. Эта участь не миновала даже Самарканд, который в начале XVIII века не имел жителей в течение 7 лет [24]. Говорить о развитии или даже поддержании ирригационных сооружений в тот период не приходится — дошедшая до нас литература упоминает лишь стагнацию тех времён. И только к концу XVIII века установилась относительно прочная власть узбекских завоевателей в Хивинском, Бухарском и Кокандском ханствах [7]. Города начинают вновь расцветать и возрождаться.

Характерные черты этапа:

- разнообразие орошаемых элементов: их площади, орошаемых культур, методов их орошения;
- практически полное отделение от города сельскохозяйственных угодий;
- намечающееся разделение питьевого и оросительного водоснабжения;
- организация накопления воды;
- рекреационная функция водоёмов.

Схема орошения города эпохи Тимуридов представлена на рис. 5.

Этап 4. Российская империя: город рядом с городом.

4-й этап пришёл благодаря российским инженерам. В XIX веке Российская империя активно осваивает Туркестан. Часто русские города вырастали не на месте, а рядом с туземными, по образу и подобию российских уездных городов [25]. Такое явление можно было отметить в Ташкенте, Самарканде, Намангане, Катта-Кургане [26]. Российские планировщики привносят европейский стиль в структуру озеленения города и увеличивают разнообразие озеленённых территорий: появляются бульвары, скверы, аллеи [23]. Сады и парки становятся общественным достоянием [26].

¹ Де Клавихо Р.Г. *Дневник путешествия в Самарканд ко двору Тимура (1403-1406)*. Москва: Наука; 1990. <https://www.klex.ru/z5g> (дата обращения: 19.03.2026).

² Захир ад-Дин Муххамад Бабур. *Бабур-Наме. Записки Бабура (1483-1530)*. Ташкент: ЦК Компартии Узбекистана; 1958.

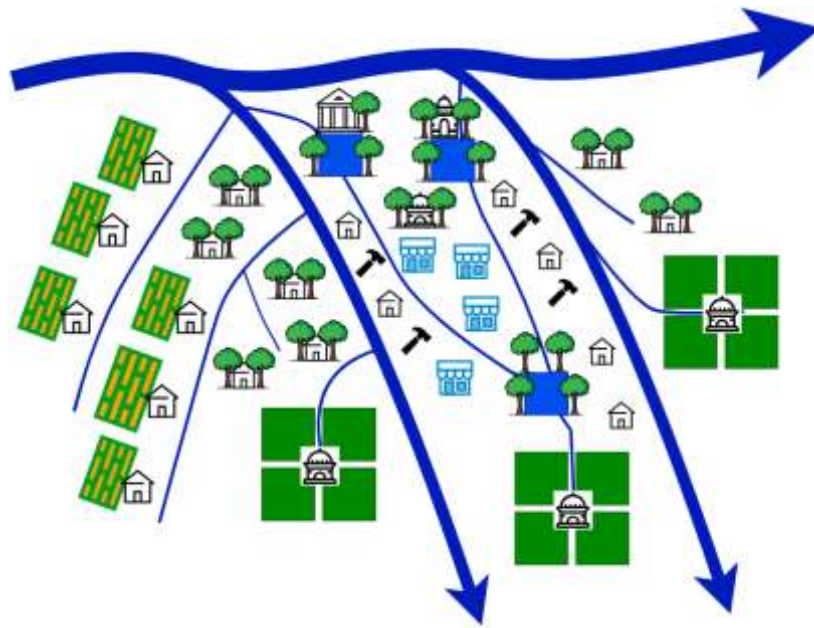


Рис. 5. Схема орошения города при Тимуридах с хаузами и водохранилищем для излишков воды

Русские переселенцы экспериментируют с породами растений: ищут засухоустойчивые; завозят издалека тополь, берёзу, сирень. Технологии орошения же перенимаются у местных жителей: вдоль аллей и бульваров прокладываются арыки [25], для подъёма воды на крутой берег применяются чигири [27]. Ирригационные сети и озеленение интегрируются в облик города на этапе генерального плана [26].

Адаптируя технологии, российские уездные чиновники приняли важное направление: избавление от болезней стоячей воды [26]. Тиф, лихорадка, паразитарные заболевания были проблемой многих городов Туркестана [8], и, по воспоминаниям путешественников, каждый город мог похвастаться локальным возбудителем. По этой причине началось совершенствование сетей, пересмотр уклонов арыков, но самое главное — в некоторых городах стали устраивать централизованный питьевой водопровод, отдельный от оросительного. По мнению М.И. Исмаилова, это усугубило санитарное состояние оросительного водопровода, очистке которого теперь уделялось меньше внимания [7].

Также весьма важным шагом для российских администраций некоторых городов стало примирение арычной сети и проезжей части; проблему наведения мостов через городские арыки осветил археолог А. Мирбабаев [28].

Таким образом, этап ознаменовался:

- разделением городской среды на «переселенческую» и «туземную»;
- увеличением разнообразия видов орошаемых территорий в «переселенческой» части при неизменности ландшафтной организации «туземной» части;
- развитием новых озеленённых общественных пространств по европейскому образцу, вследствие засушливости климата орошаемых по азиатским технологиям;
- активизацией разделения питьевого и оросительного водопровода.

Схема орошения двухчастного города имперского Туркестана представлена на рис. 6.

Этап 5. Советский период: город орошается по плану.

5-й этап охарактеризовался сочетанием советского планового градостроительства и автоматизации.

Советские градостроители перехватили эстафетную палочку уличного орошения и озеленения. Вновь активно используется регулярная сетка улиц, благоприятствующая строительству арычной сети. Арычная сеть закладывается вместе с новыми улицами и становится их неотъемлемой частью.

Однако не все традиционные элементы советские градостроители взяли на заметку. Так, несмотря на усилия историка М.Е. Массона по изучению и популяризации сардоб [29], сардобы более не применялись. Вскоре они были полностью забыты как элемент инженерной инфраструктуры. Карызы с восхождением новых технологий добычи подземных вод утратили актуальность.

Если до этого в настоящей статье «типичные» города каждой эпохи можно было принимать лишь с оговорками, так как параллельно существовало множество вариантов планировки, то советская стандартизация позволяет нам говорить о полноправной типовой ситуации. В пределах советской части Центральной Азии города целенаправленно становились всё более похожими друг на друга.

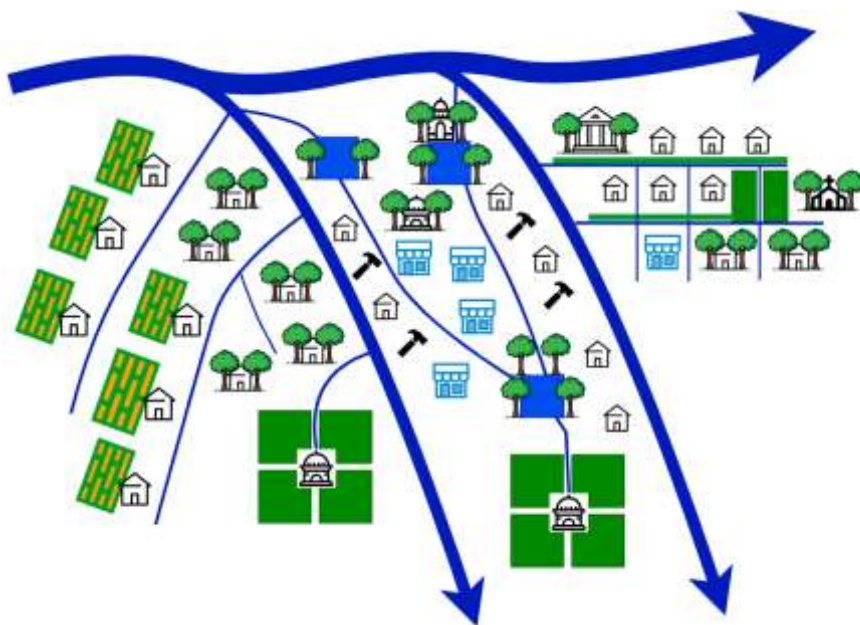


Рис. 6. «Город рядом с городом» середины XIX века

Советский город поглощал союз туземного и уездного городов. Уравнивались условия жизни. Продолжилась, и даже радикализировалась, санитарная борьба, в ходе которой уничтожались хаузы как «рассадники заразы». Так, в Бухаре в рамках борьбы с паразитарными заболеваниями были разобраны 114 хаузов, а восстановить после этого удалось всего три; аналогичная ситуация наблюдалась и в Самарканде [7, 8]. В результате ликвидации резервуаров пострадала и питавшаяся от них арычная сеть [7].

Разделение поливной и питьевой систем охватывало всё больше населённых пунктов, причём для питьевой применялись закрытые трубопроводы, а для полива предпочтение отдавалось арычной сети. Разделение происходит и на уровне городских служб: теперь питьевым водопроводом занимаются «горводоканалы», а арычной сетью — предприятия, в обязанности которых входит озеленение города. Питьевое и бытовое водопользование получают централизованную систему бытовой канализации, тогда как арычная поливная сеть сама по себе остаётся канализацией для ливневых и других поверхностных сточных вод.

В 60-х годах началась микрорайонная застройка. Микрорайоны стали наиболее озеленёнными территориями городов. Арычная сеть прокладывалась вдоль всех проездов. Здесь же, в микрорайонах, в 70-х годах возродилось определённое подобие хаузов — теперь это были небольшие бассейны во дворах. Питьевая функция у таких бассейнов отсутствует: они предназначены для купания в жаркую погоду и улучшения микроклимата внутридворовых территорий [30].

В городах, где была необходимость накопления воды, начали возводить бассейны суточного и декадного регулирования (БСР, БДР). Это были крупные необлицованные водоёмы, которые могли иметь и рекреационную функцию. Бассейны включались в ирригационную сеть и регулярно подвергались очистке [5].

Во второй половине XX в. (70 — нач. 90-х гг.) появился интерес к проектам комплексного озеленения и обводнения, и в 80-х годах в документы территориального планирования входит «городской природный каркас» [31]. Эту идею центральноазиатские государства постарались сохранить и позднее: генеральный план Бишкека от 2005 года наследовал «городской природный каркас» из генерального плана Фрунзе от 1970-го года.

В конце 80-х в крупных городах началась автоматизация городских систем полива. Предполагалась централизованная диспетчеризация. Заслонки на каналах снабжались электроприводами. Технические новинки были внедрены в Алма-Ате и Фрунзе.

К концу XX века города выглядели привычным для современного жителя образом: арык на каждой улице, питьевая вода от центрального водопровода в каждой квартире, выделенная подземная канализационная сеть, разнообразие зелёных насаждений и обширные озеленённые пространства.

Обобщим характерные черты пятого этапа:

- нормативное и конструктивное обособление городской ирригации от прочих видов водопользования;
- охват ирригационной сетью всей площади города;
- применение технологий диспетчеризации и автоматизации в управлении поливом.
- почти полная утрата сардоб и хаузов.

Схема орошения советского города представлена на рис. 7.

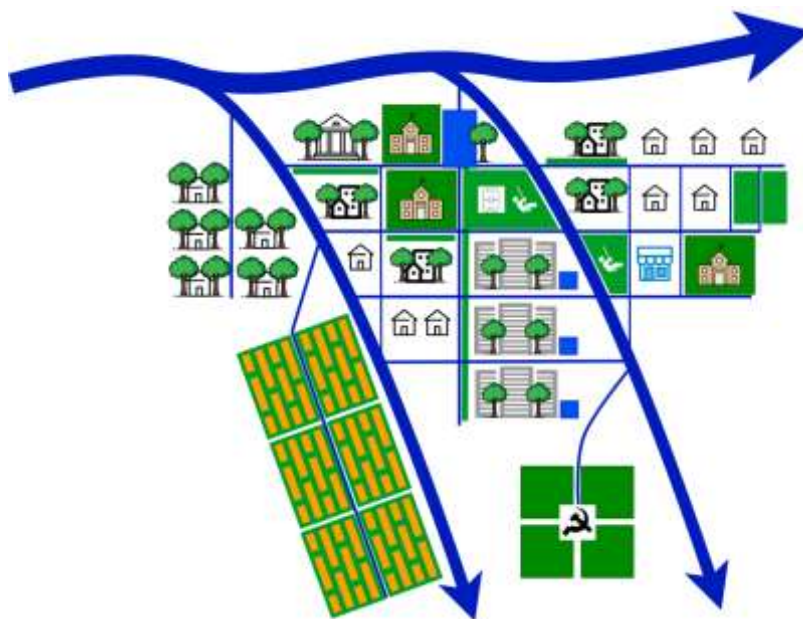


Рис. 7. Ортогональная сеть каналов с БСР и бассейнами-купальнями

Этап 6: Современный этап

Последний, современный этап, набирает силу с обретением независимости стран Центральной Азии. В нём сочетается влияние современных градостроительных тенденций и экономических реалий молодых республик.

На сегодняшний день в крупных городах Кыргызстана и Таджикистана наращивает темпы процесс выхода зон усадебной застройки за пределы городской черты. Это происходит под влиянием двух факторов: сноса под многоэтажную застройку в черте города и самозахвата земель на окраинах вследствие внутренней миграции [32]. Таким образом, современный город постепенно вновь получает своеобразный «рабад» с однородным видом водопотребителя — приусадебным участком, огородом. При этом в городской черте доля общественных территорий, орошаемых городской централизованной системой ирригации, продолжает расти. Поскольку в большинстве своём общественные пространства подотчётны муниципалитету, растёт возможность рационализации водопотребления.

Тем временем рационализация водопотребления становится всё актуальнее с изменением климата. Уже сегодня по всей территории Центральной Азии наблюдается рост количества тепловых волн [33], внутригодовое перераспределение количества осадков и объёма стока рек [34, 35]. Указанные факторы неизбежно повлияют на методы водопользования [5].

При этом в настоящее время в городской ирригации практически не используются современные методы орошения. Хотя сельскохозяйственная ирригация во всех странах Центральной Азии использует широкий спектр методов орошения, включая спринклерное и капельное, города продолжают использовать преимущественно арычное орошение. Капельное орошение можно найти лишь на экспериментальных городских площадках. В Алматы и Бишкеке в отдельных частях города используется централизованное спринклерное орошение, но его доля в общем оросительном водопотреблении невелика [5].

В то же время молодые республики Центральной Азии всё больше уделяют внимания айдентике, поиску собственного культурного пути. Они находятся в поиске собственной истории, вырабатывают самоидентификацию и стремятся отразить это в архитектурно-планировочных решениях [36, 37]. В этом свете традиционные методы орошения становятся элементом городской айдентики. Ирригацию как элемент культурно-исторического наследия рассматривают в Самарканде [38, 39]. В Навои предлагается реставрация сардоб в качестве объекта культурно-исторического наследия [40], а в Бухаре каналы, водохранилища и сардобы уже зарегистрированы и поддерживаются как объекты культурного наследия [41]. В Оше восстанавливают чигирное орошение для сохранения исторической среды памятника Всемирного Наследия Сулайман-Тоо [42].

Характерными чертами современного этапа становятся:

- постепенный выход приусадебных хозяйств из городской черты и, как следствие, тенденция к исключению приусадебного орошения из системы городского полива;
- попытки рационализации водопотребления, поиск новых методов орошения;
- тенденция к откату в технологиях автоматизации и диспетчеризации в управлении городской ирригационной сетью;
- поиск новой айдентики в арычном орошении.

Современный этап нельзя считать завершённым — его характерные черты находятся в процессе формирования, и поэтому его актуальная схема пока приближена к схеме пятого этапа (рис. 7).

В результате работы были выделены исторические границы этапов развития городской ирригации и орошаемых городских пространств со времён зарождения земледельческих поселений в Центральной Азии. Для каждого этапа определены характерные черты. Для всех этапов, кроме современного, составлены схемы орошения города.

Обсуждение и заключение. Хотя современные методы орошения зелёных насаждений в городах Центральной Азии очень похожи на методы, применявшиеся две тысячи лет назад, сфера их применения изменилась кардинально. Технологии разведения сетей, водораспределения и полива принципиально не менялись веками, однако менялась структура городской ткани и вместе с ней — основные абоненты. В результате исследования мы можем выделить базис, в котором развивалась городская ирригация:

1) от орошения для получения урожая к орошению для целей благоустройства;

2) от полифункциональности городских водопроводных систем к разделению на обособленные монофункциональные системы;

3) от орошения для личных целей к орошению для общественных нужд.

Последний процесс продолжается и сегодня, как продолжается и эволюция городской среды.

Пройдя многовековой путь развития в симбиозе с городской средой, арычные сети остаются неотъемлемой частью образа города и претендуют на право называться культурно-историческим наследием оседлых народов Центральной Азии.

Однако, чтобы сохранить их функциональность с учётом изменяющегося климата, необходимы значительные адаптационные мероприятия, позволяющие учесть изменение стока рек и его последствия. В этом аспекте целесообразно вернуться к технологиям накопления и сбережения воды в открытых и закрытых городских водохранилищах (хаузах и сардобах) с применением современных методов предотвращения избыточной фильтрации и развития болезнетворных организмов.

Наиболее активное развитие городских орошаемых пространств происходило в периоды сильных межкультурных взаимодействий: арабские завоевания (VIII век), эпоха Тимуридов (XIV–XVI вв.) и период Российской империи (вторая половина XIX в.), что указывает на важность культурного обмена для распространения технологий. Вероятно, при разработке адаптационных мер следует обратиться к опыту территорий с исторически похожим климатом: Аравийский полуостров, Калифорния, север Индии, центральная часть Китая. К опыту Центральной Азии, в свою очередь, могут обратиться и города из регионов, в которых климат изменяется в сторону засушливого. Вероятно, централизованное городское орошение может стать мерой адаптации там, где ранее оно не применялось.

Список литературы/References

1. Грошев В.А. *Ирригация Южного Казахстана в Средние века*. Алма-Ата: Наука; 1985. 156 с. URL: <https://archo-lib.kz/personali/g/groshev-viktor/irrigacziya-yuzhnogo-kazaxstana-v-srednie-veka.html> (дата обращения: 19.03.2026).

Groshev VA *Irrigation of Southern Kazakhstan in the Middle Ages*. Alma-Ata: Nauka; 1985. 156 p. (In Russ.) URL: <https://archo-lib.kz/personali/g/groshev-viktor/irrigacziya-yuzhnogo-kazaxstana-v-srednie-veka.html> (accessed: 19.03.2026)

2. Грошев В.А. *Древняя ирригация Юга Казахстана*. Алматы; 1996. URL: <http://www.cawater-info.net/library/rus/hist/groshev.pdf> (дата обращения: 19.03.2026).

Groshev VA *Ancient Irrigation in Southern Kazakhstan*. Almaty; 1996. (In Russ.). URL: <http://www.cawater-info.net/library/rus/hist/groshev.pdf> (accessed: 19.03.2026)

3. Камолитдин Ш.С. *Земледелие и садоводство у древних тюрков*. Ташкент: Extremum press; 2015. 496 с. URL: https://www.academia.edu/89042219/Земледелие_и_садоводство_у_древних_тюрков_Монография_Ташкент_Extremum_Press_2015_496_стр (дата обращения: 19.03.2026).

Kamoliddin Sh *Agriculture and Gardening among the Ancient Turks*. Tashkent: Extremum-Press; 2015. 496 p. (In Russ.) URL: https://www.academia.edu/89042219/Земледелие_и_садоводство_у_древних_тюрков_Монография_Ташкент_Extremum_Press_2015_496_стр (accessed: 19.03.2026)

4. Хидиров М.М. История развития водоснабжения в Центральной Азии. *Вестник Томского государственного университета*. 2024;509:197–203. <http://doi.org/10.17223/15617793/509/21>

Khidirov MM History of Water Supply Development in Central Asia. *Bulletin of Tomsk State University*. 2024;509:197–203. (In Russ.) <http://doi.org/10.17223/15617793/509/21>

5. Спирова А.Ю. Проблемы водопотребления для орошения зеленых насаждений города Бишкек. *Экология урбанизированных территорий*. 2024;2:83–91. <http://doi.org/10.24412/1816-1863-2024-2-83-91>

Spirova AYu Problems of Water Consumption for Irrigation of Green Spaces in Bishkek City. *Ecology of Urban Areas*. 2024;2:83–91. (In Russ.) <http://doi.org/10.24412/1816-1863-2024-2-83-91>

6. Исмаилов М.И. Ландшафтная организация на территории исторического Таджикистана в средние века и новое время. *Вестник Таджикского национального университета*. 2018;8:79–84. URL: <https://g.vestnik-tnu.com/vestnik/2018/Vestnik-2018-8.pdf#page=79> (дата обращения: 19.03.2026).

Ismailov MI Landscape Arrangement of the Territory of Historical Tajikistan in the Middle Ages and the New Time. *Bulletin of the Tajik National University*. 2018;8:79–84. (In Russ.) URL: <https://g.vestnik-tnu.com/vestnik/2018/Vestnik-2018-8.pdf#page=79> (accessed: 19.03.2026)

7. Исмаилов М.И. Некоторые вопросы ландшафтной организации и благоустройства в историческом развитии городов Средней Азии (на примере города Душанбе). *Политехнический вестник*. 2019;1(45):238–244. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_41214220_54332253.pdf (дата обращения: 19.03.2026).

Ismailov MI Some of the Issues of Landscape Organization and Improvement in the Historical Development of Cities of Central Asia (on Example of Dushanbe). *The Polytechnical Bulletin*. 2019;1(45):238–244. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_41214220_54332253.pdf (accessed: 19.03.2026)

8. Кочедамов В.И. Городские водоёмы Бухары и Самарканда. *Архитектурное наследие*. 1957;8:165–186. URL: <https://abashin.org/2024/08/19/kochedamov-v-i-gorodskie-vodoyomy-buhary-i-samarkanda/> (дата обращения: 19.03.2026).

Kochedamov VI Urban Reservoirs of Bukhara and Samarkand. *The Architectural Heritage*. 1957;8:165–186. (In Russ.) URL: <https://abashin.org/2024/08/19/kochedamov-v-i-gorodskie-vodoyomy-buhary-i-samarkanda/> (accessed: 19.03.2026)

9. Пугаченкова Г. *Зодчество Центральной Азии XV век*. Ташкент: Издательство литературы и искусства им. Гафура Гуляма; 1976. 117 с. URL: <https://abashin.org/wp-content/uploads/2024/11/pugachenkova1.pdf> (дата обращения: 19.03.2026).

Pugachenkova GA *Architecture of Central Asia in the 15th Century*. Tashkent: Gafur Gulyam Publishing House of Literature and Art. 1976. 117 p. (In Russ.) URL: <https://abashin.org/wp-content/uploads/2024/11/pugachenkova1.pdf> (accessed: 19.03.2026)

10. Пугаченкова Г.А. Садово-парковое искусство Средней Азии в эпоху Тимура и Тимуридов. *Труды Среднеазиатского государственного университета*. 1951;4(23):143–168. URL: <https://abashin.org/2024/06/18/pugachenkova-g-a-sadovo-parkovoe-iskusstvo-srednej-azii-v-epohu-timura/> (дата обращения: 19.03.2026).

Pugachenkova GA Garden and Park Art of Central Asia during the Era of Timur and the Timurids. *Proceedings of the Central Asian State University*. 1951;4(23):143–168. (In Russ.) URL: <https://abashin.org/2024/06/18/pugachenkova-g-a-sadovo-parkovoe-iskusstvo-srednej-azii-v-epohu-timura/> (accessed: 19.03.2026)

11. Мамаджанова С.М. О системе водоснабжения и о некоторых инженерных и производственных сооружениях XIX–XX вв. на территории Таджикистана. *Вестник ТГУПБП*. 2017;4:5–17. URL: <http://www.hum.vestnik.tj/ru/arhiv/arhiv2017/item/o-sisteme-vodosnabzheniya-i-o-nekotorykh-inzhenernykh-i-proizvodstvennykh-sooruzheniyakh-khikh-khkh-vv-na-territorii-tadzhikistana.html> (дата обращения: 19.03.2026).

Mamajanova SM On Water Supply System and some Engineering and Manufacturing Erections of the XIX-th – the XX-th Centuries on the Territory of Tajikistan. *Bulletin of TSU LBP. Series of Humanitarian Sciences*. 2017;4:5–17. (In Russ.) URL: <http://www.hum.vestnik.tj/ru/arhiv/arhiv2017/item/o-sisteme-vodosnabzheniya-i-o-nekotorykh-inzhenernykh-i-proizvodstvennykh-sooruzheniyakh-khikh-khkh-vv-na-territorii-tadzhikistana.html> (accessed: 19.03.2026)

12. Мухиддинова Р.К. *Формирование и развитие садово-паркового искусства на территории Таджикистана во второй половине XIX — начале XXI века*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры. Душанбе: Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими; 2024. URL: https://web.ttu.tj/uploads/disertats/80/dis_text.pdf (дата обращения: 19.03.2026).

Mukhiddinova RK *Formation and Development of Landscape Gardening in Tajikistan in the Second Half of the XIXth – Early XXIst Centuries*. Dissertation for the degree of Candidate of Architecture. Dushanbe: Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi; 2024. (In Russ.) URL: https://web.ttu.tj/uploads/disertats/80/dis_text.pdf (accessed: 19.03.2026)

13. Ниязов Дж. Традиционные ирригационные сооружения Центральной Азии (на примере Таджикистана). *Земледелец*. 2013;2:73–75. URL: <https://www.cawater-info.net/zeravshan/pdf/niyazov.pdf> (дата обращения: 19.03.2026).

Niyazov J Traditional Irrigation in Central Asia, Tajikistan Study. *Zemledelets*. 2013;2:73–75. (In Russ.) URL: <https://www.cawater-info.net/zeravshan/pdf/niyazov.pdf> (accessed: 19.03.2026)

14. Gafurov B.G. Kushan civilisation and world culture. In: *Proceedings of the international conference on the history, archaeology and culture of Central Asia in the Kushan period*. Dushanbe; 1968. Pp. 71–80. https://www.academia.edu/81278719/Центральная_Азия_в_кушанскую_эпоху_Т_И_М_1974?uc-g-sw=6038782 (дата обращения: 19.03.2026).

Gafurov BG Kushan Civilisation and World Culture. *Proceedings of the International Conference on the History, Archaeology and Culture of Central Asia in the Kushan Period*. Dushanbe; 1968. Pp. 71–80. (In Russ.)

URL: https://www.academia.edu/81278719/Центральная_Азия_в_кушанскую_эпоху_Т_I_M_1974?uc-g-sw=6038782 (accessed: 19.03.2026)

15. Омельченко А.В. К характеристике расселения жителей Кеша в кон. IV в. до н. э. — IV в. н. э. *Археология и история Центральной Азии*. 2004;118–121. URL: https://n.ziyouz.com/books/uzbeklib_ru/literary_po_istorii_tjurkskih_narodov/Arheologiya%20i%20istorija%20Sentralnoj%20Azii.pdf (дата обращения: 19.03.2026).

Omelchenko AV On the Characterisation of the Settlement of the Inhabitants of Kesh in the Late IVth Century BC – IVth Century AD. *Archaeology and History of Central Asia*. 2004;118–121. (In Russ.) URL: https://n.ziyouz.com/books/uzbeklib_ru/literary_po_istorii_tjurkskih_narodov/Arheologiya%20i%20istorija%20Sentralnoj%20Azii.pdf (accessed: 19.03.2026)

16. Воличенко О.В., Кариев Б.С. Парадигма градостроительства Центральной Азии доисламского периода. *Современное промышленное и гражданское строительство*. 2021;17(3):135–145. URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2021-3/01_volichenko_kariev.pdf (дата обращения: 19.03.2026).

Volichenko OV, Kariev BS The Paradigm of Urban Planning in Central Asia of the Pre-Islamic Period. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2021;17(3):135–145. (In Russ.) URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2021-3/01_volichenko_kariev.pdf (accessed: 19.03.2026)

17. Беленицкий А.М., Бентович И.Б., Большаков О.Г. *Средневековый город Средней Азии*. Ленинград: Наука; 1973. 393 с.

Belenitsky AM, Bentovich IB, Bolshakov OG *Medieval City in Central Asia*. Leningrad: Nauka; 1973. 393 p. (In Russ.)

18. Анарбаев А. *Благоустройство средневекового города Средней Азии (V—начало XIII в.)*. Ташкент: Фан; 1981. 120 с. URL: <https://abashin.org/2025/06/27/anarbaev-a-blagoustrojstvo-srednevekovogo-goroda-srednej-azii> (дата обращения: 19.03.2026).

Anarbaev A *Improvement of the Medieval City in Central Asia (Vth–Early XIIIth Century)*. Tashkent: Fan; 1981. 120 с. (In Russ.) URL: <https://abashin.org/2025/06/27/anarbaev-a-blagoustrojstvo-srednevekovogo-goroda-srednej-azii> (accessed: 19.03.2026)

19. Нарбаев К. Раннесредневековая модель города. *Известия вузов (Кыргызстан)*. 2013;5:39–43. URL: <http://www.science-journal.kg/en/journal/2/archive/3591> (дата обращения: 19.03.2026).

Narbaev K Early Medieval Model of the City. *Bulletin of the Universities (Kyrgyzstan)*. 2013;5:39–43. (In Russ.) URL: <http://www.science-journal.kg/en/journal/2/archive/3591> (accessed: 19.03.2026)

20. Калилова Н.Н. Краткий обзор сложения мусульманской архитектуры в Средней Азии в средние века. *Вестник БГУ*. 2011;1(18):8–10. URL: <https://bhu.kg/ru/arhiv-vestnika-bgu/> (дата обращения: 19.03.2026).

Kalilova NN A Brief Overview of the Development of Muslim Architecture in Central Asia in the Middle Ages. *Bulletin of BSU*. 2011;1(18):8–10. (In Russ.) URL: <https://bhu.kg/ru/arhiv-vestnika-bgu/> (accessed: 19.03.2026)

21. Рахимов К.Д., Файзуллаева Н.Н. Ландшафтное зодчество Мавераннахра в эпоху Амира Темура. *Вестник МИЦАИ*. 2017;25(1):77–107. URL: <https://iicas.int/ru/book/67> (дата обращения: 19.03.2026).

Rakhimov KD, Fayzullaeva NN The Landscape Architecture of Maverannahr in the Epoch of Amir Temur. *Bulletin of IICAS*. 2017;25(1):77–107. (In Russ.) URL: <https://iicas.int/ru/book/67> (accessed: 19.03.2026)

22. Зиливинская Э.Д. Благоустройство и санитария в золотоордынских городах. *АЕС*. 2022;3:196–203. <http://doi.org/10.24852/2587-6112.2022.3.196.203>

Zilivinskaya ED Amenities and Sanitation in Golden Horde Cities. *AEC*. 2022;3:196–203. (In Russ.) <http://doi.org/10.24852/2587-6112.2022.3.196.203>

23. Мукимова С.Р., Мухиддинова Р. К. История развития благоустройства Средней Азии во второй половине XIX — начале XX-го века. *Инженерный вестник Дона*. 2022;5:1–12. URL: <https://www.ivdon.ru/magazine/archive/n5y2022/7659> (дата обращения: 19.03.2026).

Mukimova SR, Mukhiddinova RK History of the Development of Improvement in Central Asia in the Second Half of the XIXth - Early XXth Centuries. *Engineering Bulletin of the Don*. 2022;5:1–12. (In Russ.) URL: <https://www.ivdon.ru/magazine/archive/n5y2022/7659> (accessed: 19.03.2026)

24. Бартольд В.В. К истории орошения Туркестана. В сб.: *Работы по исторической географии*. Москва: Восточная литература РАН; 2002. с. 95–233.

Bartold VV On the History of Irrigation in Turkestan. *Works on Historical Geography*. Moscow: Oriental Literature of the RAS. 2002. pp. 95–233 (In Russ.)

25. Струк К.А. Архитектура Средней Азии на фотографиях конца XIX века (по материалам фонда редких и ценных изданий ДВГНБ). *Культура и наука Дальнего Востока*. 2024;2(37):101–111. URL: <http://www.kulturanaukadv.ru/pdf/37/101-111.pdf> (дата обращения: 19.03.2026).

Struk KA Architecture of Central Asia in Photographs of the Late 19th Century (Based on Materials from the Collection of Rare and Valuable Publications of the FESSL). *Culture and Science of the Far East*. 2024;2(37):101–111. (In Russ.) URL: <http://www.kulturanaukadv.ru/pdf/37/101-111.pdf> (accessed: 19.03.2026)

26. Шацкая Т.В. Обводнение новых городов Центральной Азии второй половины XIX века. *Эпоха науки*. 2025;41:368–373. <http://doi.org/10.24412/2409-3203-2025-41-268-273>

Shatskaya TV The Flooding of New Cities in Central Asia in the Second Half of the XIXth Century. *The Age of Science*. 2025;41:368–373. (In Russ.) <http://doi.org/10.24412/2409-3203-2025-41-268-273>

27. Дингельштедт Н.А. Опыт изучения ирригации Туркестанского края. Сыр-Дарьинская область. Санкт-Петербург: Типография Министерства Путей Сообщения; 1893. 518 с.

Dingelstedt NA *Experience in Studying Irrigation in the Turkestan Region. Syr-Darya Region*. St. Petersburg: Printing House of the Ministry of Railways; 1893. 518 p. (In Russ.)

28. Мирбабаев А.К. Историческое наследие Худжанда. Душанбе: Ирфон; 1995. 160 с.

Mirbabaev AK *Historical Heritage of Khujand*. Dushanbe: Irfon; 1995. 160 p. (In Russ.)

29. Массон М.Е. Проблема изучения цистерн-сардоба. Ташкент: Комитет наук при СНК УзССР; 1935. 45 с. URL: <http://www.cawater-info.net/library/rus/masson-sardoba.pdf> (дата обращения: 19.03.2026).

Masson ME *The Problem of Studying Sardoba Cisterns*. Tashkent: Committee of Sciences at the Council of People's Commissars of the Uzbek SSR; 1935. 45 c. (In Russ.) URL: <http://www.cawater-info.net/library/rus/masson-sardoba.pdf> (accessed: 19.03.2026)

30. Римша А.Н. Градостроительство в условиях жаркого климата. Москва: Стройиздат; 1979. 312 с.

Rimsha AN *Urban Development in Hot Climates*. Moscow: Stroyizdat; 1979. 312 p. (In Russ.)

31. Жильцова О.К. Современное понятие «Городской природный каркас». Его развитие и осмысление. *Инновации и инвестиции*. 2023;2:150–154. URL: <https://innovazia.ru/archive/37902/> (дата обращения: 19.03.2026).

Zhiltsova OK Modern Concept "Urban Natural Framework". Its Development and Comprehension. *Innovations and Investments*. 2023;2:150–154. (In Russ.) URL: <https://innovazia.ru/archive/37902/> (accessed: 19.03.2026)

32. Исмаилов М. Особенности ландшафтной организации и благоустройства территорий городов в особых условиях республики Таджикистан (традиции и современность). Диссертация на соискание ученой степени кандидата архитектуры. Душанбе: Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими; 2024. URL: https://web.ttu.tj/uploads/disertats/75/dis_text.pdf (дата обращения: 19.03.2026).

Ismailov MI *Features of Landscape Organization and Improvement of Urban Territories in the Special Conditions of the Republic of Tajikistan (Traditions and Modernity)*. Dissertation for the Degree of Candidate of Science in Architecture. Dushanbe: Tajik Technical University named after Academician M. S. Osimi; 2024. (In Russ.) URL: https://web.ttu.tj/uploads/disertats/75/dis_text.pdf (accessed: 19.03.2026)

33. Белов Г.В., Касымова Р.О., Железняк А.У. Заболеваемость и смертность жителей г. Бишкек и г. Ош от болезней сердца и сосудов во время жарких дней и резких смен погоды. *Медицина Кыргызстана*. 2015;3:15–18.

Belov GV, Kasymova RO, Zheleznyak AU Morbidity and Mortality of Inhabitants of Bishkek and Osh from Heart Disease and Vessels during the Hot Days and a Sharp Change of Weather. *The Medicine of Kyrgyzstan*. 2015;(3):15–18 pp. (In Russ.)

34. Стрижанцева О.М. Оценка климатических параметров, влияющих на сток рек Кыргызстана. *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2022;9:43–50. <http://doi.org/10.26104/NNTIK.2023.38.83.009>

Strizhantseva OM Assessment of Climatic Parameters Affecting the Flow of Kyrgyz Rivers. *Science, New Technologies and Innovations in Kyrgyzstan*. 2022;9:43–50. (In Russ.) <http://doi.org/10.26104/NNTIK.2023.38.83.009>

35. Haag I, Jones PD, Samimi C Central Asia's Changing Climate: How Temperature and Precipitation Have Changed across Time, Space, and Altitude. *Climate*. 2019;7(10):1–19. <http://doi.org/10.3390/cli7100123>

36. Воличенко О.В. Тенденция развития архитектуры Центральной Азии. *Региональные архитектурно-художественные школы*. 2015;1:116–123. URL: https://nsuada.ru/files/reg_arh_hud_shkoly/SBORNIK_2015_v1.pdf (дата обращения: 19.03.2026).

Volichenko OV Trends in the Development of Architecture in Central Asia. *Regional Architectural and Artistic Schools*. 2015;1:116–123. (In Russ.) URL: https://nsuada.ru/files/reg_arh_hud_shkoly/SBORNIK_2015_v1.pdf (accessed: 19.03.2026)

37. Маматкулов Д.Д., Шарипова Х.А. К проблеме преемственности традиций в архитектуре и градостроительстве Узбекистана. В: *Материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ «Новые идеи нового века»*. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет; 2016. с. 219–222. URL: <https://togudv.ru/nionc/pub/articles/854/> (дата обращения: 19.03.2026).

Mamatkulov DD, Sharipova HA On the Problem of Continuity of Traditions in Architecture and Urban Development of Uzbekistan. *New Ideas of the New Century: Proceedings of the International Scientific Conference of the Pacific National University*. Khabarovsk: Pacific National University; 2016. p. 219–222. (In Russ.) URL: <https://togudv.ru/nionc/pub/articles/854/> (accessed: 19.03.2026)

38. Каюмов Х.И. Проблемы сохранения архитектуры исторической среды древнего города и развитие туризма. *Интернаука*. 2021;1(196):6–10. URL: <https://www.internauka.org/journal/science/internauka/196> (дата обращения: 19.03.2026).

Kayumov HI Problems of Preserving the Architecture of the Historical Environment of the Ancient City and the Development of Tourism. *Internauka*. 2021;1(196):6–10. (In Russ.) URL: <https://www.internauka.org/journal/science/internauka/196> (accessed: 19.03.2026)

39. Fozilova Z.Q. Irrigation System of Samarkand City. *Journal of Engineering, Mechanics and Modern Architecture*. 2023;2(2):64–68. URL: <https://jemma.innovascience.uz/index.php/jemma/article/view/28> (дата обращения: 19.03.2026).

40. Хайдаров О.З. Современное состояние историко-архитектурных памятников в Навоийской области. *Journal of marketing, business, and management*. 2025;4(1):53–59. URL: <https://goo.su/qn6YHMW> (дата обращения: 19.03.2026).

41. Khaidarov OZ Current State of Historical and Architectural Monuments in the Navoi Region. *Journal of Marketing, Business and Management*. 2025;4(1):53–59. (In Russ.) URL: <https://goo.su/qn6YHMW> (accessed: 19.03.2026)

42. Kilichov M, Dávid LD Tourism-Oriented Spatial Analysis of Tangible Cultural Heritage in Bukhara (Uzbekistan). *For Geo*. 2025;39(2):268–291. <http://doi.org/10.23917/forgeo.v39i2.10235>

Об авторах:

Спирова Антонина Юрьевна, соискатель Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) (630008, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113) [ORCID](#), nspiry@gmail.com

Карелин Дмитрий Викторович, кандидат архитектуры, доцент, заведующий кафедрой градостроительства и городского хозяйства Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) (630008, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113), [ORCID](#), d.karelin@sibstrin.ru

Заявленный вклад соавторов:

А.Ю. Спирова: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, поиск и анализ источников, составление схем и картографического материала, подготовка текста, формирование выводов.

Д.В. Карелин: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка терминологии.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Antonina Yu. Spirova, PhD Candidate of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (113 Leningradskaya Str., Novosibirsk, 630008, Russian Federation) [ORCID](#), nspiry@gmail.com

Dmitriy V. Karelin, Cand.Sci. (Architecture), Associate Professor, Head of the Department of Urban Planning and Urban Economy, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (113 Leningradskaya Str., Novosibirsk, 630008, Russian Federation), [ORCID](#), d.karelin@sibstrin.ru

Claimed contributorship:

AYu Spirova: formation of the basic concept, aims of the study, search and analysis of the sources, drawing up the diagrams and cartographic material, preparing the manuscript, making the conclusions.

DV Karelin: scientific supervision, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the terminology.

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 19.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 22.03.2026

Принята к публикации / Accepted 08.04.2026

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 625.76

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-97-106>

Остаточный ресурс дорожных одежд на автомобильных дорогах с высокой интенсивностью движения

А.Н. Тиратурян  ✉, М.Э.Р. Абделаал 

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

✉ tiraturjan@list.ru



EDN: BOCKDU

Аннотация

Введение. Актуальной задачей в области содержания автомобильных дорог является объективная оценка их остаточного ресурса. Существующие методы часто носят субъективный характер или требуют сложных процедур. Целью данной работы является разработка нового подхода к такой оценке, основанного на инструментальных измерениях.

Материалы и методы. Объектом исследования выступают дорожные одежды автомобильных дорог. В основе метода лежит модель, связывающая величину упругого прогиба покрытия с расчетным числом циклов нагружения до исчерпания прочности. Прогиб измерялся с помощью установки ударного нагружения (Falling Weight Deflectometer). Методика позволяет адаптировать модель к разным условиям путем калибровки коэффициентов.

Результаты исследования. На основе предложенной модели создана четырехуровневая шкала состояния дорожной одежды по величине остаточного ресурса: нормативное, удовлетворительное, предостказное и критическое. Для повышения надежности оценки в качестве расчетного значения для точки замера используется медианное значение ресурса, а для характеристики всего участка — его средневзвешенная величина.

Обсуждение и заключение. Разработанный подход позволяет давать количественную оценку остаточного ресурса на основе инструментальных данных. Внедрение данной методики повысит объективность диагностики и поможет оптимально планировать ремонтные работы. Перспективы исследования связаны с дальнейшей адаптацией модели для различных дорожно-климатических условий.

Ключевые слова: упругий прогиб, остаточный ресурс, FWD, средневзвешенная оценка, жесткие дорожные одежды, категория состояния дорожной одежды, дефекты покрытия

Для цитирования. Тиратурян А.Н., Абделаал М.Э.Р. Остаточный ресурс дорожных одежд на автомобильных дорогах с высокой интенсивностью движения. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2026;5(2):97–106. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-97-106>

Original Empirical Research

Residual Resource of Road Surfacing on High-Traffic Roads

Artem N. Tiraturjan  ✉, Mohamed Elsayed Ragab Abdelaal 

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

✉ tiraturjan@list.ru

Abstract

Introduction. An urgent task facing the field of road maintenance is an objective assessment of their residual resource. The existing methods are typically subjective or require that complex procedures are carried out. The aim of the study is to develop a new approach to such an assessment based on instrumental measurements.

Materials and Methods. The object of the study is road surfacing of highways. The method is based on a model that relates the amount of elastic deflection of the coating to the estimated number of loading cycles until the strength has

been exhausted. Deflection was measured using a Falling Weight Deflectometer. The technique allows one to adapt the model to a variety of conditions by calibrating the coefficients.

Research Results. Based on the suggested model, a four-level scale of the condition of the road surface has been designed according to the size of the residual resource: a normative, satisfactory, pre-maintenance and critical one. In order to increase the reliability of the estimate, the median value of the resource is used as the calculated value for the measuring point, and its weighted average value is used to characterize the entire site.

Discussion and Conclusion. The developed approach makes it possible to quantify the residual resource based on instrumental data. Implementing this technique would increase the objectivity of diagnostics and assist optimal repair planning. The prospects of the study are related to the further adaptation of the model for a variety of road and weather conditions.

Keywords: elastic deflection, residual resource, FWD, weighted average estimate, non-rigid road surfacing, road surfacing condition category, coating defects

For citation. Tiratourjan AN, Abdelaal MER Residual Resource of Road Surfacing on High-Traffic Roads. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):97–106. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-97-106>

Введение. Управление состоянием дорожных конструкций — одно из наиболее ответственных направлений в области дорожного хозяйства. Оно требует четко установленных критериев и правил назначения видов и сроков ремонтных работ, а также их планирование по годам. Учитывая большие экономические затраты, направляемые на поддержание сетей дорог в требуемом состоянии, этот вопрос решается, как правило, на основе предварительно проведенной инструментальной оценки. Однако подходы к интерпретации результатов инструментальной оценки в различных странах и источниках сильно разнятся в зависимости от исторического опыта проектирования и конструирования дорожных одежд автомобильных дорог, а также инструментальной базы, традиционно применяемой в разных странах и регионах.

В целом все виды управленческой деятельности в области управления состоянием дорожных одежд можно разделить на два вида — сетевой и проектный. Сетевой уровень предполагает общую оценку состояния дорожных одежд, прогнозирование изменения их состояния в течение срока эксплуатации, прогнозирование остаточного ресурса и их срока службы, формирование планов работ по содержанию, ремонту и капитальному ремонту, а также расчет затрат в течение жизненного цикла при различных режимах эксплуатации с выбором наиболее оптимального. На проектном уровне решаются задачи расчета и конструирования дорожных одежд в рамках уже принятого решения о капитальном ремонте или реконструкции, и даются экономические оценки для детально разработанного проектного решения [1, 2].

Основные задачи, решаемые на каждом уровне управления состоянием дорожных одежд, определяют виды моделей, лежащих в их основе. Так, для сетевого уровня управления состоянием применяются преимущественно феноменологические модели, базирующиеся на концепции теории надежности, теории вероятности и математической статистики. Проектный уровень предполагает, как правило, использование структурных моделей, в основе которых лежат положения механики деформируемого твердого тела, механики разрушения, мезомеханики [3–5].

Оценка состояния автомобильных дорог на сетевом уровне осуществляется на основе большого количества различных показателей, применяемых в различных системах управления состоянием дорожных одежд (PMS). Подробное описание данных показателей приводится в [6, 7]. В частности, в работе [6] все показатели состояния дорожных одежд разделяются на эксплуатационные, структурные и комбинированные. Эксплуатационные показатели ориентированы на фактическую продольную ровность покрытия дорожных одежд. Наиболее известными из них являются: используемый во всем мире показатель продольной ровности покрытия IRI; показатель RCI (ride comfort index); показатель RN (ride number); показатель PSR (pavement serviceability rating); в некоторых случаях для оценки продольной ровности используют аналог IRI, называемый PI (profile index).

Наиболее распространенным структурным показателем, используемым на сетевом уровне, является структурное число, рассчитываемое исходя из модуля упругости грунта и эквивалентного числа проходов одиночной оси (ESAL). Зависимость для определения фактического структурного числа имеет вид:

$$S_{n,eff} = 0,4728(D_0 - D_{1,5H_p})^{-0,4810} H_p^{0,7581},$$

где D_0 — упругий прогиб в центре нагружения; $D_{1,5H_p}$ — упругий прогиб, зарегистрированный на расстоянии, равном $1,5H_p$; H_p — толщина дорожной одежды.

В качестве аналога структурного числа можно привести определяемый в Российской Федерации на этапе проектирования минимальный требуемый общий модуль упругости E_{min}^{TP} :

$$E_{min}^{TP} = \sqrt{\frac{p}{600}} \lg(\sum N_{act}) - 3,55,$$

где p — расчетное давление на поверхности покрытия (800 кПа); $\sum N_{act}$ — суммарное число приложений расчетной нагрузки.

Комбинированные показатели объединяют в себе несколько индексов, характеризующих продольную ровность покрытия и дефекты на покрытии. В некоторых случаях комбинируют показатели, характеризующие эксплуатационное состояние и структурные показатели. В качестве примера можно привести индекс качества дорожного покрытия (PQI). Он включает в себя индекс структурной адекватности (SAI), индекс разрушения поверхности (SDI) и индекс комфортности езды (RCI). Ключевым моментом в построении комбинированного индекса является структурированная техника для сбора экспертных мнений. По сути, это калибровка, результат которой должен быть статистически надежным и лишенным систематических ошибок. В разных регионах зависимости для определения данного показателя могут отличаться. Так, например, расчет показателя PQI по методике MnDOT [8, 9] (департамента транспорта Миннесоты) рассчитывается по формуле:

$$PQI = \sqrt{RQI \cdot SR},$$

где RQI — индекс комфортности езды; SR — рейтинг покрытия (surface rating).

Так как показатель RQI оценивается в диапазоне 0–5, а SR — в диапазоне 0–4, то итоговая оценка по показателю PQI может принимать значения в диапазоне от 0–4,5.

В целом нужно сказать, что все описанные показатели позволяют эффективно характеризовать текущее состояние дорожной одежды, однако их увязка со сроком службы представляет собой достаточно сложную задачу, зачастую решаемую субъективно.

Ключевым понятием в управлении состоянием дорожных одежд на сетевом уровне является понятие остаточного ресурса / срока службы дорожной одежды (в более современной формулировке — остаточного срока обслуживания). Остаточный ресурс определяется как количество циклов приложений нагрузок или количество лет до момента наступления отказа дорожной одежды по какому-либо критерию. С 2014 года с момента выхода документа [10] вместо термина остаточный ресурс в дорожную практику пришло понятие remaining service life (RSL) [11–15], которое характеризует остаточный срок до выполнения определенного вида работ, которыми могут являться как работы по превентивному содержанию, так и работы по ремонту и капитальному ремонту автомобильных дорог.

Основными методами и моделями для прогнозирования RSL выступают модели, базирующиеся на практиках проектирования, или же эмпирические модели. Говоря о моделях, базирующихся на практике проектирования, основной приоритет отдается моделям, приведенным в документе Mechanistic empirical pavement design guide (MEPDG). Данные модели позволяют определять остаточную величину ESAL, исходя из модели работоспособности асфальтобетона на усталостное разрушение и модели прогнозирования накопления колес¹ [16–18].

Допустимое количество приложений нагрузок при заданном режиме деформирования асфальтобетонного покрытия рассчитывается по формуле:

$$N_{fi}(\varepsilon_i) = C_f K_{f1} \varepsilon_i^{K_{f2}} E^{K_{f3}},$$

где $N_{fi}(\varepsilon_i)$ — количество циклов приложений расчетной нагрузки, определяемое исходя из величины растягивающей деформации на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев ε_i ; C_f — калибровочный фактор, определяемый исходя из результатов полевых и лабораторных измерений; K_{f1} — эмпирический параметр в стандартной модели, $K_{f1} = 1,2$; K_{f2} — эмпирический параметр в стандартной модели, $K_{f2} = -3,291$; K_{f3} — эмпирический параметр в стандартной модели, $K_{f3} = -0,854$.

Модель прогнозирования остаточного ресурса по накоплению колес на поверхности асфальтобетона представляется в виде:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = K_1 10^{-3,4488 T^{1,5606} N^{0,479244}},$$

где ε_p — пластическая составляющая деформации сжатия в слоях асфальтобетона; ε_r — упругая деформация сжатия в слоях асфальтобетона, рассчитываемая по модели упругого слоистого полупространства; T — температура в градусах Фаренгейта; N — суммарная нагрузка за период эксплуатации в ESAL.

Достоинством этих моделей является их хорошая калибровка и возможность гибкой подстройки под условия региона проектирования за счет большого числа эмпирических коэффициентов. Недостаток — реализация методики

¹ Руководство по механистически-эмпирическому проектированию дорожных покрытий: практическое руководство. Вашингтон: AASHTO; 2020. 600 p. URL: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/hmec/pubs/module_e/participant_workbook.pdf (дата обращения: 01.03.2026).

MEPDG требует наличия большого числа исходных данных, которые на этапе эксплуатации автомобильной дороги зачастую отсутствуют. Как правило, это значительно нивелирует высокую точность и эффективность данных моделей.

К эмпирическим подходам для прогнозирования RSL можно отнести построение кривых выживаемости, применение метода пропорциональных рисков (Failure Cox Proportional Hazard), применение вероятностных и статистических моделей, таких как модели Байеса, цепи Маркова, использование моделей линейной и нелинейной регрессии [19–22]. К более современным подходам можно отнести применение искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов [23–25].

В целом же следует отметить, что несмотря на многообразие подходов на текущий момент прогнозирование остаточного ресурса является достаточно актуальной задачей. С одной стороны, методы прогнозирования должны базироваться на измеримых параметрах состояния, присутствующих в системе диагностики автомобильных дорог каждого региона и страны. С другой стороны, модель для прогнозирования остаточного ресурса должна быть достаточно универсальной и хорошо калибруемой для различных условий. Помимо этого, важно отметить, что автомобильная дорога, являясь линейно-протяженным объектом, характеризуется значительной неоднородностью и, как следствие, непрерывным изменением значений остаточного ресурса по каждому характерному участку. В этом случае большое значение имеет выработка подхода к определению значения величины остаточного ресурса, эффективно и информативно характеризующей участок автомобильной дороги в целом.

Материалы и методы. Ресурс автомобильной дороги целесообразно выражать в виде числа приложений расчетной нагрузки за ее срок службы. Расчетный ресурс автомобильной дороги определяется как:

$$\sum N_{calc} = 0,7 f_{lane} \frac{K_{sum}}{q^{T_l-1}} T N_{calc} k_n,$$

где f_{lane} — коэффициент полосности, характеризующий процент транспортного потока, движущегося по наиболее загруженной полосе движения; K_{sum} — коэффициент суммирования; T_l — срок службы; T — количество расчетных дней в году; N_{calc} — интенсивность движения в расчетных осях на 1 год срока службы; k_n — коэффициент, учитывающий отклонение фактического транспортного потока от прогнозируемого; q — коэффициент прироста интенсивности движения.

$$N_{calc} = \sum N_i k_i,$$

где N_i — интенсивность движения i группы транспортных средств; k_i — коэффициент приведения транспортного средства к расчетной осевой нагрузке 115 кН.

Учитывая, что в основе данной зависимости лежит представление о возрастании интенсивности движения по закону геометрической прогрессии, количество циклов нагружения, фактически испытанное дорожной конструкцией, может быть определено на любой год эксплуатации автомобильной дороги в виде значения фактической наработки дорожной одежды — $\sum N_{act}$. В этом случае ее остаточный ресурс может быть рассчитан в виде $\sum N_{resid}$:

$$\sum N_{resid} = \sum N_{calc} - \sum N_{act}.$$

Недостатком такого подхода является отсутствие связи между фактическим остаточным ресурсом, выражаемым в виде числа циклов приложений расчетной нагрузки, и фактическим структурным состоянием дорожной одежды. Данный недостаток может быть преодолен путем переформулирования зависимости в виде:

$$\frac{pD(1-\mu^2)}{l} = \sqrt{\frac{p}{600}} 98,65 (\lg(\sum N_{act}) - 3,55),$$

$$l = \frac{pD(1-\mu^2)}{113,91(\lg(\sum N_{act}) - 3,55)},$$

$$\sum N_{act} = 10^{\frac{pD(1-\mu^2)}{113,91l} + 3,55}.$$

В связи с тем, что зависимость (1) описывает проектное изменение фактического суммарного числа приложений расчетной нагрузки от начального до некоторого предельно допустимого состояния дорожной конструкции, аналогичное изменение связано и с увеличением упругого прогиба на поверхности конструкции. Таким образом, исходя из фактического упругого прогиба, зарегистрированного на поверхности дорожной одежды, возможно напрямую определить значение фактической наработки дорожной одежды, и, как следствие, остаточного ресурса. Однако основная проблема заключается в том, что автомобильная дорога, являясь протяженным объектом, не может быть охарактеризована единым значением упругого прогиба, модуля упругости либо любой другой характеристикой. Ниже представлен ряд результатов регистрации упругого прогиба на автомобильных дорогах общего пользования, принадлежащих к федеральной и региональной сети дорог (рис. 1).

Как видно на представленных рисунках, упругий прогиб характеризуется достаточно большим разбросом по линейной протяженности участка. Так, например, коэффициент вариации составляет $C_v = 0,16$ (рис. 1а), $C_v = 0,55$ (рис. 1б), $C_v = 0,47$ — для третьего участка.

В рамках данной работы в качестве показателя, на основе которого определяется остаточный ресурс протяженного участка, предлагается использовать средневзвешенную оценку, определяемую исходя из значения фактического упругого прогиба, зарегистрированного на поверхности, вида:

$$\bar{x} = \frac{\sum \omega_i \alpha_i}{\sum \omega_i}$$

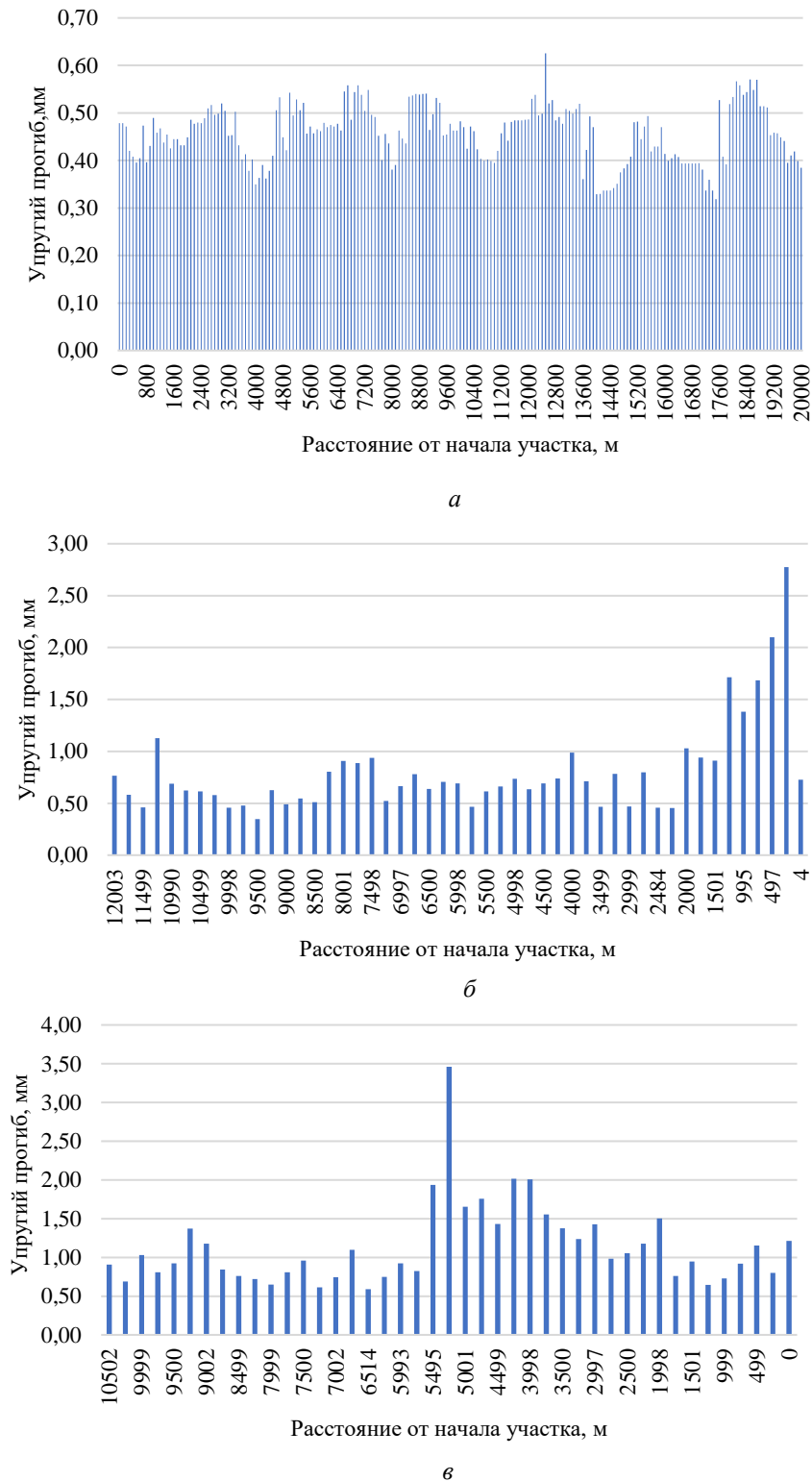


Рис. 1. Фактические измерения упругого прогиба на участках эксплуатируемых автомобильных дорог: а — автомобильная дорога I категории федерального значения, б — автомобильная дорога II категории федерального значения, в — дорога IV категории регионального значения

В качестве весового параметра α_i принимается длина участка, находящаяся в нормативном, удовлетворительном, неудовлетворительном состоянии по величине остаточного ресурса, а вместо ω_i принимается непосредственно величина фактической наработки дорожной конструкции:

$$\sum N_{act} = \frac{\sum N_{act}^i l_i}{\sum l_i}.$$

Таким образом, основной задачей для применения данного подхода является ранжирование участков по четырем уровням в зависимости от величины фактической наработки. Для решения этой задачи целесообразно построить регрессионную модель между значениями фактической наработки и эксплуатационным состоянием дорожной одежды. Данная зависимость была построена на основе испытаний на 60 участках автомобильных дорог (рис. 2). Для регистрации чаши прогиба использовался дефлектометр падающего груза FWD Primax 1500, для регистрации дефектов на поверхности покрытия — диагностическая лаборатория с блоком камер панорамной съемки.

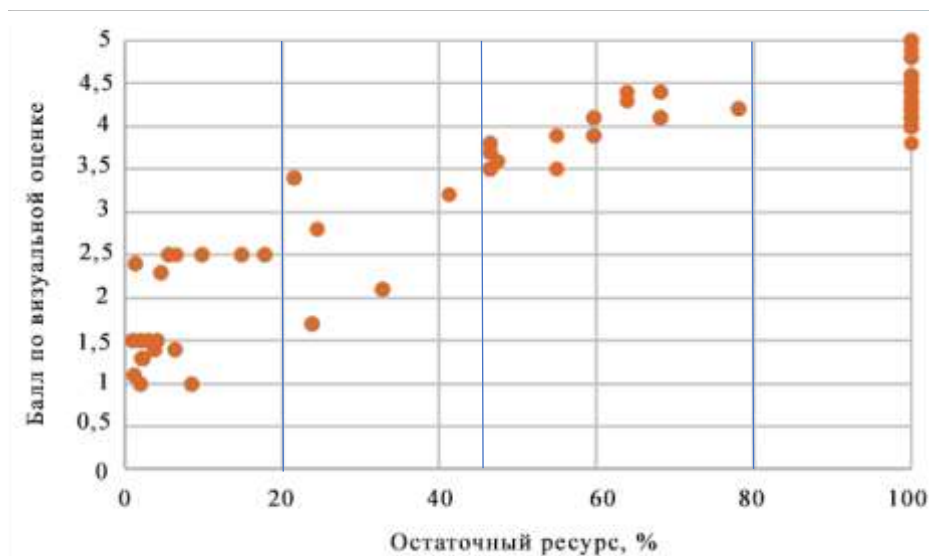


Рис. 2. Зависимость остаточного ресурса от состояния покрытия

По визуальной оценке среднему баллу 1–2,5 соответствует наличие таких дефектов как: сетки трещин площадью покрытия от 30 до 90 % протяженности полосы наката, частые выбоины, одиночные сетки трещин, колея глубиной более 4 см. Среднему баллу 2,5–3,5 соответствуют дефекты на покрытии в виде продольных боковых трещин, частых поперечных трещин, колеи глубиной 2–3 см. К дефектам, оцениваемым средним баллом 3,5–4,5, относятся дефекты в виде редких поперечных трещин, а к дефектам, оцениваемым выше 4,5 баллов, относят незначительные дефекты в виде одиночных поперечных трещин, продольной центральной технологической трещины.

Итоговая таблица связи между величиной остаточного ресурса и соответствующей категорией состояния дорожной одежды на участке имеет следующий вид (таблица 1).

Таблица 1

Классификация состояния дорожной одежды по величине остаточного ресурса

Остаточный ресурс	Категория состояния
< 20 %	Критическое
20–45 %	Предотказное
45–80 %	Удовлетворительное
> 80 %	Нормативное

Непосредственно в формулу расчета средневзвешенной оценки подставляется медиана каждого интервала значений остаточного ресурса как величина, не подверженная выбросам и экстремальным значениям.

В зависимости от средневзвешенной оценки состояния участка принимается решение об управляющих воздействиях для продления срока эксплуатации либо обеспечения нормативного межремонтного срока службы. В качестве таких мероприятий могут быть выполнены: работы по содержанию дороги с выбором вида слоев износа и защитных слоев, наносимых на покрытие дорожной одежды; ремонтные работы с локальным усилением слоев

основания либо только с заменой изношенных слоев покрытия; работы по капитальному ремонту, предполагающие полную или частичную разборку конструкции дорожной одежды.

Результаты исследования. Предлагаемый в данной работе подход к оперативной оценке остаточного ресурса дорожных одежд автомобильных дорог по данным инструментальных измерений упругого прогиба на их поверхности был реализован на ряде участков автомобильных дорог с высокой интенсивностью движения. На всех этих участках значения упругого прогиба характеризовались большой неоднородностью, что затрудняло выбор и назначение управленческих решений по срокам и видам ремонтных работ. Ниже представлены результаты инструментальных исследований, и рассчитаны средневзвешенные значения остаточного ресурса по обследованным участкам федеральных автомобильных дорог с высокой интенсивностью движения (таблица 2).

Таблица 2

Оценка остаточного ресурса на участке автомобильной дороги на различных участках автомобильной дороги М4 «ДОН»

Участок	Остаточный ресурс по фактическому состоянию дорожной конструкции							
	км 492 + 000–517 + 000							
Направление	Прямое				Обратное			
	< 20 %	20–45 %	45–80 %	> 80 %	< 20 %	20–45 %	45–80 %	> 80 %
Остаточный ресурс								
% протяженности участка, соответствующего значениям остаточного ресурса	0	2	5	93	2	0	0	98
Медиана	—	26	67	88	10	—	—	90
Итоговое значение	85,71				88,4			
	км 877 + 000–892 + 000							
% протяженности участка, соответствующего значениям остаточного ресурса	16	16	6	61	6	10	0	84
Медиана	11	31	59	83	15	25	—	83
Итоговое значение остаточного ресурса	63,05				73,12			
	км 892 + 000–907 + 000							
% протяженности участка, соответствующего значениям остаточного ресурса	6	10	0	84	13	16	6	65
Медиана	17	24	—	91	7	24	55	83
Итоговое значение остаточного ресурса	79,86				62,00			
	км 354 + 000–365 + 000							
% протяженности участка, соответствующего значениям остаточного ресурса	8	18	2	71	42	28	10	20
Медиана	15	26	63	85	7	20	60	81
Итоговое значение остаточного ресурса	68,17				30,74			
	км 548 + 000–556 + 000							
% протяженности участка, соответствующего значениям остаточного ресурса	0	23	4	71	22	18	2	58
Медиана	—	33	72	84	9	31	53	83
Итоговое значение остаточного ресурса	71,54				56,76			
	км 1138 + 000–1146 + 000							
% протяженности участка, соответствующего значениям остаточного ресурса	46	54	0	0	55	37	8	0
Медиана	4	24	—	—	6	22	47	—
Итоговое значение остаточного ресурса	14,80				15,20			

Таким образом состояние обследованных участков может быть классифицировано:

- км 492 + 000–517 + 000 в прямом и обратном направлении — нормативное;
- км 877 + 000–892 + 000 в прямом и обратном направлении — удовлетворительное;
- км 892 + 000–907 + 000 в прямом и обратном направлении — удовлетворительное;

- км 354 + 000–365 + 000 в прямом направлении — удовлетворительное, в обратном направлении — предотказное;
- км 548 + 000–556 + 000 в прямом и обратном направлении — удовлетворительное;
- км 1138 + 000–1146 + 000 в прямом и обратном направлении — критическое.

С учетом полученных результатов были сформулированы рекомендации по восстановлению состояния на обследованных участках. Так, на участках, на которых было зафиксировано нормативное состояние, основным видом управляющих воздействий, оказываемых на дорожные конструкции, является устройство и последующее обновление слоев износа из щебеночно-мастичного асфальтобетона с периодичностью 4–5 лет. На участках с удовлетворительным состоянием также может быть реализована данная мера, но с учетом уменьшенного срока обновления слоев износа — в диапазоне 2–3 года. На участках предотказного состояния закладываются работы по ремонту покрытия с локальным усилением слоев основания. На участках, находящихся в критическом состоянии, необходимо выполнение работ по капитальному ремонту дорожной конструкции. Конкретные объемы и виды работ по восстановлению состояния дорожной одежды до требуемого эксплуатационного уровня определяются в ходе инженерных изысканий на проектном уровне, предполагающих определение модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды, выявление наиболее ослабленных элементов и соответствующие расчеты прочности дорожных конструкций.

Обсуждение и заключение. Предлагаемый подход является целесообразным при работе крупных организаций, реализующих управление состоянием вверенной им сети дорог. Существующая на текущий момент система назначения ремонтных работ на основе коэффициентов прочности, ровности и сцепления является чрезмерно жесткой, так как требует выполнения работ по капитальному ремонту при выполнении условия:

$$K_{пр} = I_{факт} / I_{тр} < 1.$$

где $K_{пр}$ – коэффициент прочности дорожной одежды; $I_{факт}$ – фактический упругий прогиб, регистрируемый при ударном нагружении; $I_{тр}$ – требуемое значение упругого прогиба для соответствующей категории дороги.

Системы прогнозирования остаточного срока службы, традиционно используемые в программном обеспечении установок ударного нагружения FWD, такие как PRIMAX, ELMOD и прочие, могут быть эффективно использованы на проектном уровне при подборе конструкции дорожных одежд. Однако в этом случае система подбора конструкций дорожных одежд должна быть ориентирована на расчет и прогнозирование усталостных разрушений в слоях асфальтобетона и пластических деформаций по полосам наката. Во всех остальных случаях прямое применение этих подходов также требует адаптации для условий каждого государства или региона.

Следует отметить, что применение данного подхода сравнительно эффективно в случае принятия и корректировки планируемых решений о видах и сроках ремонтных работ. Так, например, в случаях участка «км 354 + 000–365 + 000» вместо изначально рассматриваемого собственником данной дороги решения о выполнении обязательного капитального ремонта по обоим направлениям было принято решение о восстановлении слоев износа в прямом направлении и выполнении ремонта обратного направления автомобильной дороги. Также, в отличие от метода прогнозирования остаточного срока службы по кривым выживаемости, данный подход требует меньшего количества статистических данных и уточнений моделей по результатам набора статистики.

В работе приведена новая концепция оценки остаточного ресурса нежестких дорожных одежд на основе данных натурных измерений упругого прогиба в центре чаши прогиба установкой ударного нагружения FWD. Достоинством данной модели является ее универсализм и возможность адаптации к любой инструментальной базе диагностики, предполагающей применение установок ударного нагружения FWD.

Разработана шкала состояний дорожной одежды в зависимости от фактического остаточного ресурса, определенного на основе натурных измерений. В данной шкале впервые введено понятие предотказного состояния для дорожной одежды, которому соответствуют значения остаточного ресурса 20–45 %. В зависимости от состояния сформулированы рекомендации по видам управляющих воздействий, которые способны обеспечить сохранность дорожной конструкции.

Установлено соответствие между дефектами, наблюдаемыми на поверхности покрытия нежесткой дорожной одежды, и значениями остаточного ресурса, определяемыми по данным инструментальных измерений. Установлено, что критические дефекты на покрытии соответствуют значениям остаточного ресурса 0–20 %.

Список литературы/References

1. Pantuso A, Loprencipe G, Bonin G, Teltayev BB Analysis of Pavement Condition Survey Data for Effective Implementation of a Network Level Pavement Management Program for Kazakhstan. *Sustainability* 2019;11:901 <https://doi.org/10.3390/su11030901>.
2. Flora WF *Development of a Structural Index for Pavement Management: An Exploratory Analysis*. West Lafayette: Purdue University; 2009.

3. Fakhri M, Dezfoulian RS Pavement Structural Evaluation Based on Roughness and Surface Distress Survey Using Neural Network Model. *Construction and Building Materials*. 2019;204:768–780. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.142>
4. Tang F, Ma T, Zhang J, Guan Y, Chen L Integrating Three-Dimensional Road Design and Pavement Structure Analysis Based on BIM. *Automation in Construction*. 2020;113:103152. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103152>
5. Llopis-Castelló D, García-Segura T, Montalbán-Domingo L, Sanz-Benlloch A, Pellicer E Influence of Pavement Structure, Traffic, and Weather on Urban Flexible Pavement Deterioration. *Sustainability*. 2020;12:9717. <https://doi.org/10.3390/su12229717>
6. Haas R, Hudson R *Pavement Asset Management*. John Wiley & Sons; 2015. 432 p. <https://doi.org/10.1002/9781119038849>
7. Bryce J, Flintsch G, Katicha S, Diefenderfer B Enhancing Network-Level Decision Making through the Use of a Structural Capacity Index. *Transportation Research Record*. 2013;2366(1):64–70. <https://doi.org/10.3141/2366-08>
8. Calhoon T, Marasteanu M, McGrath S Are New Pavement Condition Indices Necessary for Long-Poor Pavements? *Transportation Research Record*. 2022;2676(11):186–193. <https://doi.org/10.1177/03611981221092004>
9. Hanandeh S Introducing Mathematical Modeling to Estimate Pavement Quality Index of Flexible Pavements Based on Genetic Algorithm and Artificial Neural Networks. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;16:e00991. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00991>
10. Elkins GE, Thompson T, Groeger J, Visintine BA, Rada GR *Reformulated Pavement Remaining Service Life Framework (Report No. FHWA-HRT-13-038)*. USA. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development.; 2013. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/13038/index.cfm> (accessed: 01.03.2026).
11. Kaya O, Citir N, Ceylan H, Kim S, Waid DR Development of Pavement Performance and Remaining Service Life Prediction Tools for Iowa Jointed Plain Concrete Pavement Systems. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. 2023;149(1):04022070. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.PVENG-1160>
12. Rada GR, Visintine BA, Bryce JM, Thyagarajan S, Elkins GE, Wheeler AF *Application and Validation of Remaining Service Interval Framework for Pavements (Report No. FHWA-HRT-16-053)*. USA: Federal Highway Administration; 2013. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/16053/index.cfm> (accessed: 01.03.2026).
13. Ekramnia T, Nasimifar M Development of a Methodological Tool for Treatment Prioritization in Network-Level Pavement Management System. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. 2022;148(1):04021069. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000329>
14. Das S, Siddagangaiah AK Multi-Objective Optimization of Imperfect Pavement Repair Policy: A Reliability-Based Approach. *Transportation Research Record*. 2022;2676(7):264–275. <https://doi.org/10.1177/03611981221077988>
15. Shahata K, El-Zahab S, Zayed T, Alfalah G Rehabilitation of Municipal Infrastructure Using Risk-Based Performance. *Automation in Construction*. 2022;140:104335. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104335>
16. Jannat G, Yuan XX, Shehata M Development of Regression Equations For Local Calibration of Rutting and IRI as Predicted by the MEPDG Models for Flexible Pavements Using Ontario’s Long-Term PMS data. *IJPE*. 2016;17:166–175. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.973024>
17. Islam KM, Gassman SL Predicting Flexible Pavement Distress and IRI Considering Subgrade Resilient Modulus of Fine-Grained Soils Using MEPDG. *Materials*. 2023;16:1126. <https://doi.org/10.3390/ma16031126>
18. Hurley CD *Asphalt Pavement Evaluation to Support the Calibration of the AASHTO MEPDG for South Carolina Conditions*. Master’s Thesis, Clemson University, Clemson, SC, USA; 2019. URL: https://open.clemson.edu/all_theses/3198/ (accessed: 01.03.2026).
19. Philip B, Jassmi HA A Bayesian Approach towards Modelling the Interrelationships of Pavement Deterioration Factors. *Buildings*. 2022, 12, 1039. <https://doi.org/10.3390/buildings12071039>
20. Attoh-Okine NO Probabilistic Analysis of Factors Affecting Highway Construction Costs: A Belief Network Approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2002, 2002;29:369–374. <https://doi.org/10.1139/102-003>
21. Hatoum AA, Khatib JM, Barraj F, Elkordi A Survival Analysis for Asphalt Pavement Performance and Assessment of Various Factors Affecting Fatigue Cracking Based on LTPP Data. *Sustainability*. 2022;14:12408. <https://doi.org/10.3390/su141912408>
22. Justo-Silva R, Ferreira A, Flintsch G Review on Machine Learning Techniques for Developing Pavement Performance Prediction Models. *Sustainability*. 2021;13:5248. <https://doi.org/10.3390/su13095248>
23. Elshamy MMM, Tiraturyan AN, Uglova EV, Zakari M Development of the Non-Destructive Monitoring Methods of the Pavement Conditions Via Artificial Neural Networks. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1614(1):012099. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012099>

24. Elshamy MMM, Tiraturyan AN Using Application of an Artificial Neural Network System to Backcalculate Pavement Elastic Modulus. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020;2:84–93. <https://doi.org/10.36622/vstu.2020.2.46.006>

25. Osman SA, Almoshaogeh M, Jamal A, Alharbi F, Al Mojil A, Dalhat MA Intelligent Assessment of Pavement Condition Indices Using Artificial Neural Networks. *Sustainability*. 2023;15(1):561. <https://doi.org/10.3390/su15010561>

Об авторах:

Тиратуриян Артем Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильных дорог Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), tiraturjan@list.ru

Абделаал Мохамед Эльсайед Рагаб, аспирант Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), mabdelaal@donstu.ru

Заявленный вклад соавторов:

А.Н. Тиратуриян: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

М.Э.Р. Абделаал: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Artem N. Tirturjan, D.Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Highways of the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 1344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), tiraturjan@list.ru

Mohamed Elsayed Ragab Abdelaal, PhD student, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 1344003, Russian Federation), [ORCID](#), mabdelaal@donstu.ru

Claimed contributorship:

AN Tirturyan: scientific supervision, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

MER Abdelaal: formation of the basic concept, aims of the research, calculations, preparation of the manuscript, 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.

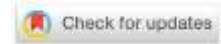
Поступила в редакцию / Received 10.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 24.03.2026

Принята к публикации / Accepted 05.04.2026

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 69:004.051

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-107-116>

Цифровой подход к управлению жизненным циклом малоэтажного объекта капитального строительства с тепло- и воздухообменом



EDN: WSUZEC

С.В. Федосов¹  , В.Н. Федосеев² , В.А. Воронов² 

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

² Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново, Российская Федерация

 fedosovsv@mgsu.ru

Аннотация

Введение. Актуальность применения воздушных тепловых насосов (ВТН) в условиях умеренно холодного климата России ограничена резким снижением их эффективности при низких температурах наружного воздуха. Цель статьи — представить цифровой подход к управлению жизненным циклом малоэтажных объектов капитального строительства на основе комбинированной теплонасосной системы с оптимизированным тепловоздухообменом.

Материалы и методы. Предложено техническое решение, включающее запатентованную камеру смешения, устанавливаемую в помещении котельной, которая обеспечивает подачу на испаритель ВТН воздушной смеси с расчетным температурным градиентом. Система интегрирована с приточно-вытяжной вентиляцией перекрестного типа (КПД 40–60 %) и управляется цифровым модулем на базе микропроцессора и ШИМ-регулятора. Математическое моделирование потоков выполнено с применением уравнений Бернулли и неразрывности. Для мониторинга и автоматического регулирования использован комплекс датчиков температуры и давления, обеспечивающий адаптивную работу компрессора, вентиляторов и резервного электродогревателя.

Результаты исследования. Экспериментальные данные подтвердили, что совместная работа ВТН с рекуператором и смесительной камерой позволяет поддерживать высокий коэффициент эффективности (COP) системы. Установлено, что порог экономической целесообразности сохраняется при температуре наружного воздуха до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре теплоносителя $+30\text{...}+45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разработанный алгоритм цифрового управления оптимизирует соотношение уличного и рециркуляционного воздуха, минимизируя теплопотери и электрические нагрузки.


Обсуждение и заключение. Внедрение предложенной цифровой модульно-функциональной схемы управления обеспечивает рациональный тепловоздухообмен, снижает габариты и стоимость инженерных коммуникаций, а также повышает энергоэффективность малоэтажных зданий. Разработанное решение может быть масштабировано для широкого диапазона климатических условий РФ, способствуя ресурсосбережению и продлению жизненного цикла объектов капитального строительства.

Ключевые слова: управление жизненным циклом; объекты капитального строительства; теплонасосные системы; цифровой двойник; имитационное моделирование

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

Для цитирования. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Воронов В.А. Цифровой подход к управлению жизненным циклом малоэтажного объекта капитального строительства с тепло- и воздухообменом. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2026;5(2):107–116. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-107-116>

Digital Approach to Lifecycle Management of a Low-Rise Capital Construction Facility with Heat and Air Exchange

Sergey V. Fedosov¹  , Vadim N. Fedoseev² , Vladimir A. Voronov² 

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

² Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

 fedosovsv@mgsu.ru

Abstract

Introduction. The relevance of using applying air-source heat pumps (ASHPs) in Russia's moderately cold climate conditions is restrained by a sharp decline in their efficiency at low outdoor air temperatures. The aim of this study is to present a digital approach to lifecycle management of low-rise capital construction facilities based on a combined heat pump system with optimized heat and air exchange.

Materials and Methods. A technical solution is set forth incorporating a patented mixing chamber installed in the boiler room to supply an air mixture with a calculated temperature gradient to the ASHP evaporator. The system is integrated with a cross-stream supply and exhaust ventilation (efficiency of 40–60%) and controlled by a digital module based on a microprocessor and PWM regulator. Mathematical modeling of streams was performed using the Bernoulli and continuity equations. For monitoring and automatic control, a set of temperature and pressure sensors was employed to ensure adaptive operation of the compressor, fans, and backup electric boiler.

Research Results. Experimental data have confirmed that the joint operation of the ASHPs with a heat recuperator and mixing chamber allows maintaining a high coefficient of performance (COP) of the system. It was found that the threshold of economic feasibility remains at an outdoor air temperatures of down to -15°C and heat carrier temperatures of $+30\dots+45^{\circ}\text{C}$. The developed digital control algorithm optimizes the ratio of outdoor to recirculating air minimizing heat losses and electrical loads.

Discussion and Conclusion. Implementation of the suggested digital modular and functional control scheme ensures rational heat and air exchange, reduces the size and cost of engineering utilities, and enhances the energy efficiency of low-rise buildings. The developed solution can be scaled for a broad range of climatic conditions nationwide contributing to resource conservation and extension of the lifecycle of capital construction facilities.

Keywords: lifecycle management; capital construction facilities; heat pump systems; digital twin; simulation modeling

Acknowledgments. The authors would like to thank the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the above comments making it possible to improve its quality.

For citation. Fedosov SV, Fedoseev VN, Voronov VA Digital Approach to Life Cycle Management of a Low-rise Capital Construction Facility with Heat and Air Exchange. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):107–116. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-107-116>

Введение. За последние годы в десятки раз возрос процент спроса на рынке воздушно-тепловых насосов (ВТН) в Европейских и Скандинавских странах, которые можно назвать умеренно холодными. В официальном рейтинге относительно холодных стран России принадлежит первое место. Поэтому актуальным остаётся вопрос о возможном и эффективном применении воздушных тепловых насосов в климатических условиях большей части РФ [1].

Необходимо отметить, что вопросами жизненного цикла объектов капитального строительства занимались известные ученые России [2–7] и Запада [8–14].

В современных условиях, продолжая традиции ресурсоэнергосбережения, актуальным становится разработка и практические решения применения ВТН на основе цифрового компьютерного управления.

Материалы и методы. Отличительной чертой применения ВТН является то, что в качестве источника низкопотенциального тепла используют окружающий воздух. В случае установки такого устройства на улице его использование становится слабо эффективным, особенно при низкой температуре наружного воздуха. Авторы предложили применить устройство — камеру смешения, встроенную в котельную [15], для подачи напора воздушной смеси на теплообменник — испаритель ВТН расчетного градиента температур (рис. 1).

Следует отметить, что работа камеры смешения ВТН является важным звеном для утилизированного смешения воздуха в испарителе.

Само устройство смешения воздушных потоков содержит входной патрубок воздуховода, патрубок для подачи дополнительного потока, участок смешенного потока. Патрубок для подачи дополнительного потока 2 расположен под углом в пределах $0^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$ к вертикали (рис. 1).

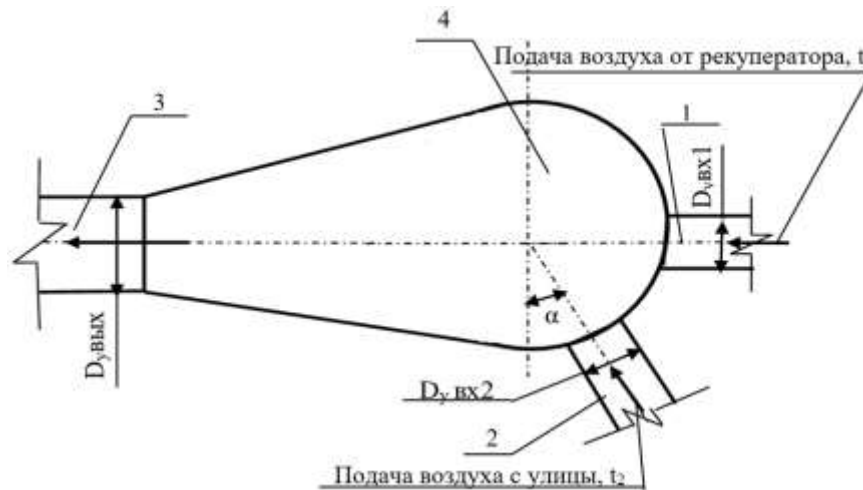


Рис. 1. Средство для смешения газовых потоков

Входной патрубок воздуховода соединен с камерой, выполненной в форме капсулы в виде полусферы, соединенной с большим основанием усеченного конуса. Диаметры входного патрубка воздуховода и патрубка для подачи дополнительного воздушного потока равны, каждый из которых относится к диаметру выходного патрубка воздуховода, который направлен на испаритель ВТН ($d_{вх1} = d_{вх2} = 0,7d_{вых}$).

Такая технология организации воздухосмешения позволяет повысить интенсивность равновесного перемешивания, тем самым улучшая условия теплообмена. Наибольшая интенсивность перемешивания смешенного потока происходит при попадании в зону усеченного конуса и камеры, а при попадании в цилиндрическую часть выходного патрубка воздуховода 3 гомогенизированным потоком совершается переход в ламинарное течение. Скорость гомогенизированного потока перед выходом в цилиндрическую часть выходного патрубка воздуховода 3 повышается до исходной скорости основного потока воздуховода 1, равной скорости потока до входа в полусферу 4 по уравнению Бернулли:

$$\frac{pv^2}{2} + pgh + p = const,$$

где $\frac{pv^2}{2}$ — динамическое давление; pgh — гидростатическое давление; p — статическое давление.

Рассматривая сечение входного патрубка воздуховода 1, патрубка для подачи дополнительного потока 2 и выходного патрубка воздуховода 3 с применением уравнения Бернулли, запишем:

$$\begin{aligned} \left(\frac{pv_{вх1}^2}{2} + p_{вх1}gh_{вх1} + p_{вх1} \right) + \left(\frac{pv_{вх2}^2}{2} + p_{вх2}gh_{вх2} + p_{вх2} \right) = \\ = \frac{pv_{вых}^2}{2} + p_{вых}gh_{вых} + p_{вых}. \end{aligned}$$

Так как давление $p_{вх1}$, $p_{вх2}$ и $p_{вых}$ на уровнях сечений входного патрубка воздуховода 1, патрубка для подачи дополнительного потока 2 и выходного патрубка воздуховода 3 равны атмосферному, т. е. $p_{вх1} = p_{вх2} = p_{вых}$, то уравнение будет иметь вид:

$$\left(\frac{pv_{вх1}^2}{2} + p_{вх1}gh_{вх1} \right) + \left(\frac{pv_{вх2}^2}{2} + p_{вх2}gh_{вх2} \right) = \frac{pv_{вых}^2}{2} + p_{вых}gh_{вых}.$$

Из уравнения неразрывности:

$$\frac{v_{вх}}{v_{вых}} = \frac{S_{вх1} + S_{вх2}}{S_{вых}},$$

где $S_{вх1}$, $S_{вх2}$, $S_{вых}$ — площади поперечных сечений, а $v_{вх} = v_{вых}$.

Тогда $S_{вх1} + S_{вх2} = S_{вых}$. Выразив диаметры $\frac{\pi d_{вх1}^2 + \pi d_{вх2}^2}{4} = \frac{\pi d_{вых}^2}{4}$, получим:

$$d_{вх1}^2 + d_{вх2}^2 = d_{вых}^2.$$

По заданным условиям $d_{вх1}$ и $d_{вх2}$ равны между собой, в качестве примера обозначим: $d_{вх1} = d_{вх2} = 0,2$ м.

Тогда:

$$d_{вых} = \sqrt{d_{вх1}^2 + d_{вх2}^2} = \sqrt{0,2^2 + 0,2^2} = 0,28 \text{ м.}$$

Получим соотношение $\frac{d_{вх}}{d_{вых}} = \frac{0,2}{0,28} = 0,7$.

Тогда:

$$d_{вх1} = d_{вх2} = 0,7d_{вых}$$

Предложенное средство позволяет повысить равновесную интенсивность перемешивания, улучшая условия теплообмена.

В исследованиях процесса воздухообмена авторами разработана комбинированная теплонасосная система теплоснабжения, включающая смесительную камеру, схему воздухообмена с элементом рекуперации и дополнительным ТЭНом, управляемым электронно-импульсным регулятором (ШИМ-регулятор) (рис. 2).

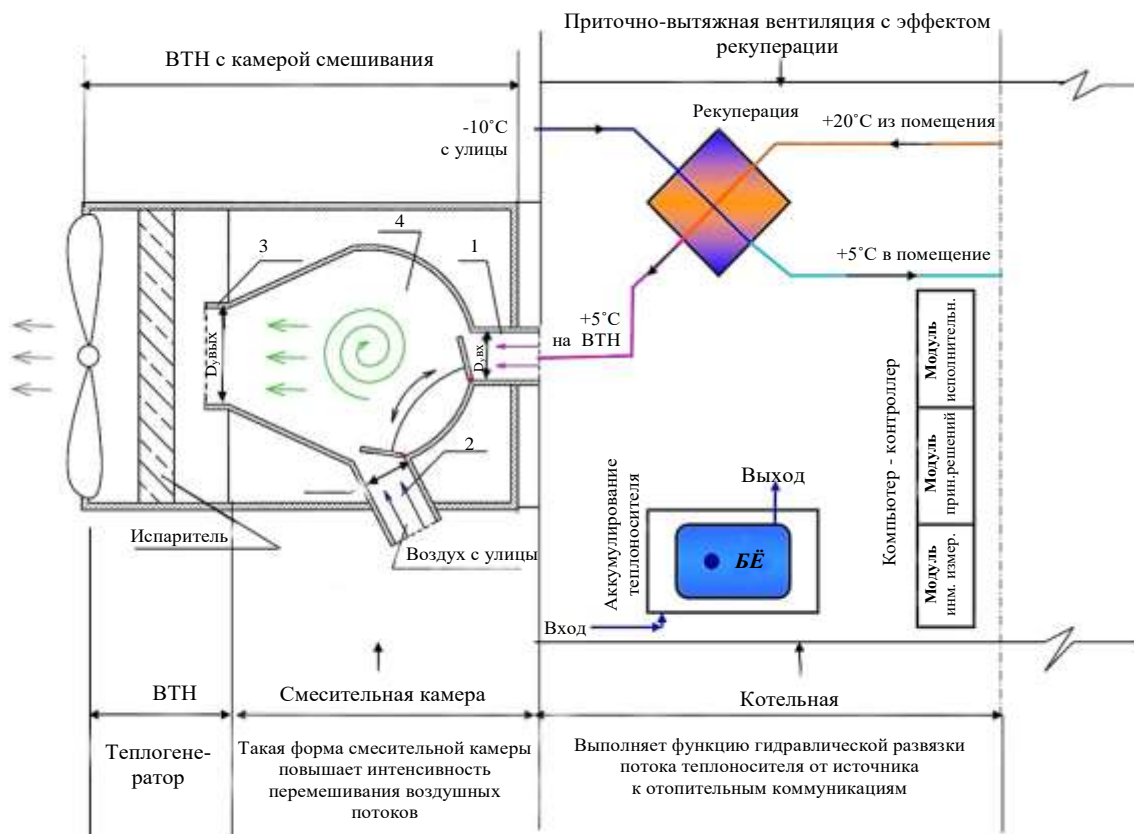


Рис. 2. Комбинированная теплонасосная система теплоснабжения со смесительной камерой, схемой воздухообмена с элементами рекуперации

Режим работы ВТН в условиях умеренно холодного климата в этом случае остается длительное время с достаточно высоким коэффициентом эффективности (COP), получая сигнал от цифровой модели управления теплообменом данной системы теплоснабжения.

Рассматривая такую специфику режима воздухообмена ВТН с элементом рекуперации, определяем функциональные возможности системы теплообмена, работающей через котельную и воздуховоды помещения. Существующая традиционная естественная вытяжная вентиляция, устанавливаемая сегодня в частных домах, квартирах, современных строениях не эффективна, так как при установке герметичных пластиковых стеклопакетов и использовании высокотеплоизоляционных материалов приток воздуха сильно сокращается, в результате чего вытяжная система работает неэффективно.

Результаты исследования. В основе данной работы предлагается использовать приточно-вытяжную вентиляционную систему, в которой заложен принцип рекуперации, то есть процесс, при котором из отработанного воздуха возвращается часть тепла.

Покидая помещение, тёплый воздух частично нагревает встречный холодный поток в теплообменной системе и согласно конфигурации выходит как отработанный по направляющим воздуховода в смесительную камеру на испаритель и далее — через ВТН на улицу, а в помещение попадает частично уже нагретый рекуперационный воздух.

В таких условиях, исходя из основной цели создания энергоэффективного отопления, получаем систему воздухообмена экономически выгодную для теплогенератора ВТН.

То есть, как пример, подбирая рекуператор с КПД $\eta = 50\%$, получаем температуру смешенного потока воздуха, подаваемого на испаритель (рис. 3).

Для практического расчета эффективной температуры подаваемого смешанного воздуха на испаритель теплого насоса применяем инженерный метод расчета, основанный на влиянии процентного соотношения температур по формуле «улица–помещение». Воспользуемся решением для частного случая из уравнения сохранения

теплового баланса для определения температуры относительно теплого потока воздуха, удаляемого из помещения и подаваемого на испаритель ВТН (рис. 3).

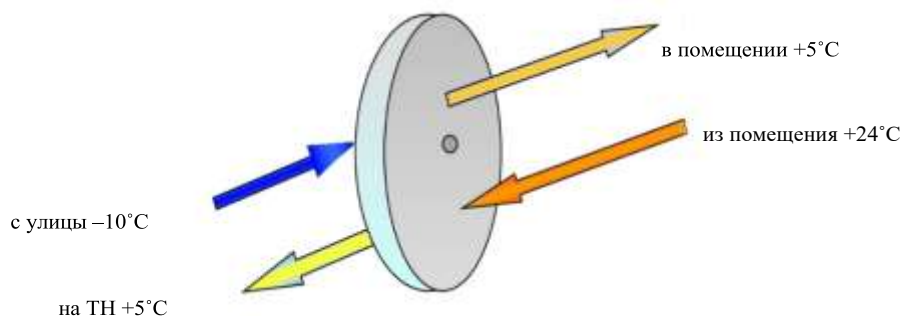


Рис. 3. Изменение величины температуры воздушных потоков в воздуховодах с рекуперацией

Посылая информацию в модуль управления работой смесительной камеры, микропроцессор программно обеспечивает соответствующее текущее решение.

$$\frac{\eta \cdot t_1 + \eta \cdot t_2}{100} = \frac{50 \cdot 24^\circ\text{C} + 50 \cdot (-10^\circ\text{C})}{100} = \frac{(1200 - 500)^\circ\text{C}}{100} = 7^\circ\text{C}$$

где $t_1 = 24^\circ\text{C}$ — температура в помещении, $t_2 = -10^\circ\text{C}$ — температура наружного воздуха.

В Финляндии, например, до приема в эксплуатацию воздуховода с рекуперацией после испытаний оперируют годовым коэффициентом регенерации, который сохраняется для г. Хельсинки и Лапландии.

При совместной работе ВТН и приточно-вытяжной вентиляции со встроенными элементами рекуперации технические параметры системы должны соответствовать:

1. Диаметр подключаемого воздуховода, применяемого для наших условий — 125 мм.
2. Количество подключаемых воздуховодов с ВТН — 4.
3. Эффективность рекуперации тепла (η) от 40 % до 60 %.
4. Тип рекуперации — перекрёстного типа.
5. Материал пластины рекуперации — полимеризированная целлюлоза.

Конструктивно рекуператор располагается в замкнутом помещении теплового узла (котельной) с привязкой с одной стороны воздуховодами к ВТН на испаритель, с другой — обеспечивает через воздуховоды помещение слегка нагретым свежим воздухом (рис. 4).

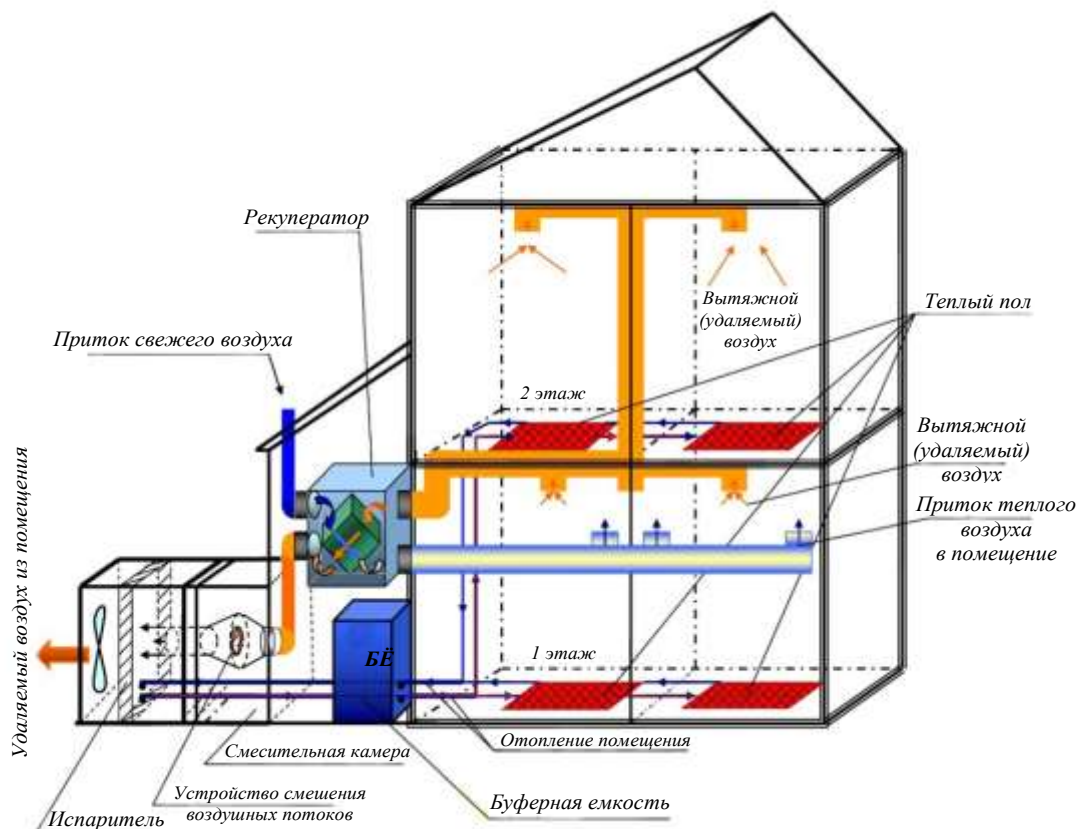


Рис. 4. Эффективная система воздухообмена ВТН

Технология использования такой конфигурации воздуховодов с рекуперацией позволяет обеспечить эффективный рост тепловой мощности ВТН в режиме отопления помещений с умеренно холодным климатом.

Согласно проведенных испытаний, на графике (рис. 5) представлено, насколько эффективнее работает рециркуляционный тепловой насос с элементом рекуперации и встроенной смесительной камерой. «Порог» экономии (убытков) не наступает до температуры воздуха на улице $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре теплоносителя (вода) от $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

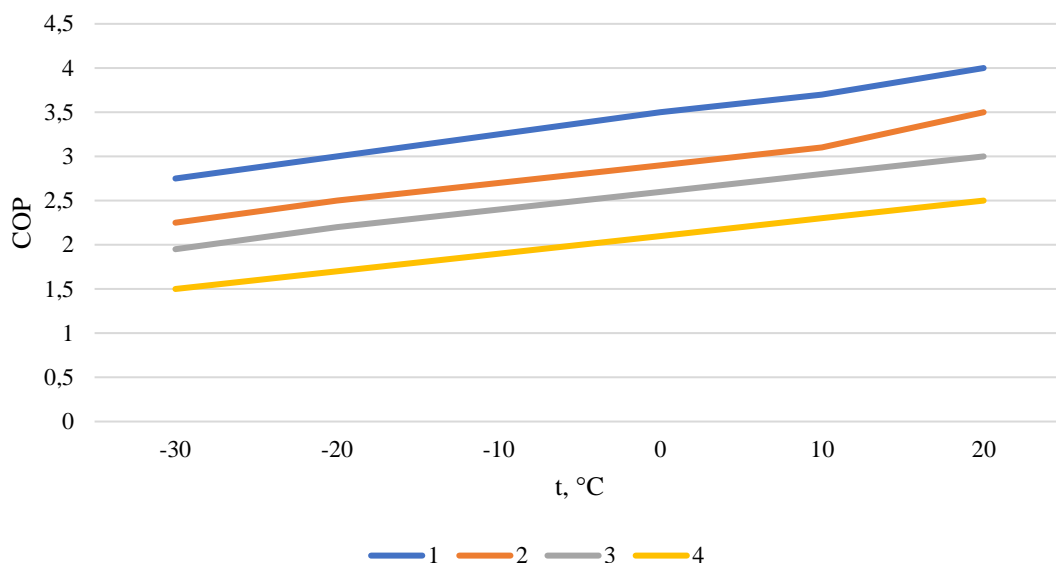


Рис. 5. График результата работы теплообменной теплонасосной системы экспериментального объекта при наружных температурах: 1 — $30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — $35\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 — $40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 — $45\text{ }^{\circ}\text{C}$

Буферная накопительная емкость в такой комбинированной отопительной системе выполняет функцию гидравлической развязки объемных потоков источника тепла и отопления, выравнивает момент перепада включения/выключения электрической энергии, компенсируя теплопроизводительность генератора тепла и потребителя тепла, и в то же время выполняет частичное перекрытие тарифных периодов электроэнергии.

В реальных условиях эксперимента (рис. 6) проводились длительные объёмные исследования по обработке данного технологического процесса в цифровом формате. Полученные в результате исследования данные позволили разработать экспериментальное схемное решение (алгоритм) для широкого диапазона различных климатических условий.



Рис. 6. Камера смешения воздуха [15] и ВТН, установленные в малоэтажном жилом здании в Ивановской области

Предлагается разработка цифровой технологической модели управления теплообменом через воздушный тепловой насос для малоэтажных и коттеджных строений (рис. 7). Данную схему поясним таблицей 1.

Таблица 1

Описание датчиков управления

Датчик 1 — D/t_1	Установлен в буферной ёмкости. Сигнал поступает в модуль управления ТН (МУТН) при изменении граничных значений установленной температуры и выходной тепловой мощности ВТН. ВТН включается или выключается.
Датчик 2 — D/t_2	Установлен на испарителе. Сигнал поступает в МУТН при изменении установленных значений параметров. Вентилятор, обдувающий испаритель, согласно параметрам изменяет скорость вращения.
P_1, P_2, P_3	Датчики защиты компрессора. В нормальном рабочем состоянии контакты замкнуты. При превышении или понижении заданных параметров контакты датчиков размыкаются, что приводит к остановке компрессора.
Датчик 2 — D/t_3	Установлен на улице и даёт сигнал состояния температуры на модуль ШИМ-регулятора электродкотла. Модуль ШИМ-регулятор имеет свою программу — настройку управления электродкотлом.
Датчик 2 — D/t_4	Установлен в объёмной смесительной камере и даёт сигнал на модуль управления работой смесительной камеры. Программная настройка, которая защита на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ путем реакции на изменение температуры внутри смесительной камеры. Назначение механизма заслонок — реакция на изменение процентного соотношения поступающего воздуха с улицы и из помещения, обеспечивая получение нужной температуры на испарителе.

Силовые модули обеспечивают необходимую электрическую мощность нагрузок. К нагрузкам относятся: компрессор ТН, вентилятор испарителя, соленоид оттайки, циркуляционный насос, ТЭНы электродкотла, механизм привода заслонок. Силовой модуль питания (МП) обеспечивает работу всей схемы.

Цифровая технологическая модель управления теплообменом через воздушный тепловой насос в малоэтажном строении

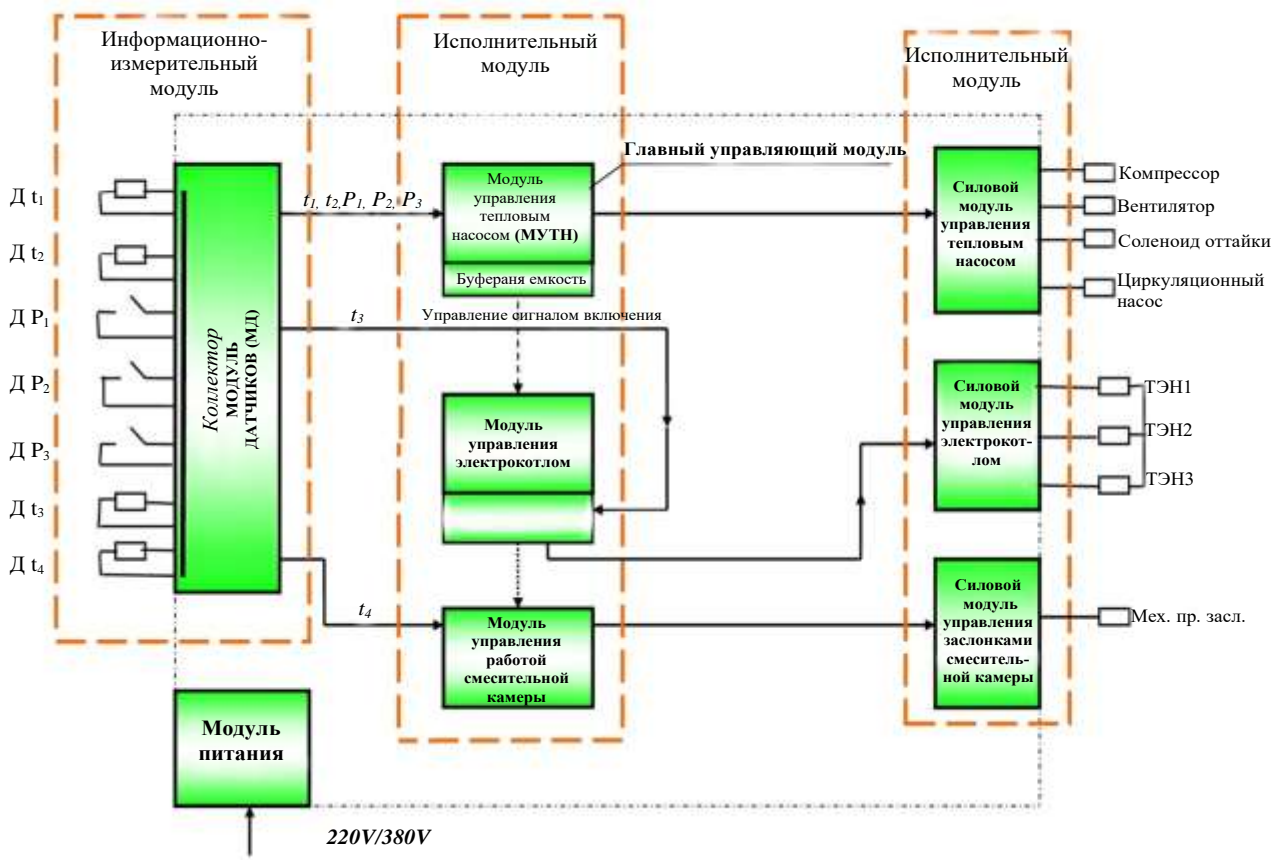


Рис. 7. Цифровой комбинированный модуль управления ВТН (компьютер-контроллер)

Обсуждение и заключение. Используя информационно-цифровые решения, открываются широкие функциональные возможности технологического контроля и управления температурно-влажностным состоянием в помещении строения, температурным градиентом на улице совместно с коллекторным модулем датчиков $Dt_1 - Dt_4$. Цифровой модуль распознавания параметров данного технологического процесса ВТН позволяет обеспечить регулирование попеременного расхода теплого и холодного воздуха, реализуя этот процесс через компьютер-контроллер на исполнительные механизмы системы воздухообмена. Такая цифровизация позволяет снизить излишнюю тепловую и электрическую нагрузку, а также минимизировать объем, площадь котельной и коммуникации воздухообмена. В результате принятых решений снижается стоимость и габариты помещения.

Предлагая цифровую модульно-функционально-структурную схему теплогенерации из окружающей среды, в нашем случае опираясь на энергоэффективность схемного решения с электродкотлом, буферной емкостью и запатентованной смесительной камерой [15], мы добиваемся рационально-управляемого тепловоздухообмена комбинированной теплонасосной системы.

Список литературы/References

1. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Воронов В.А. Функционально-структурный анализ фреонового контура воздушного теплового насоса. *Строительные материалы*. 2025;12:65–72. <http://doi.org/10.31659/0585-430X-2025-842-12-65-72>
Fedosov SV, Fedoseev VN, Voronov VA Functional and Structural Analysis of the Freon Circuit of an Air Heat Pump. *Construction Materials*. 2025;12:65–72. (In Russ.) <http://doi.org/10.31659/0585-430X-2025-842-12-65-72>
2. Сколубович Ю.Л., Анпилов С.М., Добровольский Д.А., Ерофеев В.Т., Леонович С.Н., Маилян Л.Р. и др. Способы продления жизненного цикла зданий с деревянными перекрытиями. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024;789:88–103. <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-789-9-88-103>
Skolubovich YuL, Anpilov SM, Dobrovolsky DA, Erofeev VT, Leonovich SN, Mailyan LR, Rimshin VI, Sorochaykin AN Ways to Extend the Life Cycle of Buildings with Wooden Floors. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024;789:88–103. (In Russ.) <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-789-9-88-103>
3. Римшин В.И., Кецко Е.С., Есипов С.М., Меркулов С.И. Определение факторов, влияющих на жизненный цикл здания торгового назначения. *Вестник евразийской науки*. 2023;15(6):56SAVN623. URL: <https://esj.today/PDF/56SAVN623.pdf> (дата обращения: 17.05.2026)
Rimshin VI, Ketso ES, Esipov SM, Merkulov SI Factors Determination Influencing the Commercial Building Life Cycle. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023;15(6):56SAVN623. (In Russ.) URL: <https://esj.today/PDF/56SAVN623.pdf> (accessed: 17.05.2026)
4. Лapidус А.А., Красновский Б.М., Муртазаев С.А.Ю., Алиев С.А. Методология организации строительства комплексного развития территорий для обеспечения ресурсной и логистической координации. *Строительное производство*. 2025;1:3–7. http://doi.org/10.54950/26585340_2025_1_3
Lapidus AA, Krasnovsky BM, Murtazaev SAYu, Aliev SA Methodology for Organizing Construction of Comprehensive Territorial Development to Ensure Resource and Logistical Coordination. *Construction Production*. 2025;1:3–7. (In Russ.) http://doi.org/10.54950/26585340_2025_1_3
5. Теличенко В.И., Лapidус А.А., Слесарев М.Ю., Али М.М. Методы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с учетом влияния экологических и других видов рисков. *Строительство: наука и образование*. 2024;14(2):166–177. <http://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.2.166-177>
Telichenko VI, Lapidus AA, Slesarev MYu, Ali MM Methods for Managing the Life Cycle of Capital Construction Objects Considering the Impact of Environmental and Other Types of Risks. *Construction: Science and Education*. 2024;14(2):166–177. (In Russ.) <http://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.2.166-177>
6. Маилян Л.Р., Шилов П.А. Технология изготовления фибробетона с агрегированным ориентированным фибровым армированием и исследование его характеристик. *Эксперт: теория и практика*. 2023;2:53–59. http://doi.org/10.51608/26867818_2023_2_53
7. Mailyan LR, Shilov PA Technology of Making Fiber Concrete with Aggregated Oriented Fiber Reinforcement and the Analysis of its Characteristics. *Expert: Theory and Practice*. 2023;(2):53–59. (In Russ.) http://doi.org/10.51608/26867818_2023_2_53
8. Манжилевская С.Е., Евтушенко А.И., Маилян Д.Р. Применение зеленых крыш в точечном строительстве для повышения экологической безопасности городских территорий. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;2:136–145. <http://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-136-145>
Manzilevskaya SE, Evtushenko AI, Mailyan DR Green Roofs in Infill Development to Improve the Environmental Safety of Urban Areas. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;(2):136–145. (In Russ.) <http://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-2-136-145>

9. Dai B, Liu C, Liu S, Dabiao W, Wang Q, Zou T et al. Life Cycle Techno-Enviro-Economic Assessment of Dual-Temperature Evaporation Transcritical CO₂ High-Temperature Heat Pump Systems for Industrial Waste Heat Recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2023;219:119570. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119570>

10. Wang B, Geng L, Dang P, Zhang L Developing a Framework for Dynamic Organizational Resilience Analysis in Prefabricated Construction Projects: A Project Life Cycle Perspective. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2022;148(10):04022111. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002381](http://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002381)

11. Waqar A, Othman I, Hayat S, Radu D, Khan M, Galatanu T et al. Building Information Modeling-Empowering Construction Projects with End-to-End Life Cycle Management. *Buildings*. 2023;13(8):2041. <http://doi.org/10.3390/buildings13082041>

12. Gamage I, Senaratne S, Perera S, Xiaohua J Implementing Circular Economy throughout the Construction Project Life Cycle: A Review on Potential Practices and Relationships. *Buildings*. 2024;14(3):653. <http://doi.org/10.3390/buildings14030653>

13. Homthong S, Mounngnoi W, Charoenngam C Whole Life Critical Factors Influencing Construction Project Performance for Different Objectives: Evidence from Thailand. *Buildings*. 2024;14(4):999. <http://doi.org/10.3390/buildings14040999>

14. Famiglietti J, Acconito L, Arpagaus C, Toppi T Environmental Life Cycle Assessment of Industrial High-Temperature to Residential Small-Size Heat Pumps: A Critical Review. *Energy Conversion and Management: X*. 2025;26:100947. <http://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100947>

15. Zhang S, Liu S, Shen Y, Shukla A, Mazhar A, Chen T Critical Review of Solar-Assisted Air Source Heat Pump in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024;193:114291. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114291>

16. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Емелин В.А., Воронов В.А., Свиридов И.А. Смесительная камера. Патент РФ, № 2024109295. 2024.

Fedosov SV, Fedoseev VN, Emelin VA, Voronov VA, Sviridov IA *Mixing Chamber*. Patent RF, No. 2024109295. 2024.

Об авторах:

Федосов Сергей Викторович, доктор технических наук, академик РААСН, профессор кафедры технологий и организации строительного производства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Российская Федерация, Москва, Ярославское шоссе, 26), [ScopusID](#), [ORCID](#), fedosovsv@mgsu.ru

Федосеев Вадим Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры организации производства и городского хозяйства Ивановского государственного политехнического университета (153000, Российская Федерация, Иваново, Шереметевский проспект, 21), [ScopusID](#), [ORCID](#), 4932421318@mail.ru

Воронов Владимир Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры организации производства и городского хозяйства Ивановского государственного политехнического университета (153000, Российская Федерация, Иваново, Шереметевский проспект, 21), [ScopusID](#), [ORCID](#), amenamiiii@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

С.В. Федосов: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования.

В.Н. Федосеев: формирование основной концепции, доработка текста, корректировка выводов.

В.А. Воронов: проведение расчетов, анализ результатов исследований, подготовка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Sergey V. Fedosov, D.Sc. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production at the National Research Moscow State University of Civil Engineering (26 Yaroslavl Highway, Moscow, 129337 Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), fedosovsv@mgsu.ru

Vadim N. Fedoseev, D.Sc. (Eng.), Professor of the Department of Industrial Management and Urban Management of Ivanovo State Polytechnic University (21 Sheremetyevo Avenue, Ivanovo, 153000, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), 4932421318@mail.ru

Vladimir A. Voronov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial Management and Urban Management of Ivanovo State Polytechnic University (21 Sheremetyevo Avenue, Ivanovo, 153000, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), amenamiiii@gmail.com

Claimed contributorship:

SV Fedosov: scientific supervision, formation of the basic concept, aims of the study.

VN Fedoseev: formation of the basic concept, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

VA Voronov: carrying out the calculations, analysis of the research results, preparation of the manuscript, 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 17.05.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 31.05.2026

Принята к публикации / Accepted 14.06.2026